ATZ/MTZ-Fachbuch

Heiner Bubb
Klaus Bengler
Rainer E. Grünen
Mark Vollrath

Automobil-ergonomie

HUMAN
SOLUTIONS
ASSYST
AVM

Springer Vieweg

Ergonomie für das Automobil

Die komplexe Technik heutiger Kraftfahrzeuge und Motoren macht einen immer größer werdenden Fundus an Informationen notwendig, um die Funktion und die Arbeitsweise von Komponenten oder Systemen zu verstehen. Den raschen und sicheren Zugriff auf diese Informationen bietet die regelmäßig aktualisierte Reihe ATZ/MTZ-Fachbuch, welche die zum Verständnis erforderlichen Grundlagen, Daten und Erklärungen anschaulich, systematisch und anwendungsorientiert zusammenstellt.
Die Reihe wendet sich an Fahrzeug- und Motoreningenieure sowie Studierende, die Nachschlagebedarf haben und im Zusammenhang Fragestellungen ihres Arbeitsfeldes verstehen müssen und an Professoren und Dozenten an Universitäten und Hochschulen mit Schwerpunkt Kraftfahrzeug- und Motorentechnik. Sie liefert gleichzeitig das theoretische Rüstzeug für dasVerständnis wie auch die Anwendungen, wie sie für Gutachter, Forscher und Entwicklungsingenieure in der Automobil- und Zulieferindustrie sowie bei Dienstleistern benötigt werden.

Heiner Bubb
Klaus Bengler
Rainer E. Grünen
Mark Vollrath

Automobilergonomie

Springer Vieweg

Herausgeber
Prof. i. R. Dr. Heiner Bubb
Technische Universität München
Lehrstuhl für Ergonomie
München, Deutschland

Prof. Dr. phil. Klaus Bengler
Technische Universität München
Lehrstuhl für Ergonomie
München, Deutschland

Dipl.-Ing. Rainer E. Grünen
Adam Opel AG
GME Architecture & Vehicle Configuration
Rüsselsheim, Deutschland

Prof. Dr. Mark Vollrath
TU Braunschweig
Braunschweig, Deutschland

ISBN 978-3-8348-1890-4 ISBN 978-3-8348-2297-0 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-8348-2297-0

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Springer Vieweg
© Springer Fachmedien Wiesbaden 2015
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Vorwort

Das Automobil ist das wohl faszinierendste Industrieprodukt überhaupt. Dies hat die verschiedensten Gründe. Zuvorderst erfüllt es ganz klar das Grundbedürfnis nach Mobilität, noch dazu nach eigenbestimmter Mobilität. Es erweitert damit die natürliche Bewegungsfähigkeit, die den Menschen u. a. zum Lebewesen macht und die somit für das Überleben essenzielle Bedeutung hat. In gewisser Weise stellt es die reale Erfüllung des Traumes von den Siebenmeilenstiefeln dar, der von den Gebrüdern Grimm in dem Märchen vom gestifteten Kater geschildert wird. Wenn man einmal von den Einschränkungen absieht, die sich dadurch ergeben, dass sich diesen Traum in den hoch industrialisierten Gebieten heute fast jeder leisten kann, so wird durch das Automobil gewährleistet, dass man jederzeit von (fast) jedem Ort starten kann und (fast) jeden Ort erreichen kann. Ja, selbst wenn keine ausreichenden Wege vorhanden sind, steht diese Option noch offen – vorausgesetzt, man verfügt über ein dafür geeignetes Fahrzeug. Auch wenn diese Möglichkeiten für die meisten aufgrund äußerer Zwänge wie hohe Verkehrsdichte, fehlender Parkraum und Ähnlichem, praktisch nicht in diese idealen Form zur Verfügung stehen, so muss man für die emotionale Einschätzung des Automobils die eben geschilderte totale Mobilität als Hintergrundgefühl sehen, das dessen Begehrlichkeit begründet. Daneben ist das Automobil für seinen Besitzer und Nutzer aber auch ein Mittel, sein eigenes Selbst, seine Persönlichkeit darzustellen. Man kann sich damit als seriös distinguiert, als sportlich progressiv, als extrovertiert, als pragmatisch oder als bescheiden zeigen. Es erfüllt somit eine ähnliche Funktion wie die Kleidung oder die Möblierung des eigenen Heims. Und wie diese unterliegt es selbstverständlich auch der Mode und Modeströmungen. Speziell die äußere Form, zunehmend aber auch die Ausgestaltung des Innenraums, also das, was heute unter dem Begriff Industrial Design subsumiert wird, spielt somit für den Kauf eines Fahrzeugs die herausragende Rolle. Wenn man dann aber das Fahrzeug längere Zeit benutzt, fallen womöglich lästige Eigentümlichkeiten auf. Beispielsweise kann man nicht die richtige Sitzpositionen finden, die Sicht ist eventuell behindert, man findet das eine oder andere unbequem, man hat das Gefühl, das Fahrzeug nicht richtig in der Hand zu haben u. v. a. m., kurzum im Alltag spielt dann womöglich die Gebrauchstauglichkeit, d. h. die ergonomische Gestaltung eine wichtige Rolle dafür, dass man das Fahrzeug wirklich als eine Erweiterung des eigenen Selbst empfindet. Oft wird argumentiert, diese zuletzt genannten Punkte seien u. a. die Grundlage für die Ablehnung oder den Wiederkauf eines Fahrzeugs der zuvor gewählten Marke. Vereinfacht gesprochen, spricht hinsichtlich der persönlichen Zuwendung zum Fahrzeug das Design die „Emotio“ und die Ergonomie die „Ratio“ an.

Der automobile Verkehr hat auch eine negative Kehrseite. Durch die möglichen hohen Geschwindigkeiten kann bei einem unkontrollierten zum Crash kommenden Verlauf eine solch hohe Energieübertragung auf die Passagiere erfolgen, dass dies zu erheblichen, im schlimmsten Fall tödlichen Verletzungen führen kann. Wenn auch die Verletzten- und Todesrate im Vergleich zu früheren individuellen Verkehrsmitteln (Reitpferd, Kutsche, Fuhrwerk) beim Automobil bezogen auf die Fahrerleistung geringer ist, so hat die große Zahl von Fahrzeugen und die hohe Verkehrsdichte insgesamt – auch weltweit gesehen – eine erschreckende Anzahl von Verletzten und Getöteten zur Folge. Die Maßnahmen der sog. passiven Sicherheit, durch welche bei einem Crash in vielen Fällen das Ausmaß der auf die Passagiere übertragenen Energie auf ein tolerables Maß reduziert wird, haben zwar insgesamt eine Reduktion der Getöteten im Straßenverkehr trotz zunehmender Fahrleistungen bewirkt, der Traum vom un-

fallfreien Fahren kann aber wohl nur durch die sog. aktive Sicherheit erreicht werden, welche einen drohenden Unfall bereits in dessen Vorphase abzuwenden versucht. Ergänzend zu den elaborierten technischen Maßnahmen der Sensorik und Aktuatorik kann auch die Ergonomie für die aktive Sicherheit einen essenziellen Beitrag leisten. Ergonomische Maßnahmen sorgen für ermüdungsfreies Fahren, verhindern Sichteinschränkungen und Ablenkung und machen die Wirkung von Assistenzsystemen, die für die aktive Sicherheit einen wesentlichen Beitrag liefern, einsichtig und damit akzeptabel.

Die Autoren dieses Buches haben sich die Aufgabe gestellt, die Anwendung des breiten Wissens auf dem Gebiet der Ergonomie für die Gestaltung des Automobils umfassend darzustellen. Im ▶ Kap. 1 wird in einem *historischen Abriss* gezeigt, dass eine Anpassung des Automobils an die Bedürfnisse des Menschen auch schon stattgefunden hat, bevor dies mit wissenschaftlichen Methoden angegangen worden ist. Außerdem enthält dieses Kapitel auch eine knappe Übersicht über die Inhalte der Ergonomie.

Für die wissenschaftlich fundierte ergonomische Gestaltung eines technischen Mittels muss zunächst der *Aufgabe* beschrieben werden, die mit ihm erfüllt werden soll und die eigentlich unabhängig sowohl von den Eigenschaften und Fähigkeiten des Menschen als auch von den zur Verfügung stehenden technischen Mitteln ist. Durch das *Regelkreisparadigma* der Ergonomie wird dies im ▶ Kap. 2 beschrieben. Danach ist der Informationswandel, der durch die Interaktion zwischen Mensch und Maschine bewerkstelligt wird, von primärem Interesse.

Um das technische Mittel an den Menschen anzupassen ist die Kenntnis dessen Eigenschaften und Fähigkeiten unerlässlich. In ▶ Kap. 3 werden deshalb die *kognitiven Eigenschaften* (Informationsaufnahme, -verarbeitung und -umsetzung) des Fahrers dargestellt, wobei speziell die Anforderungen, die durch die Fahraufgabe zu Stande kommen, betont werden.

Für die Gestaltung der Werkzeuge des Menschen – also auch des Autos – spielt aber nicht nur der Zweck eine Rolle, für den das Werkzeug eingesetzt wird, sondern auch dessen Anpassung an die körperlichen Eigenschaften des Menschen. Diese körperlichen Eigenschaften, zusammengefasst unter dem Begriff *Anthropometrie*, beziehen sich einerseits auf den gesamten physiologischen Apparat sowohl mit Blick auf die *geometrischen Eigenschaften* als auch die Möglichkeiten, *Kräfte* aufzubringen. Im ▶ Kap. 4 wird auf diese beiden Aspekte mit Rücksicht auf die Anwendung im Automobil eingegangen.

Um das „harte“ technische Werkzeug Auto an die „weichen“ Eigenschaften des Menschen anzupassen, sind *Modelle über menschliches Verhalten und Eigenschaften* notwendig, die eine Objektivierung des Grades der Anpassung möglich machen. Mit den heutigen Methoden und Mitteln der Computertechnologie kann ein Großteil sowohl der kognitiven wie auch der anthropometrischen Eigenschaften des Menschen im Computer simuliert und modelliert werden. Im ▶ Kap. 5 erfolgt eine Beschreibung dieser heute in der Fahrzeugentwicklung im Einsatz befindlichen Gestaltungswerkzeuge.

Mit all den Kenntnissen, die nun zur Verfügung stehen, ist es möglich, das Werkzeug, die Maschine hier speziell das Auto ergonomisch zu gestalten. Dabei ist zuerst festzulegen, für welchen Zweck das Werkzeug eingesetzt werden soll. Stehen alle für die Erfüllung der Aufgabe notwendigen *Informationen* zur Verfügung und sind diese verständlich? Dies wird in ▶ Kap. 6 dargestellt.

In der Folge ergibt sich die Frage, inwieweit dieses Werkzeug an die anatomischen Eigenschaften des Menschen angepasst ist. Das bezieht sich im Wesentlichen auf *Abmessungen* – z. B. kann der Fahrer die Information der Aufgabe überhaupt aufgrund der gegebenen Geometrie erfassen? Und *Kräfte* – z. B. ist er in der Lage, die notwendigen Handlungen auch zu realisieren? Dieses und vieles mehr wird in ▶ Kap. 7 behandelt.

Wenn die oben genannten beiden Punkte alle korrekt abgearbeitet sind, ergibt sich die Frage, ob womöglich bei der Durchführung der Aufgabe äußere davon unabhängige Einflüsse vorhanden sind, die den Fahrer bei seinem Wirken in irgendeiner Weise beeinträchtigen können. Eine optimale Gestaltung diese Punkte sorgt dafür, dass die *Kondition* des Fahrers nach Möglichkeit auch über längere Strecken erhalten bleibt. Die entsprechenden Einflussfaktoren werden in ▶ Kap. 8 dargelegt.

Durch den Einsatz von *Assistenzsystemen* wird die Aufgabe des Autofahrens gegenüber dem bisher Gewohnten teilweise erheblich ändert. Aus ergonomischer Sicht ist dabei die Frage, welche Teilaspekte der Aufgabe assistiert werden sollen und wie der Fahrer unter Anwendung der in ▶ Kap. 6 und teilweise auch ▶ Kap. 7 beschriebenen Prinzipien dadurch unterstützt werden soll. Das alles wird in ▶ Kap. 9 beschrieben.

All die bisher zusammengetragenen Erkenntnisse und Forderungen müssen schließlich auch realisiert werden. Deshalb befasst sich das ▶ Kap. 10 mit der *ergonomischen Fahrzeugentwicklung*, insbesondere den dafür eingesetzten Mitteln (Simulatoren, Augmented Reality bis hin zur Kundenbefragung).

Viele Aspekte kann man bei der Entwicklung eines neuen Fahrzeugs allerdings nicht vorab durch Anwendung von Regeln und Nutzung von Computerwerkzeugen berücksichtigen. Deshalb werden in ▶ Kap. 11 die verschiedenen *Messmethoden* dargestellt, die man im Laufe des Entwicklungsprozesses anwenden muss, um zu einem optimierten Produkt zu kommen.

Insbesondere Untersuchungen, die in irgendeiner Form Probanden nutzen, stehen vor dem Problem der Streuung der Daten, die weit über das Maß hinausgehen, wie man es im technischen Bereich gewohnt ist. Um hier trotzdem zu nachprüfbar soliden Aussagen zu kommen, muss man bestimmte Methoden der *Statistik* anwenden, die in ▶ Kap. 12 dargestellt werden.

Verantwortliche in der Automobilindustrie haben die Stärke der Ergonomie schon vor langer Zeit erkannt. Deshalb sind heute in allen Unternehmen – in unterschiedlicher Organisationsform – ergonomische Abteilungen eingerichtet, deren Aufgabe es ist, ergonomische Erkenntnisse bei der Gestaltung des Produktes Automobil anzuwenden.

Obwohl heute an allen technischen Universitäten Lehrstühle für Ergonomie bzw. Arbeitswissenschaft eingerichtet sind und Ingenieure in ihrer Ausbildung die Möglichkeit haben, auf diesem Gebiet Kenntnisse zu erwerben und zudem an vielen Universitäten auch Psychologen eine fundierte technisch orientierte ergonomische Ausbildung erlangen können, besteht in der industriellen Praxis oftmals ein Mangel an entsprechend vorgebildeten Fachleuten. Deshalb müssen in den ergonomischen Abteilungen häufig Mitarbeiter die nötigen Fachkenntnisse durch „learning by doing“ erwerben.

Das vorliegende Buch wendet sich an diesen Personenkreis. In gleichem Maße will es aber auch dem Manager die Möglichkeiten und den Gewinn aufzuzeigen, den eine ergonomische Produktgestaltung bietet. Nicht zuletzt dient es auch als Lehrbuch für Studenten der Fahrzeugtechnik, der Arbeitswissenschaft/Ergonomie und der Ingenieurpsychologie/Verkehrspsychologie. Es will durch eine systematische Aufbereitung ergonomischen Wissens mit der besonderen Anwendungsrichtung Fahrzeuggestaltung eine solide Grundlage für Entscheidungen bei der Entwicklung von Produkten auf diesem Gebiet liefern.

Für die Autoren: Heiner Bubb
Januar 2015

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung ... 1
Heiner Bubb
1.1 **Aktuelle Hauptentwicklungslinien des Automobils** ... 2
1.2 **Kurzer historischer Überblick über die Fahrzeugentwicklung aus Nutzersicht** ... 8
1.2.1 Entwicklung der Fahrfunktionen ... 8
1.2.2 Entwicklung des Cockpits ... 13
1.3 **Die Bedeutung der Ergonomie für die Automobilentwicklung** ... 16
1.3.1 Kurzer Abriss der Entwicklung der Ergonomie ... 16
1.3.2 Ergonomie und Arbeitswissenschaft (Micro Ergonomics und Macro Ergonomics) ... 17
1.3.3 Teilgebiet der Ergonomie ... 17
1.3.4 Anwendungsgebiete der Ergonomie ... 19
1.4 **Hierarchie der Fahraufgabe** ... 20
1.4.1 Primäre Aufgabe ... 20
1.4.2 Sekundäre Aufgaben ... 22
1.4.3 Tertiäre Aufgaben ... 23
1.5 **Informationsflüsse im Verkehr** ... 24
Literatur ... 25

2 Das Regelkreisparadigma der Ergonomie ... 27
Heiner Bubb
2.1 **Fahrer-Fahrzeug-Interaktion** ... 28
2.1.1 Der Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis ... 28
2.1.2 Folge- und Kompensationsaufgabe ... 30
2.1.3 Qualität und Leistung ... 31
2.1.4 Qualität bei der Querdynamik ... 31
2.1.5 Qualität bei der Längsdynamik ... 32
2.2 **Grundbegriffe der Systemtechnik** ... 33
2.3 **Systemdynamik** ... 37
2.3.1 Übergangsfunktionen und Frequenzgang ... 37
2.3.2 Übergangsfunktion ... 38
2.3.3 Frequenzgang ... 40
2.4 **Vom Fahrer geregelte Größen** ... 46
2.4.1 Querdynamik ... 46
2.4.2 Längsdynamik ... 51
2.5 **Die primäre Fahraufgabe aus regelungstechnischer Sicht** ... 53
2.6 **Systemzuverlässigkeit** ... 56
2.6.1 Sicherheit, Risiko, Grenzrisiko und Schutz ... 56
2.6.2 Zuverlässigkeit, Fehler und Sicherheit ... 57
2.6.3 Menschlicher Fehler und Unfallwahrscheinlichkeit ... 60
2.6.4 Ableitung von Maßnahmen aus den Fehlerbaumanalysen ... 61
Literatur ... 64

3 Der Mensch als Fahrer 67
Heiner Bubb, unter Mitwirkung von Mark Vollrath, Klaus Reinprecht, Erhard Mayer, Moritz Körber
3.1 **Der Mensch als Information verarbeitendes System** 68
3.1.1 Systemtechnisches Modell des Fahrers 68
3.1.2 Anatomisch-funktionales Modell 68
3.1.3 Funktionell-neurophysiologisches Modell 73
3.2 **Elemente des Information verarbeitenden Menschen** 81
3.2.1 Informationsaufnahme 81
3.2.2 Informationsverarbeitung 105
3.2.3 Informationsumsetzung 122
3.3 **Informationsverarbeitung beim Autofahren** 126
3.3.1 Das Gefühl für die Zeit 126
3.3.2 Blickverhalten des Menschen beim Führen eines PKWs 126
3.3.3 Blickverhalten und innere Modelle 144
3.3.4 Komfort und Diskomfort 146
3.3.5 Belastung und Beanspruchung 149
3.4 **Fahrfehler** 151
3.4.1 Menschliche Zuverlässigkeit und Fahrfehler 151
3.4.2 Ursachen menschlicher Fehler 153
Literatur 158

4 Anatomische und anthropometrische Eigenschaften des Fahrers 163
Rainer E. Grünen, Fabian Günzkofer, Heiner Bubb
4.1 **Anatomische Grundlagen** 164
4.1.1 Der Bewegungsapparat 164
4.1.2 Muskulatur 173
4.2 **Anthropometrie** 179
4.2.1 Längen- und Umfangsmaße 179
4.2.2 Gewicht 197
4.2.3 Kräfte 199
4.2.4 Beweglichkeit 208
Literatur 216

5 Menschmodelle 221
Heiner Bubb
5.1 **Kognitive Menschmodelle** 222
5.1.1 Regelungstechnische Modelle 222
5.1.2 Der Nutzen regelungstechnischer Menschmodelle 230
5.1.3 Kognitive Fahrermodelle 231
5.2 **Anthropometrische Menschmodelle** 238
5.2.1 Zeichenschablonen 238
5.2.2 Digitale Menschmodelle 240
5.3 **Zusammenfassende Würdigung des Nutzens von Menschmodellierung** 253
Literatur 253

6 Systemergonomie des Fahrzeugs 259
Heiner Bubb, unter Mitarbeit von Klaus Bengler, Jurek Breuninger, Christian Gold, Magnus Helmbrecht
6.1 **Allgemeine systemergonomische Gestaltungsrichtlinien** 260
6.1.1 Funktion 263
6.1.2 Rückmeldung 269
6.1.3 Kompatibilität 269
6.2 **Mensch – Maschine – Interaktion** 272
6.2.1 Anzeigen 275
6.2.2 Bedienelemente 291
6.3 **Systemergonomische Empfehlungen für die jeweiligen Fahraufgabenniveaus** 303
6.3.1 Primäre Fahraufgabe 303
6.3.2 Sekundäre Fahraufgabe 309
6.3.3 Tertiäre Aufgaben 310
6.4 **Gestaltung der fahrrelevanten Eigenschaften** 312
6.4.1 Querdynamik: Das Lenkgefühl 313
6.4.2 Längsdynamik 328
6.4.3 X-by-Wire 333
Literatur 340

7 Anthropometrische Fahrzeuggestaltung 345
Heiner Bubb, Rainer E. Grünen, unter Mitarbeit von Wolfram Remlinger
7.1 **Fahrzeugpackaging** 347
7.1.1 Zielsetzung des anthropometrischen Package 347
7.1.2 PKW-Maßkonzeption nach SAE 350
7.1.3 Arbeitsfelder der anthropometrischen Ergonomie 354
7.2 **Sitzen** 360
7.2.1 Berücksichtigung unterschiedlicher Anthropometrien 360
7.2.2 Fahrer 363
7.2.3 Rechtslenkerproblematik 386
7.2.4 Beifahrer 393
7.2.5 Fahrzeugfond 393
7.3 **Sicht** 396
7.3.1 Direkte Sicht 396
7.3.2 Indirekte Sicht 408
7.3.3 Sicht auf Bedien- und Anzeigekomponenten 410
7.3.4 Reflexionen 413
7.4 **Bedien- und Anzeigekomponenten** 418
7.4.1 Bestimmung der Erreichbarkeitsflächen nach SAE 418
7.4.2 Funktionale Greifräume 419
7.4.3 Berücksichtigung spezieller Bedienanforderungen 420
7.5 **Raumbedarf** 423
7.5.1 Statischer und dynamischer Raumbedarf 423
7.5.2 Ablagen 425
7.5.3 Raumgefühl 426

7.6 **Ein- und Ausstieg** 428
7.6.1 Türkonzepte 428
7.6.2 Bewegungsstrategien 432
7.6.3 Bewertungsmethoden 439
7.6.4 Zugang zur 2. und 3. Sitzreihe 450
7.7 **Beladen** 452
7.7.1 Geometrie 452
7.7.2 Bedienbarkeit 454
7.8 **Berücksichtigung spezifischer Nutzergruppen** 455
7.8.1 Ältere Fahrzeugnutzer 455
7.8.2 Kinder 462
7.9 **Handwerklichkeit** 463
Literatur 467

8 Gestaltung der Konditionssicherheit 471
Heiner Bubb
8.1 **Beleuchtung** 472
8.1.1 Lichttechnische Maße 472
8.1.2 Außenbeleuchtung 474
8.1.3 Innenbeleuchtung 475
8.2 **Schall** 478
8.2.1 Fahrgeräusche 478
8.2.2 Kleine Geräusche 483
8.2.3 Nutzsignale 485
8.3 **Schwingungen** 486
8.3.1 Schwingungsphänomene 486
8.3.2 Wahrnehmung von Schwingungen 487
8.3.3 Schwingungsbewertung 488
8.3.4 Komfort und Fahrsicherheit 492
8.3.5 Kinetose 496
8.4 **Klima** 497
8.4.1 Klima, Leistungsfähigkeit und Komfort 497
8.4.2 Klimatische Behaglichkeit 498
8.4.3 Umweltbedingungen 503
8.4.4 Anforderungen an die Technik 505
8.5 **Geruch** 518
Literatur 520

9 Fahrerassistenz 525
Heiner Bubb, unter Mitarbeit von Klaus Bengler
9.1 **Was ist Assistenz?** 526
9.2 **Fahrerassistenz und Fahraufgabe** 528
9.2.1 Heute verfügbare Fahrerassistenzsysteme für die primäre Fahraufgabe 529
9.2.2 Kategorisierung der Fahrerassistenzsysteme für die primäre Fahraufgabe 557
9.2.3 Müdigkeitswarner 562
9.3 **Beitrag der Fahrerassistenzsysteme zur Fahrsicherheit** 566

9.4 **Ergonomische Gestaltung** 571
9.4.1 Bedienung und Anzeige 571
9.4.2 Unterscheidbarkeit der Modi eines Fahrerassistenzsystems 575
Literatur 578

10 Methoden der ergonomischen Fahrzeugentwicklung 583
Heiner Bubb
10.1 **Ergonomie im Fahrzeugentwicklungsprozess** 584
10.2 **Virtual Reality** 588
10.3 **Simulation anthropometrischer Bedingungen** 590
10.3.1 Sitzkiste 590
10.3.2 Variabler Ergonomieprüfstand 591
10.3.3 Anwendung von Virtual Reality 592
10.4 **Simulation fahr- und verkehrsdynamischer Aspekte** 598
10.4.1 Motivation für Fahrsimulatoren und deren technische Herausforderung 598
10.4.2 Simulatortechniken 600
10.4.3 Aussagekraft von Fahrsimulatoren unterschiedlichen Niveaus 606
10.4.4 Nutzung von Augmented Reality im Realfahrzeug 609
10.5 **Versuche im Realfahrzeug** 611
10.5.1 Versuche auf abgesperrtem Gelände 611
10.5.2 Versuche im öffentlichen Straßenverkehr 613
10.5.3 Kundenrückmeldungen 614
Literatur 615

11 Messmethoden 617
Heiner Bubb, Klaus Bengler, Christian Lange, Carmen Aringer, Nicole Trübswetter, unter Mitarbeit von Antonia Conti, Markus Zimmermann
11.1 **Notwendigkeit von Versuchen** 618
11.1.1 Wissenschaftliche Anforderungen an Versuche 618
11.1.2 Bewertung der Gebrauchstauglichkeit – Usability 619
11.1.3 Versuchsplanung 620
11.2 **Objektive Messungen** 621
11.2.1 Erfassung der individuellen Anthropometrie 621
11.2.2 Erfassung von Körperhaltung und -bewegung 623
11.2.3 Erfassen von Kontaktkräften 626
11.2.4 Blickbewegung 630
11.2.5 Leistungsmessungen 637
11.2.6 Physiologische Parameter 641
11.3 **Subjektive Messungen** 644
11.3.1 Psychophysik 644
11.3.2 Interview 649
11.3.3 Standardisierte Fragebögen 657
Literatur 659

12 Statistische Methoden 663
Mark Vollrath
12.1 **Grundlegende Fragestellungen – Verteilung vs. Unterschiedsprüfung** 664
12.2 **Ausprägung von Merkmalen – Vertrauensintervalle** 664
12.2.1 Methodik – Stichprobenziehung 664
12.2.2 Statistik – Bestimmung von Kenngrößen 666
12.3 **Unterschiede zwischen Bedingungen – Signifikanztests** 669
12.3.1 Methodik – Versuchspläne 669
12.3.2 Statistik – Signifikanztests 673
12.3.3 Statistik – Darstellung der Ergebnisse 679
12.4 **Externe und interne Validität** 682
Literatur 684

13 Ausblick 685
Klaus Bengler, Heiner Bubb
13.1 **Elektromobilität** 686
13.2 **Automation** 687
13.3 **Mobilitätsverhalten** 688
Literatur 688

Anhang 691
Sachwortverzeichnis 692

Autorenverzeichnis

Carmen Aringer, M. A.
Technische Universität München

Prof. Dr. phil. Klaus Bengler
Technische Universität München

Dipl.-Ing. Jurek Breuninger
Technische Universität München

Prof. i. R. Dr. Heiner Bubb
Technische Universität München

Antonia Conti, M. Sc.
Technische Universität München

Dipl.-Ing. Christian Gold
Technische Universität München

Dipl.-Ing. Rainer E. Grünen
Adam Opel AG, Rüsselsheim

Dr.-Ing. Fabian Günzkofer
BMW Group

Dipl.-Ing. Magnus Helmbrecht
Technische Universität München

Dipl.-Psych. Moritz Körber
Technische Universität München

Dr.-Ing. Christian Lange
Ergoneers GmbH

Prof. Dr.rer.nat. Erhard Mayer
Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Valley/
Oberlaindern

Dr. Klaus Reinprecht
München

Dr.-Ing. Wolfram Remlinger
Audi AG, Ingolstadt

Dipl.-Psych. Nicole Trübswetter
Technische Universität München

Prof. Dr. Mark Vollrath
TU Braunschweig

Dipl.-Inf. Markus Zimmermann
Technische Universität München

Einführung

Heiner Bubb

1.1 Aktuelle Hauptentwicklungslinien des Automobils – 2

1.2 Kurzer historischer Überblick über die Fahrzeugentwicklung aus Nutzersicht – 8

1.2.1 Entwicklung der Fahrfunktionen – 8

1.2.2 Entwicklung des Cockpits – 13

1.3 Die Bedeutung der Ergonomie für die Automobilentwicklung – 16

1.3.1 Kurzer Abriss der Entwicklung der Ergonomie – 16

1.3.2 Ergonomie und Arbeitswissenschaft (Micro Ergonomics und Macro Ergonomics) – 17

1.3.3 Teilgebiet der Ergonomie – 17

1.3.4 Anwendungsgebiete der Ergonomie – 19

1.4 Hierarchie der Fahraufgabe – 20

1.4.1 Primäre Aufgabe – 20

1.4.2 Sekundäre Aufgaben – 22

1.4.3 Tertiäre Aufgaben – 23

1.5 Informationsflüsse im Verkehr – 24

Literatur – 25

H. Bubb et al., *Automobilergonomie,* ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-8348-2297-0_1, © Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

Die Erweiterung und Potenzierung der eigenen Beweglichkeit ist ein alter Menschheitstraum, wie er auch in vielen Sagen und Märchen zum Ausdruck kommt. Schon sehr früh hat sich der Mensch der fremden Kraft des Tieres bedient, um diesen Wunsch zu realisieren. Aber erst durch die technische Revolution ist es möglich geworden, Maschinen zu entwickeln, die diesen Traum in ungeahnter Weise Wirklichkeit werden ließen. Erkauft wird diese Realisierung durch einen deutlich erhöhten Energieumsatz gegenüber dem für das unmittelbare Leben notwendigen. Mit der Erfindung und Einführung der Eisenbahn war aber auch die Bündelung der individuellen Mobilitätsinteressen einhergegangen, die zum Teil auch vorher schon, allerdings nicht in dem nun möglich gewordenen Ausmaß, im organisierten Kutschdienst realisiert war. Alle Versuche, auf der Grundlage der vorhandenen (Dampf-) Technik die Erfüllung des Mobilitätsbedürfnisses zu individualisieren, waren ohne durchschlagenden Erfolg. Erst die Erfindung des Automobils brachte hier den Durchbruch. Wegen der hohen Energiedichte des Erdölderivats Benzin bzw. Dieselöl hat sich der Antrieb durch den bedientechnisch eher anspruchsvollen Verbrennungsmotor gegenüber dem deutlich einfacher zu handhabenden ursprünglich konkurrierenden Elektromotor durchgesetzt. Die verschiedenen Facetten, die mit dieser Art der unmittelbaren, sehr individuellen Beherrschung einer Maschine einhergehen, machen bis heute die Faszination des Automobils aus.

Der Siegeszug des Automobils über die Welt ist aber auch mit erheblichen Nachteilen verbunden, die heute Gegenstand intensiver wissenschaftlicher, wirtschaftlicher und politischer Auseinandersetzungen sind. Der Vorteil der hohen Energiedichte der fossilen Treibstoffe und dessen Verwendung im Automobil hat zur Folge, dass fast ein Viertel des gesamten anthrogen bedingten CO_2-Eintrags in die Atmosphäre durch den individuellen Verkehr zustande kommt. Besonders in den Ballungszentren moderner Megazentren erreicht die Belastung durch den Abgasausstoß teilweise ein unerträgliches Ausmaß mit erheblichen gesundheitlichen Konsequenzen. Die kaum kontrollierte Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug und die dabei erlebte Freiheit, aber auch grundsätzliche Defizite menschlichen Wahrnehmungs- und Reaktionsvermögens bedingen weltweit Tote und Verletzte, deren Zahl nur wenig hinter der durch Krankheit und andere Unfälle verursachten liegt. Die Attraktivität des Automobils sowohl für die Realisierung wirtschaftlicher als auch privater Bedürfnisse schafft aber auch Arbeitsplätze für deren Herstellung, Erhalt und Betrieb und ist damit ein ganz wesentlicher Faktor für die wirtschaftliche Prosperität einer Gesellschaft. Nicht zuletzt erweitern der automobile Güterverkehr, das automobile Versorgungs- und Rettungswesen sowie der automobile Ausflugsverkehr die Lebensqualität in erheblichem Maße, sodass ein Leben ohne Automobil – in welcher Ausprägungsform auch immer – kaum mehr vorstellbar scheint.

1.1 Aktuelle Hauptentwicklungslinien des Automobils

Unabhängig von allen politisch motivierten Einwänden wird die selbst bestimmte Beweglichkeit, die „Auto-Mobilität" ein wesentlicher Teil des modernen kulturellen Lebens sein. Auch bei geringer werdenden Energiereserven, die bisher diese Mobilität sicherstellten, ist die Fahrzeugindustrie daran interessiert, dieses grundlegende Bedürfnis zufriedenzustellen. In der Vergangenheit war dieser Wunsch nach Mobilität mit vielen Nachteilen verbunden, die vor allem in der öffentlichen Kritik immer wieder geäußert worden sind. Es ist das natürliche Interesse aller Fahrzeughersteller, diese Nachteile zu kompensieren und zugleich die Bedürfnisse der Verbraucher zu befriedigen. Es zeichnen sich folgende Forschungsfelder ab, welche die Existenz der Fahrzeugindustrie weiterhin garantieren sollen:

- CO_2-Reduktion
  Motoren mit besserem Wirkungsgrad reduzieren natürlich den Energieumsatz. Durch die maximal technisch beherrschbaren Verbrennungstemperaturen sind nach den grundlegenden physikalischen Regeln des Carnot'schen Kreisprozesses diesem Verbesserungspotenzial aber Grenzen gesetzt (eine praktische physikalische Grenze liegt bei ca. 45 %; der heute erreichten Wirkungsrad des Motors alleine, die Wirkungsgradverluste über die gesamte Antriebskette noch nicht mitge-

rechnet liegt bei 20–25 %). Nach Einschätzung der Motorenforscher ist auf diesem Gebiet noch viel zu gewinnen. Insbesondere der Kraftfluss zwischen Motor und Antriebsrädern, sowie der Gestaltung der Räder selbst bietet noch gewisse Verbesserungsmöglichkeiten. Durch Leichtbauweise kann prinzipiell der Energieumsatz reduziert werden, weil zum Beschleunigen und Verzögern der Fahrzeuge weniger Energie benötigt wird. Durch technische Maßnahmen (u. a. s. u.) kann die bisher beim Bremsen in Wärme verlorene Energie teilweise wieder gewonnen werden. Eine strömungstechnisch optimierte Gestaltung der Karosserie hilft den Energieaufwand zum Aufrechterhalten der erreichten Geschwindigkeit zu reduzieren.

- Elektromobilität

Eine große Hoffnung für die Aufrechterhaltung der individuellen Mobilität gerade in den von Abgasen extrem belasteten Ballungszentren stellt die Umstellung auf Elektrofahrzeuge dar. Wenn der für den Betrieb des Elektrofahrzeugs notwendige Strom aus „sauberen Kraftwerken" stammt, die keinen zusätzlichen CO_2-Eintrag in die Atmosphäre bewirken (also keine Kohle-und Gaskraftwerke), wäre dem Ziel einer umweltfreundlichen Mobilität näher zu kommen. Da Elektromotore gegenüber Verbrennungsmotoren mit einem deutlich höheren Wirkungsgrad (60–80 %) betrieben werden können und da sie im Gegensatz zum Verbrennungsmotor auch als Generator eingesetzt werden können (partielle Rekuperation der beim Bremsen vernichteten Bewegungsenergie), ist ihr unmittelbarer Energieverbrauch im Fahrzeug günstiger. Allerdings ist bei dieser Betrachtung die gesamte Wirkungsgradkette von der Primärenergie im Kraftwerk über die Stromverteilung in den Stromnetzen sowie der Stromspeicherung im Fahrzeug zu berücksichtigen, sodass sich bei einem Vergleich von Elektrofahrzeug mit Stromerzeugung durch fossile Energieträger mit einem Fahrzeug mit konventionellem Verbrennungsmotor kein Vorteil ergibt.

Die Durchsetzungsfähigkeit des Elektrofahrzeugs steht und fällt mit der Entwicklung der Batterietechnik. Die Energiedichte einer geladenen Batterie ist bei den heute verfügbaren Techniken nur ein Bruchteil (etwa ein Zehntel) der Energiedichte der aus fossilen Quellen stammenden Treibstoffe. Trotz des besseren Wirkungsgrades der Elektromotore und der partiellen Rückgewinnung der Bremsenergie ergeben sich dadurch signifikant kürzere Reichweiten von Elektrofahrzeugen (zurzeit im Bereich zwischen 80 und 200 km in Relation zu 450 bis 1000 km beim Verbrennungsmotor). Zudem erfordert der Ladevorgang der Batterie signifikant mehr Zeit als der Tankvorgang (Stunden in Relation zu wenigen Minuten). Zur Behebung dieses Dilemmas werden zurzeit verschiedene Möglichkeiten diskutiert, geprüft und erforscht (Schnellladung, Batterietausch, Batterietechnologien, die das mechanische Zuführen von Ladung ermöglichen), wobei keine dieser Lösungen vor einem ersichtlichen Durchbruch steht. In diesem Zusammenhang diskutierte Maßnahmen sind, die Standzeiten des Fahrzeugs beim Parken für das Laden zu nutzen. Eine attraktive Zukunftsversion ist dabei, die Batteriekapazität der parkenden Fahrzeuge zu nutzen, um dadurch dazu beizutragen, temporäre Überkapazitäten bei der regenerativen Stromgewinnung (insbesondere Windräder und thermische Solarkraftwerke) zu speichern. Diese Version kann allerdings erst dann einen deutlichen Effekt bewirken, wenn genügend Elektrofahrzeuge im Einsatz sind. Die für die Realisierung solcher Zukunftsvisionen notwendigen Infrastrukturen (z. B. Batterieladem öglichkeit an den Parkplätzen oder in Tiefgaragen) sind heute auch noch nicht im Ansatz vorhanden.

Ebenfalls schon lange Zeit wird die Brennstoffzellentechnologie diskutiert und erprobt. Diese ermöglicht, aus gekühlten hochverdichtetem mitgeführtem flüssigen Wassersoff in Verbindung mit dem Sauerstoff der Luft direkt Strom für den Betrieb des Elektromobils zu erzeugen. Der Einsatz der Brennstoffzelle würde also wegen der hohen Energiedichte des mitgeführten Wasserstoffs das Reichweitenproblem des Elektromobils lösen. Allerdings ist dafür die Infrastruktur einer Wasserstoffversor-

gung erst noch aufzubauen, die nicht auf der vorhandenen Infrastruktur der Versorgung durch flüssige Treibstoffe aufbauen kann. Es ist also abzuwarten, in welche Richtung sich die Entwicklung auf diesem Sektor bewegt.
Eine weitere bisher noch nicht zufriedenstellend gelöste Frage ist die Umweltverträglichkeit der Batteriebaustoffe bei deren Recycling, der Energieaufwand dafür sowie überhaupt für deren Neuerstellung. Auch auf diesem Gebiet ist über einen längeren Zeitraum mit neuen Ergebnissen aus der Materialforschung zu rechnen.
Zurzeit und wohl noch über eine längere Periode wird versucht, die Vorteile des Elektromotors (Rekuperationsmöglichkeit, Bereitstellung eines nahezu drehzahlunabhängig hohen Drehmoments) mit den Vorteilen des Verbrennungsmotors (durch die hohe Energiedichte der fossilen Brennstoffe bedingte große Reichweite) durch sog. Hybridkonzepte zu verbinden. Es sind verschiedene Hybridkonzepte im Einsatz, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll. Die heute bekannten Konzepte werden alle durch den Einsatz von informationsverarbeitender Technologie so geregelt, dass sich für den Nutzer praktisch kein besonderes neuartiges Bedienverhalten ergibt. Ein Vorteil der Hybridtechnologie ist folglich, dass sich kaum Umstellungsprobleme für den Nutzer ergeben, auch deswegen, weil die vorhandene Infrastruktur genutzt werden kann. Allerdings ist bei der gegenwärtigen weiteren Nutzung der fossilen Brennstoffe dieses Konzept keineswegs klimaneutral und umweltschonend.

- Sicherheit
  Traditionell unterscheidet man in der Fahrzeugtechnik zwischen aktiver und passiver Sicherheit. Unter letzterer versteht man alle Maßnahmen durch die die Folgen eines Unfalls verringert werden sollen. Unter aktiver Sicherheit versteht man alle Maßnahmen die das Eintreten eines Unfalls unwahrscheinlich machen sollen.
  - *Passive Sicherheit*
    Wenn die mit der Geschwindigkeit verbundene Eigenenergie der Fahrzeuginsassen bei einem nicht vorgesehenen Betriebsablauf (Unfall) innerhalb von kürzesten Wegen abgebaut werden muss, entstehen für die Passagiere Kräfte und Energien, die von ihrem Körper nicht schädigungslos ertragen werden können. Insofern besteht theoretisch ein unmittelbarer, sogar quadratischer Zusammenhang zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit und Unfallschwere. Im Einzelfall sind die Bewegungsabläufe in Abhängigkeit von der jeweiligen Unfallsituation allerdings so unterschiedlich und komplex, dass eine exakte Vorhersage von Unfallfolgen unmöglich erscheint. Dennoch hat die Unfallforschung Kategorisierungen von typischen Unfallhergängen ermöglicht, die selbst wieder Anlass für entsprechende technische Maßnahmen zur Verringerung von Unfallfolgen bewirkten. So ist es heute eine Selbstverständlichkeit, dass Fahrzeuge mittels der sog. Knautschzone quasi einen inneren Bremsweg bereitstellen, der durch den Einsatz des Sicherheitsgurts dem Passagier zugutekommt. Ergänzt wird dieser Schutzmechanismus durch den Airbag, der weitere Restenergien aufzufangen vermag und zusätzlich auch bei sonst nur schwer zu beherrschenden Bewegungsabläufen (z. B. Überschlag, Crash mit Querverkehr) eine gewisse Schutzwirkung entfaltet. Der Erfolg dieser Maßnahmen zeigt sich ganz eindeutig in der Unfallstatistik (◘ Abb. 1.1). Trotz erheblichem Anstieg des Fahrzeugbestandes ist die Zahl der tödlich verlaufenden Unfälle stetig gesunken. Es ist allerdings auch zu vermerken, dass die Zahl der Unfälle mit Verletzten praktisch gleich bleibt, obwohl auch dies in Verbindung mit dem gewachsenen Fahrzeugbestand und der damit einhergehenden Erhöhung der Verkehrsdichte als ein auf die Maßnahmen der passiven Sicherheit zurückzuführender Fortschritt zu werten ist.
    Die Maßnahmen zur passiven Sicherheit sind allerdings für den Nutzer auch mit Nachteilen verbunden. Durch die geforderte steife Karosseriestruktur, die auch Sicherheit bei Überschlägen bereitstellen soll, wurden besonders dicke Fenstersäulen

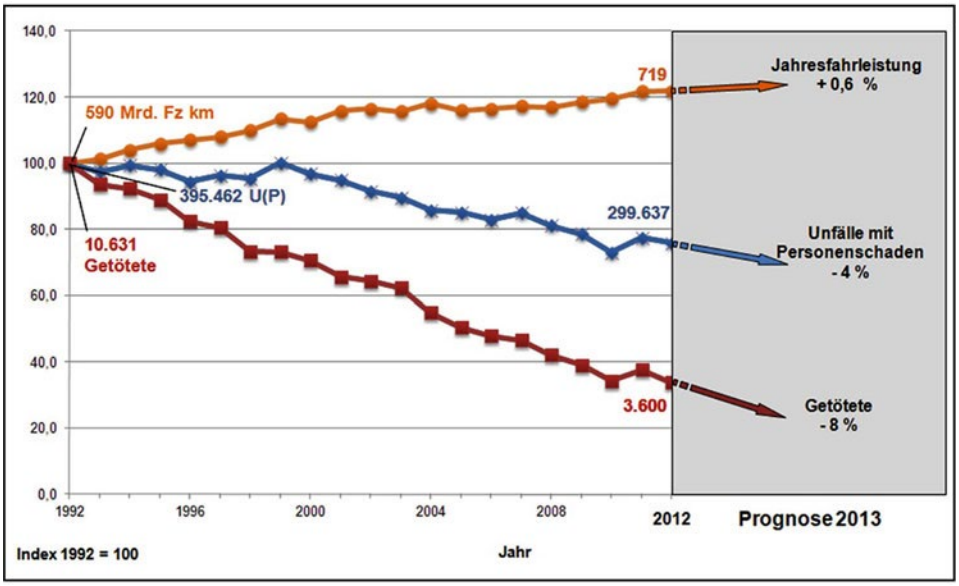


Abb. 1.1 Entwicklung der Unfallstatistik (Lerner et al., 2013)

notwendig. Die Fenster selbst wurden bei hochgezogener Gürtellinie kleiner und damit wurden die Fahrzeuge für die Situationen des normalen Gebrauchs unübersichtlicher. Die die Folgen von Heckcrashs vermindernden Kopfstützen tragen zu dieser Unübersichtlichkeit signifikant bei. Das Dilemma zwischen dem Anspruch an geringe Einschränkung unter normalen Betriebsbedingung und dem permanent vorzuhaltende Schutzwirkung der passiven Sicherheit wird an der Tatsache besonders deutlich, dass das Anlegen des Sicherheitsgurtes erst durch massive Strafandrohung zu der heute beobachteten hohen Nutzungsrate führte. In Länder, in denen das nicht geschieht oder wo die Überwachung weniger konsequent ist, ist das Tragen des Sicherheitsgurtes auch deutlich seltener.

Aktive Sicherheit

Der Gedanke der aktiven Sicherheit kam in den 50er Jahren etwa zur gleichen Zeit wie der der passiven Sicherheit auf. Man verstand darunter zuerst das Entwickeln immer besserer Bremssysteme, die im Laufe des Fortschritts auch beachtliche Verkürzungen der Bremswege sicherstellten[1]. Damit in Verbindung steht die Entwicklung von Reifen, die durch die systematische Erforschung des Kontaktes Rad-Straße auch unter ungünstigen Bedingungen wie Nässe und Kälte bedeutende Verbesserungen erbrachten[2]. Fahrwerke, die durch immer ausgeklügeltere Kinematiken auch in einer kritischen Situation noch ein Ausweichmanöver möglich machen, sind ein weiterer Beitrag zu dieser

1 Erinnert sei in diesem Zusammenhang an die sukzessive Substitution der immer zum ungleichmäßigen Bremsen neigenden Trommelbremse durch die Scheibenbremsen, die allerdings einen Bremskraftverstärker unabdingbar machten.

2 In diesem Zusammenhang sei auf den Übergang von den zwar komfortableren Radialreifen zu den Gürtelreifen, die durch ihren Aufbau eine bessere Haftung bei höheren Querkräften bereitstellten, hingewiesen. Außerdem wurde das Design der Laufflächen immer mehr nach wissenschaftlichen Methoden gestaltet. Folge davon waren u. a. tiefere und breitere sog. Drainagekanäle, durch die bei Nässe das Wasser besser verdrängt werden kann, sodass in der Kontaktfläche auch bei höheren Geschwindigkeiten „trockener" Kontakt gewährleistet werden kann. Unterschiedlich weiche Gummimischungen sorgen abgestimmt auf die Außentemperatur für bessere Haftbedingungen. Die Nutzung von Sommer- und Winterreifen wurde dadurch quasi obligatorisch.

quasi traditionellen d. h. durch Mechanik bereitgestellten aktiven Sicherheit.
Mit dem Einzug der Elektronik in das Fahrzeug kamen weitere Möglichkeiten hinzu. Erwähnt sei das ABS-System, das ein Blockieren der Räder bei Vollbremsung verhindert und somit das Fahrzeug auch bei einer Notbremsung noch manövrierfähig hält. Eine bedeutende Weiterentwicklung ist ESP, welches durch gezielten einseitigen Bremseingriff ein Fahrzeug, das zu schleudern droht – gemessen durch Gierwinkel- und Beschleunigungssensoren – wieder auf den durch das Lenkrad vorgegebenen Kurs bringt. Bei alledem ist deutlich zu machen, dass alle bisher genannten Maßnahmen der aktiven Sicherheit natürlich die durch die physikalischen Gegebenheiten gesetzten Grenzen nicht zu überwinden vermögen. Diese müssten durch den Fahrer im Vorfeld der kritischen Situation durch die Wahl einer entsprechenden Geschwindigkeit sowie des korrekten Abstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug berücksichtigt werden.
Die jüngsten Entwicklungen, wie ACC (Adaptive Cruise Control) bzw. Distronic halten automatisch einen sicheren Abstand – gemessen durch Radarsensoren – zum vorausfahrenden Fahrzeug. Diese Systeme sind heute soweit ausgereift, dass sie als Notbremsassistent, das Fahrzeug automatisch vor einem Crash oder zumindest vor den schlimmen Folgen eines solchen Crashs schützen können. Spurführungsassistenten erkennen, wenn der Fahrer die Fahrbahn zu verlassen droht und warnen ihn durch Vibration des Sitzes bzw. des Lenkrads. Manche Systeme können das Fahrzeug auch automatisch wieder auf die Fahrspur zurückführen. Müdigkeitswarner überwachen die Aufmerksamkeit des Fahrers und fordern ihn ggf. zu einer Pause auf.
Das zuletzt genannte System weist schon daraufhin, dass der Hauptanteil zur Gewährleistung aktiver Sicherheit beim Fahrer selbst liegt. Es kommt also nicht von ungefähr, dass man schon mit dem Beginn des motorisierten Verkehrs durch Einführung des Führerscheins und der damit verbundenen Unterweisung zum „sicherheitsbewussten" Fahren sowie durch eine Vielzahl von Kampagnen bis hin zu Strafmaßnahmen bei festgestellten groben Fehlverhalten auf das Verhalten des Fahrers Einfluss nehmen will.
Nicht unterschätzt werden darf in diesem Zusammenhang, dass das Aufwachsen in einer Welt des motorisierten Verkehrs im Verbund mit den genannten Maßnahmen ein individuell verwurzeltes verkehrsspezifisches Weltbild bewirkt, das ein angepasstes Verhalten induziert. Dies zeigt ein Bild, das vor vielen Jahren von der BASt[3] veröffentlicht worden ist (◘ Abb. 1.2). Dem Bild ist zu entnehmen: Je größer die individuelle Erfahrung mit dem Straßenverkehr ist (ausgedrückt durch die Zahl der Pkw/10^3 Einwohner) desto geringer ist die individuelle Gefahr, im Straßenverkehr getötet zu werden (ausgedrückt in Getötete/10^8 Fahrzeugkilometer). Davon unbenommen bleibt natürlich, dass die absolute Zahl von Getöteten im Straßenverkehr bei angenommener konstanter Unfallwahrscheinlichkeit pro Fahrzeug (was natürlich so nicht stimmt, siehe ◘ Abb. 1.1) umso größer ist, je mehr Fahrzeuge in einer Population existieren. Nur bezogene Zahlen machen eine vernünftige Aussage über das Unfallgeschehen.
Die über die Jahre konstante Anzahl von Verletzten im Straßenverkehr (◘ Abb. 1.1), unter denen ein hoher Anteil von Fußgängern ist, bei gleichzeitiger Abnahme der Getöteten weist auch darauf hin, dass die Möglichkeiten der passiven Sicherheit begrenzt sind. Heute ist es unumstritten, dass mit den Mitteln der Elektronik und der damit ermöglichten technischen Intelligenz Maßnahmen der aktiven Sicherheit geschaffen werden können, die Unfälle weitgehend verhindern. Gerade in Verbindung mit den Erfordernissen der CO_2-Reduktion und der

3 BASt: Bundesanstalt für Straßenwesen: Technisch-wissenschaftliches Forschungsinstitut des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung mit Sitz in Bergisch Gladbach.

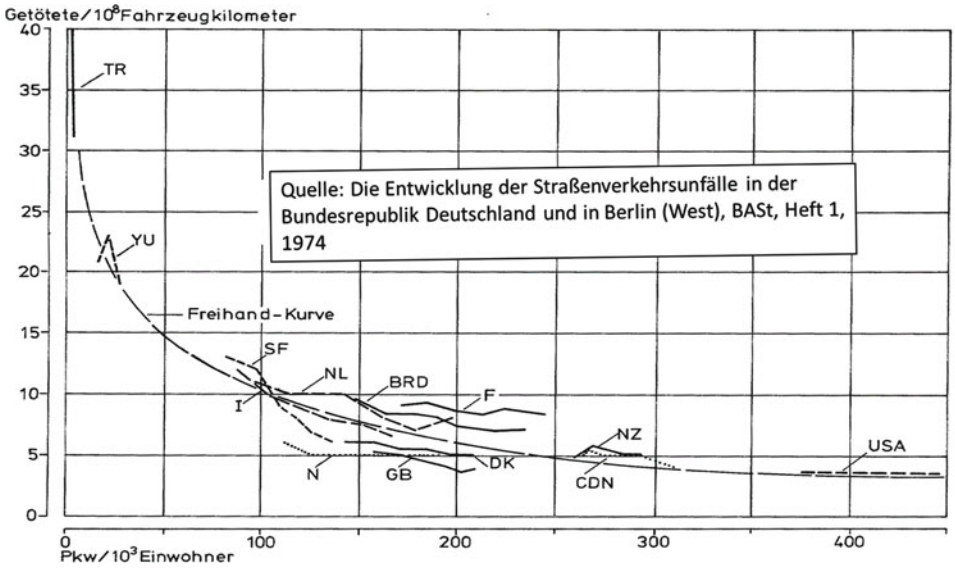


Abb. 1.2 Auf die zurückgelegte Strecke bezogenen im Straßenverkehr Getöteten pro Einwohnerzahl.

Elektromobilität stellt die Gewichtsreduktion der Fahrzeuge eine herausragende Maßnahme dar. Gelänge es, einen Großteil der gewichtigen Technik für die passive Sicherheit durch Systeme der aktiven Sicherheit zu kompensieren, so könnte man mehrere Ziele zugleich erreichen: Jeder Unfall, der nicht geschieht, ist besser als einer der glimpflich verläuft. Nicht geschehene Unfälle fördern zudem den Verkehrsfluss, was nicht nur weitere Folgeunfälle verhindert, sondern auch der Ersparnis des Treibstoffkonsums dient. Technische Maßnahmen der aktiven Sicherheit greifen aber notwendigerweise in die Interaktion Fahrer-Fahrzeug in dem Sinn ein, dass dem Fahrer bestimmte Manöver, die er in der freien Ausübung seines Willens durchführen möchte und die ihm teilweise Spaß machen, verwehrt werden (z. B.: Querdrift wird durch ESP, dichter Abstand, der das Einscheren eines langsameren Fahrzeugs unmöglich macht, wird durch ACC und „sportliches" Kurvenschneiden wird durch den Spurführungsassistenten verhindert). Es ist eine Herausforderung für die zukünftige Entwicklung, die Bedienung und die Wirkung solcher, die Sicherheit fördernder Systeme so zu gestalten, dass der Nutzen dem Fahrer jederzeit offensichtlich wird und zugleich womöglich gerade im Umgang mit dem entsprechenden System ein gewisser „joy of use" entsteht.

- Komfort

  Viele Menschen verbringen heute mehrere Stunden des Tages im Kraftfahrzeug. Der Komfort ist deshalb auch in den unteren und mittleren Fahrzeugklassen zu einem verkaufsentscheidenden Argument geworden. Im Fahrzeug wird zumindest dem Fahrer allein durch die Fahraufgabe eine bewegungsarme Haltung aufgezwungen. Viele Fahrer klagen deshalb über „unbequeme Sitze", die ihnen Rückenschmerzen verursachen würden. Durch eine konsequente Gestaltung der sog. anthropometrischen (d. h. an die individuellen körperlichen Maße und Kräfte angepassten) Bedingungen, die von der Körperhaltung bis zum Kontakt mit dem Sitz reicht, kann für eine komfortable Situation gesorgt werden. Aber nicht nur die Sitzhaltung trägt zum Komfort bei, sondern ganz entscheidend die klimatischen Bedingungen im Fahrzeug ebenso wie der Einfluss durch Motor-, Wind- und Fahrwerksgeräusche. Neben dem Sicherheitsaspekt bei Nachtfahrten ist gutes Licht auch ein Komfortmerkmal, was heute dazu führt, dass man im Innen-

raum sogar eine sog. „Ambientebeleuchtung“ einführt, die den unangenehmen Eindruck, bei Nachtfahrt in einer dunklen Höhle zu sitzen, entgegen wirkt, ohne die Sicht nach draußen zu beeinträchtigen. Eine gute Fahrzeugfederung trägt zum Fahrkomfort erheblich bei, wobei man heute unter Nutzung der Möglichkeiten der Mikroelektronik mehr oder weniger aufwendige aktive Fahrwerke entwickelt, die einen immer besseren Kompromiss zwischen dem Anspruch nach geringerer Beeinträchtigung durch schlechte Straßen und einem guten Fahrbahnkontakt, der für das sichere Lenken eines Fahrzeuges entscheidend ist, ermöglichen.

Neben diesen quasi klassischen Komfortbereichen spielt zunehmend der sog. Bedienkomfort eine große Rolle. Durch ihn soll ein problemloses und jederzeit zielführendes Bedienen der verschiedenen Fahrzeugfunktionen gewährleistet werden. Der Bedienkomfort steht teilweise in engem Zusammenhang mit den verschiedenen Entertainmentfunktionen, die im Fahrzeug Einzug gehalten haben. Aber nicht nur das Bedienen, sondern auch die Art der Unterhaltung ist Gegenstand großer Anstrengungen zur Komfortsteigerung: so ist heute das Akustikdesign von Lautsprechersystemen in Fahrzeug zu einem bedeutenden Wirtschaftszweig geworden.

Die genannten vier Bereiche zukünftiger Fahrzeugentwicklung sind alle eng mit der Ausrichtung an dem Nutzer verbunden. Es ist deshalb nur konsequent, dass in den vergangenen Jahrzehnten der Bereich, der sich professionell mit der Interaktion Mensch und Maschine auseinandersetzt, nämlich die Ergonomie in der Fahrzeugentwicklung immer mehr Bedeutung erlangt hat. In der folgenden kurzen Übersicht soll gezeigt werden, dass diese Ausrichtung am Nutzer von Anfang an treibende Kraft für die Fahrzeugentwicklung war. Allerdings wurde diese Entwicklung, was die Interaktion mit dem Nutzer anlangt, mehr oder weniger intuitiv aus der Sicht des Technikers vorangetrieben.

1.2 Kurzer historischer Überblick über die Fahrzeugentwicklung aus Nutzersicht

1.2.1 Entwicklung der Fahrfunktionen

In der ersten Konsolidierungsphase nach der Erfindung des benzingetriebenen Autos wurden in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts stufenweise verschiedene Funktionen des Motors automatisiert[4]. Bekannt ist beispielsweise die automatische mechanische Zündzeitpunktverstellung mittels Fliehgewichten oder Unterdruck, die zuvor manuell mit einem am Lenkrad montierten Hebel gefühlvoll und nach Gehör während der Fahrt eingestellt werden musste (siehe ◘ Abb. 1.3). Das lästige Ziehen des „Choke“ beim Kaltstart des Motors wurde durch die Einführung einer Bimetallfeder überflüssig, die entsprechend dem Temperaturniveau des Kühlmediums (Luft oder Wasser) die Starterklappe im Vergaser mehr oder weniger schloss. Viele weitere mechanische und elektro-mechanische Lösungen (z. B. die automatische Rückstellung der Fahrtrichtungsanzeige oder des Scheibenwischers) ermöglichten es dem Fahrer, seine Aufmerksamkeit weniger der Bedienung des Fahrzeugs, sondern mehr dem Verkehrsgeschehen zu widmen.

Die zunehmende Verkehrsdichte war und ist die treibende Kraft für weitere technische Entwicklungen, welche die Nutzung des Autos vereinfachen und immer bequemer machen sollten. In den 30er Jahren wurde das automatische Getriebe erfunden und während der 50er Jahre in den Autos der USA weitgehend eingeführt. Im Zusammenhang mit einer steigenden Verkehrsdichte in Europa, besonders in Deutschland, wurde auch hier in den 80er

4 Erwähnenswert in diesem Zusammenhang ist die Ventilsteuerung der frühesten Dampfmaschinen, die „von Hand“ erfolgte. Erst die bahnbrechende Erfindung von James Watt (der oft anstatt Thomas Newcomen fälschlicherweise als Erfinder der Dampfmaschine bezeichnet wird), durch die ein automatisches drehzahlabhängiges Öffnen und Schließen der Dampf- und Wasserventile ermöglicht wurde, verhalf der Dampfmaschine zu ihrem Durchbruch. Um ein „Durchgehen“ der Maschine ohne Last zu verhindern, wurde von James Watt u. a. ein fliehkraftgesteuerter Drehzahlbegrenzer genutzt.

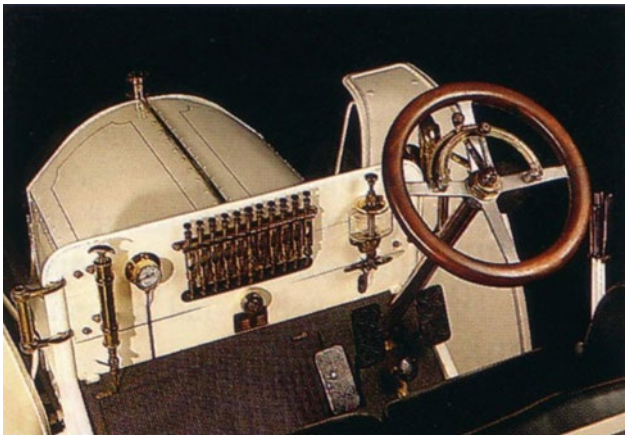


Abb. 1.3 Mercedes Simplex: Am Lenkrad ist die der Hebel zur Zündzeitpunkt Verstellung zu sehen, daneben am Armaturenbrett, die Tupfer zur Versorgung der Schmierstellen des Fahrzeugs

und 90er Jahren das automatische Getriebe immer mehr bevorzugt. Eine Geschwindigkeitsregelanlage (Tempomat) wurde in Automobilen erstmals 1958 als „Cruise Control" bei Chrysler eingesetzt, in Europa 1962 bei Mercedes-Benz. In den „autobahnfesten" Fahrzeugen der Vorkriegszeit gab es noch ein Standgas, das das Fahren mit gleichbleibender Geschwindigkeit auf den (noch) leeren neuen Autobahnen erleichtern sollte.

Der wirtschaftliche Aufschwung nach dem 2. Weltkrieg sowie der Anspruch der Kunden nach größeren und bequemen Reiselimousinen führten zu einer Zunahme der Fahrzeuggewichte, die eine Unterstützung von Bedienfunktionen (Bremsen und Lenken) erforderlich machten. Deshalb wurden in den 60er und 70er Jahren für verschiedene Interaktionsfunktionen technische Servosysteme eingeführt. Der Bremskraftverstärker nutzt den Unterdruck im Ansaugrohr, wobei der atmosphärische Druck auf einer großflächigen Membran den Pedaldruck verstärkt. Bei der Servolenkung, die bereits 1952 in Serie produziert wurde, sorgt eine vom Motor angetriebene Hydraulikpumpe zur Verringerung der Lenkmomente, speziell bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten und beim Einparken. Diese Servosysteme erhöhten nicht nur den Fahrkomfort, sondern auch die aktive Sicherheit durch verkürzte Reaktionszeiten. Mit dieser Entwicklung wurde aber auch das Ende des mit mechanisch-hydraulischen Unterstützungssystemen Machbaren erreicht. Heute wird die hydraulisch wirkende Servolenkung sukzessive durch elektrische Servosysteme ersetzt. Der Vorteil davon ist, dass Energie nur dann verbraucht wird, wenn das System genutzt wird, also bei Einlenken, aber nicht bei nahezu keiner Lenkbewegung erforderlicher Geradeausfahrt.

Die weiteren Neuerungen im Automobilbereich kommen ohne elektronische Zusatzeinrichtungen nicht aus. 1978 wurde das Antiblockiersystem (ABS) von Bosch auf den Markt gebracht; gleichzeitig wurde der Begriff „ABS" von Bosch rechtlich geschützt[5]. Zunächst war das ABS für die S-Klasse von Mercedes-Benz, dann für den BMW 7er verfügbar. Seit 1984 gehört ABS bei Mercedes-Benz Pkws zur Serienausstattung. Ende 2003 waren etwa 90 Prozent der zugelassenen Neufahrzeuge in Deutschland mit ABS ausgestattet. Das ABS baut auf der physikalischen Erkenntnis auf, dass die maximale Bremsverzögerung kurz vor dem Blockieren der Räder erreicht wird, wenn also die Reifen gerade eben noch auf der Fahrbahn haften. Wenn die Haftreibungsgrenze durch eine zu hohe Bremskraft überschritten wird, gleiten die blockierten Räder auf der Fahrbahn (100 Prozent Schlupf), wobei die Gleitreibung typischerweise um 15 bis 20 Prozent unter der Haftreibung liegt. Beim Blockieren der Räder ist das Fahrzeug kaum noch steuerbar, und normale Fahrer reagieren in dieser Situation selten

5 Bereits 1936 gab es von Bosch ein Patent auf eine „Vorrichtung zum Verhüten des Festbremsens der Räder eines Kraftfahrzeuges". Die Geräte bestanden aus etwa 1000 analogen Bauteilen und waren noch sehr unhandlich und langsam. Durch die Digitaltechnik konnte die Menge der Bauteile auf etwa 140 Stück reduziert werden. Damit war ABS serienreif.

richtig (richtig wäre, die Bremskraft unverzüglich zu reduzieren, bis die Räder wieder mitdrehen; aus diesem Grund wurde früher die sog. Stotterbremse empfohlen). Die maximale Bremsleistung wird bei 50 Prozent Schlupf erzielt. Aufgrund der Trägheit im Bremssystem pendelt sich bei der ABS-Regelung, die als Pulsieren des Bremspedals spürbar ist, ein Wechsel zwischen 20 und 35 Prozent Schlupf ein. Das Fahrzeug bleibt beim Bremsen am besten steuerbar, wenn das ABS die Bremskraft an jedem Rad so reguliert, dass der Schlupf während des Bremsvorganges jederzeit möglichst innerhalb dieser Regelgrenzen liegt. Beim heute üblichen 4-Kanal-ABS befindet sich an jedem der vier Räder ein induktiver Sensor, der die Drehzahl des Rades misst. Die Sensorsignale werden an ein elektronisches Steuergerät weitergeleitet, das pro Rad zwei schnell wirkende Elektromagnetventile schließt bzw. öffnet, wenn ein zu starker Drehzahlabfall gegenüber den anderen Rädern registriert wird. Auf diese Weise wird der optimale hydraulische Druck je Radbremszylinder geregelt. Nur durch schnelle elektronische Schaltkreise werden beim Pkw ca. 10 Regelvorgänge pro Sekunde[6] und im Allgemeinen keine längeren Bremswege erzielt als bei einer Vollbremsung durch einen geübten Fahrer ohne ABS.

Ein weiterer folgerichtiger Schritt war die Einführung der Antriebsschlupfregelung (ASR oder ASC bei BMW), die beim Beschleunigen des Fahrzeugs ein Durchdrehen der angetriebenen Räder verhindert. Zu hoher Schlupf beim Durchdrehen der Antriebsräder bedeutet Verlust an Antriebsmoment und Seitenführungskraft, was zum Wegrutschen des Fahrzeugs führen kann. Die einfachste technische Realisierung des ASR erfolgt durch Bremseneingriff, wobei das ABS das durchdrehende Rad abbremst und das andere Rad an Antriebsmoment gewinnt. Aufwändigere ASR-Systeme greifen, meist in Verbindung mit einem Elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP) in das Motormanagement ein. Dies ist nur möglich, wenn keine mechanische Verbindung mehr vom Gaspedal zur Drosselklappe (Ottomotor) bzw. Einspritzpumpe (Dieselmotor) besteht. Die Aufgabe der Leistungsreduzierung übernimmt dann ein „elektronisches Gaspedal", das den Fahrerwunsch durch einen Sensor in ein elektrisches Signal umwandelt. Aus diesem digitalisierten Fahrerwunsch und anderen Variablen verstellt die Motorsteuerung über Elektromotore die Drosselklappe und die Einspritzanlage, wobei ASR Befehle vorrangig vor dem Fahrerwunsch behandelt werden, was zu einer Verringerung überschüssigen Antriebsmoments führt. Die Regelung von ASR wird dem Fahrer durch eine blinkende Leuchte im Armaturenbrett angezeigt, sodass er erkennt, dass er sich nun auf schlüpfrigem Untergrund befindet. Auch dies ist folglich ein Beitrag für die aktive Sicherheit.

ASR ist die Basis für die weiter entwickelten ESP-Systeme (Elektronic Stabilization Program), welche über eine zusätzliche Sensorik und einen bremsenden Eingriff an den nicht angetriebenen Rädern zur Fahrstabilisierung beitragen. Vorreiter bei der Entwicklung des Systems waren die Firmen Bosch und Mercedes-Benz (ESP ist ein Warenzeichen für die Robert Bosch GmbH, weshalb bei verschiedenen Firmen andere Bezeichnungen auftauchen, wie z. B. DSC bei BMW, PSM bei Porsche). ESP wurde 1995 eingeführt. Bei der damals neu auf den Markt gebrachten Mercedes-Benz A-Klasse führte der misslungene[7] „Elchtest" zur serienmäßigen Einführung des ESP ab 1997, um das Fahrzeugverhalten zu verbessern[8]. Das ESP-System soll durch gezieltes Bremsen einzelner Räder ein

6 Ein System mit höherer Regelfrequenz könnte die Wirkung erheblich verbessern. Das kann beispielsweise durch eine vollelektrische Bremse erreicht werden, bei der die Pedalkraft als elektrisches Signal an das Steuergerät übertragen wird, das nach Auswertung aller Sensorsignale die Bremskraft dosiert.

7 Der Automobiljournalist Robert Collin von der schwedischen Zeitung Aftonbladet hatte im Oktober 1997 die neu vorgestellte Mercedes-Benz A-Klasse durch dieses Fahrmanöver zum Umkippen gebracht und damit ein großes Medienecho verursacht.

8 Bei diesem Fahrdynamiktest wird mit hoher Geschwindigkeit ungebremst ein Spurwechsel nach links und nach einer kurzen Geradeausstrecke ein Spurwechsel nach rechts gefahren. Das Fahrzeug sollte dabei weder ausbrechen noch seitlich umkippen. Durch diesen Test soll das Ausweichen vor einem plötzlich auf die Straße tretenden Elch simuliert werden, ein in Skandinavien durchaus realistisches Szenario. Der Elchtest ist inzwischen ein genormtes Fahrmanöver und Bestandteil der Erprobung der Fahreigenschaften neuer Fahrzeuge. Die Beschreibung des Tests erfolgte durch den VDA unter der Bezeichnung „VDA-Spurwechseltest" und wurde dann in die internationale Norm ISO 3888-2 übernommen.

Schleudern des Fahrzeugs im Grenzbereich verhindern und dem Fahrer so die Kontrolle über das Fahrzeug in kritischen Situationen ermöglichen. Neben einer zusätzlichen Sensorik ist für das ESP die Trennung aller Radbremskreise erforderlich, damit jedes Rad einzeln abgebremst werden kann. Das System vergleicht permanent (bis zu 150 Mal pro Sekunde) den Fahrerwunsch mit dem Fahrzustand. Der Lenkwinkelsensor liefert in Verbindung mit der Gaspedalstellung und dem Bremsdruck den Fahrerwunsch für die Fahrtrichtung. Der Dynamikrechner berechnet aus diesen Größen den vom Fahrzeug zu durchfahrenden Soll-Bogen. Das Motormanagement, die ABS-Drehzahlsensoren, der Gierraten- und Querbeschleunigungssensor liefern die Signale zur Interpretation des Fahrzeugverhaltens (Ist-Bogen). Wenn eine wesentliche Abweichung des berechneten Fahrzustandes vom Fahrerwunsch festgestellt wird, greift das System ein. Ein Übersteuern wird durch Abbremsen des kurvenäußeren Vorderrades, ein Untersteuern hingegen durch Abbremsung des kurveninneren Hinterrades korrigiert. Einseitige Bremseingriffe an der Vorderachse können am Lenkrad spürbar werden, was zu einer Komfortminderung führt. Deshalb lassen manche Hersteller die Vorderachse erst eingreifen, wenn die Korrektur an der Hinterachse sich als nicht wirksam genug erweist. Zusätzlich greift ESP in das Motormanagement ein und drosselt die Motorleistung, um die Fahrzeuggeschwindigkeit zu verringern. Auch dieser Eingriff wird von manchem Fahrer als bevormundend kritisiert.

Das ESP kann mit weiteren Zusatzfunktionen ausgestattet sein: Der Bremsassistent (BAS) erkennt an einem besonders schnell ansteigenden Bremsdruck, dass der Fahrer eine Vollbremsung machen möchte und löst diese aus. Nimmt der Fahrer die Pedalkraft wieder zurück, schaltet es ab. Beim Anfahrassistent hält die Bremse ab einem bestimmten Neigungswinkel des Fahrzeugs trotz „Fuß vom Bremspedal“ noch kurze Zeit fest, um ein Anfahren ohne Zurückrollen zu ermöglichen. Auch dieser Eingriff stellt eine erhebliche Bedienerleichterung dar, da das lästige korrekte Kombinieren von Handbremsbetätigung, Kupplung und Gaspedal beim „Anfahren am Berg“ bei einem handgeschalteten Fahrzeug weitgehend entfällt.

Als Ergänzung zum ESP stellte BMW ein innovatives Lenksystem vor – die Aktivlenkung. Sie arbeitet als Überlagerungslenkung mit einem in die geteilte Lenksäule integrierten Planetengetriebe. In dieses Planetengetriebe greift ein Elektromotor über ein selbst hemmendes Schraubradgetriebe ein und erzeugt entsprechend der Fahrsituation einen zusätzlichen oder reduzierten Lenkwinkel der Vorderräder. Als weitere Komponente übernimmt eine regelbare Servolenkung die Kontrolle des Lenkradmoments. Mit diesen beiden Komponenten können der Lenkeinschlag der Vorderräder und das Lenkradmoment der jeweiligen Fahrsituation angepasst werden. In kritischen Situationen, z. B. bei abrupten Ausweichmanövern, kann das System den vom Fahrer vorgegebenen Lenkeinschlag der Räder gezielt verändern und das Fahrzeug z. B. durch Gegenlenken schneller als der Fahrer stabilisieren, was zu weniger merklichen Eingriffen des ESP führt.

Die bisher genannten Systeme greifen ein, wenn der Fahrer bestimmte physikalische Grenzen der Fahrphysik erreicht hat. Die weiteren Entwicklungen greifen schon vor dem Erreichen solcher Extremsituationen ein und stellen somit einen neuen Beitrag zur Unfallvermeidung dar.

Eine funktionale Weiterentwicklung der Geschwindigkeitsregelanlage (Tempomat) stellt das ACC-System dar (Adaptive Cruise Control bedeutet wörtlich übersetzt „*Anpassende* Geschwindigkeitsregelung“). Bei diesen Systemen, die seit dem Jahre 2000 auf dem europäischen und nordamerikanischen Markt zum Einsatz kommen, wird die Position und die Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs mit einem Radar- oder einem Lidar[9]-basierten Sensor erfasst und die Geschwindigkeit sowie der Abstand entsprechend adaptiv mit Motor- und Bremseingriff geregelt. Die am

9 Lidar steht für „Light detection and ranging“ und arbeitet mit Laserpulsen, wobei das von Objekten zurück gestreute Licht detektiert wird. Aus der Laufzeit der Signale und der Lichtgeschwindigkeit wird die Entfernung zum Ort der Lichtstreuung berechnet. Lidar-Systeme haben momentan noch zu hohe Störungen bei Sicht einschränkenden Wetterlagen. Ihr Vorteil ist jedoch der preisliche Unterschied zu den Radar-Systemen, da diese nur ca. 1/3 der Radar-Systeme kosten. Sie werden bei Fahrzeugen der unteren und mittleren Preisklasse eingesetzt, erlauben dort allerdings eine Regelung nur bis zu Geschwindigkeit von 140 km/h.

Markt befindlichen Systeme arbeiten mit drei bis vier Radarkeulen, die bei einem Fahrwinkel von 4° bis 8° etwa 150 m voraus messen[10]. Da mit dem ACC-System der vom Fahrer vorgegebene Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug konstant gehalten wird und beim Beschleunigen des vorausfahrenden Fahrzeugs das eigene Fahrzeug ebenfalls auf die dem Fahrerwunsch entsprechende Geschwindigkeit beschleunigt, ist quasi der erste Schritt zum „automatischen Fahren" getan. Die adaptive Geschwindigkeitsregelung soll zu einer Entlastung und zum Komfortgewinn des Fahrers, vor allem auf langen Autobahnfahrten beitragen, da ihm das ständige Kontrollieren der Geschwindigkeit (Geschwindigkeitsbegrenzungen!), Gas geben und Bremsen vom System abgenommen wird.

Durch zusätzliche Radarsensoren für den Nahbereich ist es mit den weiterentwickelten ACC-Systemen möglich (ACCplus bei Audi, Distronic Plus bei Mercedes-Benz), das Fahrzeug bis zum Stillstand abzubremsen, um es dann wieder auf die vom Fahrer vorgegebene Geschwindigkeit zu beschleunigen. Dieser „Stauassistent" führt damit zu einer weiteren Entlastung des Fahrers im Stop-and-Go Verkehr.

Zeitlich parallel laufende Entwicklungen unterstützen die Querregelung (Lenkfunktion) des Fahrzeugs. Der Spurhalteassistent warnt den Fahrer vor dem Verlassen der Fahrspur auf der Straße. Hierbei sind unterschiedliche optische Systeme im Einsatz, die der zugehörigen Elektronik mit Software die Position des Fahrzeugs in der Fahrspur mitteilen. Die Fahrspurerkennung wird häufig durch ein Kamerasystem (z. B. Lane Guard System von MAN) oder durch Infrarot-Sensorik am Unterboden des Fahrzeugs realisiert (z. B. AFIL im Citroën C4, C5 und C6, Systemhersteller Valeo). Droht das Fahrzeug langsam aus der Spur abzudriften, warnt das System durch „Nagelbandrattern" in den Lautsprechern (MAN) oder durch eine Sitzvibration auf der Seite, zu der das Fahrzeug abdriftet (Citroën). Die Spurhalteunterstützung unterstützt den Fahrer durch automatisiertes permanentes Mitlenken bei der Spurhaltung. Das von BMW im Rahmen des Europäischen PROMETHEUS-Projektes entwickelte Heading Control (HC) System erfasst den Straßenverlauf mit einem Kamerasystem und berechnet aus Bildverarbeitungsdaten den idealen Lenkradwinkel. Weicht die aktuelle Lenkradstellung von diesem Winkel ab, wird dies dem Fahrer durch Lenkradvibration bzw. ein korrigierendes Lenkmoment angezeigt. In letzterem Fall gewinnt der Fahrer den Eindruck, er würde in einer „tonnen-förmigen" Straße fahren.

Unfälle beim Spurwechsel sind häufig auf unzureichende Beobachtung des Bereichs hinter oder neben dem Fahrzeug („toter" Winkel) zurückzuführen. Der Spurwechselassistent warnt den Fahrer vor drohenden Kollisionen beim Spurwechsel. Das System wird beim Betätigen des Blinkers aktiviert wobei der Spurhalteassistenten dabei deaktiviert wird. Die Erfassung von Fahrzeugen auf der Nachbarspur erfolgt dabei mit Radarsensoren, Kameras oder Laserscannern. Es ist kein automatischer Eingriff vorgesehen, um eine Kollision mit anderen Fahrzeugen zu verhindern; die Verantwortung für sicheres Fahren verbleibt vollständig beim Fahrer. Warnungen werden optisch durch Leuchtanzeigen, meist im Bereich der Außenspiegel, akustisch oder haptisch durch Vibration des Lenkrads oder des Blinkerhebels ausgegeben. Eine Weiterentwicklung stellt die Spurwechselunterstützung dar, von der ein Spurwechsel auf Wunsch des Fahrers automatisch durchgeführt wird.

In Zukunft wird die Sensorik rund ums Fahrzeug weiter zunehmen, auch um dem Fahrer Gefahrensituationen anzuzeigen, die er mit seinen natürlichen Sinnen gar nicht erkennen kann. Schon immer von Autofahrern gefürchtet ist der dunkelgekleidete Fußgänger, der auf der nächtlichen Landstraße zu Fuß unterwegs ist. Neuerdings werde „Night Vision" Geräte in Oberklassefahrzeugen angeboten, die mit Infrarotkameras bei Dunkelheit Fußgänger, Wild oder andere Hindernisse in einer Entfernung bis zu 300 m vor dem Fahrzeug erfassen, lange bevor sie im Scheinwerferlicht für den Fahrer sichtbar werden (◘ Abb. 1.4). Auf die Darstellung des Infrarotbildes im Bordmonitor kann der Fahrer rechtzeitig reagieren, sofern er in einer gefährdenden Situation den Monitor im Blick hat. Neuerdings wird von Mercedes und BMW ein Scheinwerfersystem angeboten, das ein gezieltes Spotlight auf den detektieren Fußgänger wirft und diesen somit unter allen Umständen direkt sichtbar macht.

10 Diese eingeschränkte „Sichtweite" veranlasst die meisten Hersteller, den Regelbereich das ACC auf max 180 km/h zu beschränken (Audi lässt dafür Geschwindigkeiten bis 210 km/h zu).

Abb. 1.4 Night-Vision Anzeige : hier „Nachtsichtgeräte" von BMW

1.2.2 Entwicklung des Cockpits

Mit der technischen Entwicklung des Automobils und der technischen Komponenten, die den eigentlichen Fahrvorgang unterstützen, veränderte sich auch die Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Informationsaufnahme und Informationsübertragung. Nur aus technischen Gründen waren an den ersten Fahrzeugen direkt am Kühler ein Thermometer angebracht sowie einige Füllstandsanzeiger für die unterschiedlichen Ölkreisläufe. Bei vielen Fahrzeugen musste in dieser Pionierzeit das Fahrzeug während der Fahrt durch Betätigung kleiner Ölpumpen geschmiert werden (siehe Abb. 1.3). Schon bald verlangte der Gesetzgeber eine Geschwindigkeitsanzeige, die als Zusatzinstrument irgendwo im Gesichtsfeld des Fahrers montiert wurde. Die ursprünglich von Hand bewegten Scheibenwischer wurden bald motorisch angetrieben[11] und Fahrtrichtungsanzeiger („Winker") kamen hinzu. Ende der 20er und Anfang der 30er Jahre wurden verschiedene Anzeigen, Schalter und Hebel in einem „Armaturenbrett" zusammengefasst (Abb. 1.5), Autoradios hingegen gehörten noch nicht zur Ausstattung von Fahrzeugen[12] (noch in den 50er Jahren wurde ernsthaft drüber diskutiert, ob Radiohören während der Fahrt eine zu starke Ablenkung für den Fahrer darstellt). Der zunehmende Anspruch der Kunden an Unterhaltung und Information machte den Radioeinbau dann aber unumgänglich. Die Entwicklungsstufen vom einfachen Röhrengerät zum High-End „Entertainment System" (Radio, Kassette und CD-Wechsler, z. T. auch TV und Video) zeigt Abb. 1.6.

Die Anordnung einer zunehmenden Anzahl von Einzelgeräten (Radio, CD-Spieler, Klimabediengerät), Anzeigen und Bedienelementen auf dem Armaturenbrett (heute Instrumenten Tafel oder kurz I-Tafel genannt) führte in den 90er Jahren zum Eindruck der Überladenheit. Im Jahre 2003 kam BMW mit einem revolutionären Bedienkonzept in der 7er-Reihe auf den Markt: dem i-Drive, wobei – so BMW – das „i" für intelligent und integriert, informativ und innovativ, intuitiv und interaktiv steht. Das System besteht aus zwei Komponenten, einem großen LCD-Monitor in der Mitte der I-Tafel und

11 Meist geschah dies mit einem Elektromotor. Es waren aber auch andere Lösungen gebräuchlich. So wurde beispielsweise im Opel Olympia Rekord noch bis zum Modell 1957 der Wischer über eine biegsame Welle von der Nockenwelle angetrieben.

12 Bereits 1922 wurde in den USA allerdings ein Radio in ein Fahrzeug eingebaut. 1924 war bei Chevrolet bereits ein werkseitig eingebautes Autoradio erhältlich. Blaupunkt bot 1932 ein Autoradio an, dessen Lautstärke und Empfangsfrequenz vom Lenkrad aus über Bowdenzüge bedient werden konnte (zitiert nach Spies 2013).

Abb. 1.5 Armaturenbrett des BMW 327 (1939, links) und Mercedes 500 K (1936, rechts)

Abb. 1.6 Entwicklung der Technik und des Designs des Radios vom Röhrenradio über das Transistorradio zu modernen Entertainmentsystemen

dem Bedienknopf (Controller) in der Mittelkonsole, mit dem die verschiedenen Bedienfunktionen durch Schieben/Ziehen, Drehen und Drücken ausgewählt und aktiviert werden können (Abb. 1.7). In der Ausgangsposition zeigte das Display acht Hauptmenüs: Kommunikation, Bordcomputer-Daten, Navigation, Hilfe, Entertainment, Einstellungen, Klima und den Telematikdienst BMW ASSIST. Angesteuert werden sie alle durch das Schieben bzw. Ziehen des Controllers in die jeweilige Richtung. Die Auswahl der entsprechenden Funktion erfolgt durch Drücken des i-Driver-Bedienelements (sog. „Drehdrücksteller"). Bei gleichzeitiger Erhöhung der Funktionsvielfalt (ca. 700 Funktionen sind während der Fahrt bedienbar) soll dadurch die Fahrzeugbedienung erleichtert werden. Der BMW-Slogan „Etwas wohl Vertrautes werden Sie im neuen 7er nicht mehr finden – aber Sie werden es nicht vermissen" hat sich für dieses völlig neuartige System zur Fahrzeugbedienung nicht erfüllt, denn es erfordert eine lange Eingewöhnungszeit und ist durch die Menüstruktur nicht ganz einfach zu bedienen. Dies gilt besonders für ältere Kunden, die weniger mit der Navigation in Menüs vertraut sind, aber einen Großteil der Zielgruppe ausmachen. Der Fahrer, der sich mit i-Drive beschäftigen muss, um beispielsweise nur den warmen Luftstrom in den Fußraum zu lenken, ist häufig und länger vom Verkehrsgeschehen abgelenkt.

Aufgrund anhaltender Kritik wurde i-Drive mehrfach überarbeitet. Ähnliche Konzepte wurden

Abb. 1.7 BMW iDrive in der 7er Serie von 2003

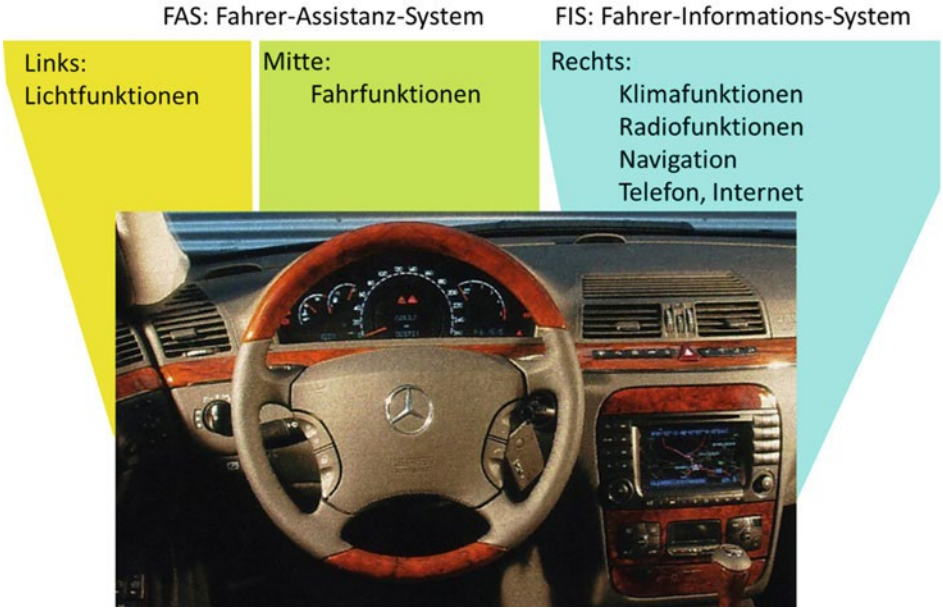


Abb. 1.8 Heute zur Quasi-Konvention gekommene Aufteilung des Armaturenbrettbereichs in FAS (Fahrer-Assistenz-System) und FIS (Fahrer-Informations-System)

bald aber auch von anderen Fahrzeugherstellern angeboten, z. B. von Audi das MMI-System und von Mercedes-Benz das *COMAND*-System, die teilweise versuchten, die offensichtlichen Nachteile des ursprünglichen BMW-Systems auf unterschiedliche Weise zu umgehen.

Neben der Einführung neuer Technologien wurden die Informationsmittel auf der Instrumententafel funktionell gruppiert (siehe Abb. 1.8). In der Armaturenbrettmitte, dort wo sich ursprünglich das Autoradio (Normeinschub) befand, wurde ein (mehr oder weniger aufwendiger) Bildschirm installiert, der neue Informationen, insbesondere die des Navigationsrechners, aber darüber hinaus auch zusätzliche andere Information über Radiofunktionen, der Klimaanlage und in der weiteren Entwicklung auch des Telefons und des Internets dem Fahrer sichtbar macht. Im Bereich des zentralen Gesichtsfeldes des Fahrers hinter dem Lenkrad werden vor allem die Informationen angeboten, die unmittelbar mit dem

Fahren zu tun haben. Zusätzlich zu den vertrauten Anzeigen (Tacho, Drehzahlmesser, Tank- und Kühlwasser-Anzeige) werden dort somit neuerdings auch Informationen über ACC-Einstellungen und -Aktionen sowie ESP-Eingriffe dargestellt.

Einige dieser Informationen werden teilweise mittels der Head-Up-Display Technik (HUD) in die Außensicht projiziert (Chevrolet Corvette, BMW 5er, 6er und 7er, neuerdings auch Audi A6 und A7). Die verschiedenen Lichtfunktionen befinden sich links vom Lenkrad. Das Fahrer-Informations-System ist in der Mitte der I-Tafel positioniert und beinhaltet das Navigationssystem, Entertainment-Funktionen (Radio, CD-Wechsler, z. T. auch TV), Kommunikations-Funktionen (Telefon, Email, Internet), Bordcomputer-Informationen sowie Klimafunktionen. Über dieses System lassen sich auch fahrdynamische Einstellungen vornehmen, z. B. Parameter des ESP oder der Elektronischen Dämpfer Control (EDC) verändern.

1.3 Die Bedeutung der Ergonomie für die Automobilentwicklung

Die bisherigen Abschnitte zeigen, wie sehr der Siegeszug des Automobils auch dadurch gekennzeichnet ist, dass das Fahrzeug selbst und die Nutzungsmöglichkeiten des Fahrzeugs – im Rahmen der jeweiligen technischen Möglichkeiten – an den Bedürfnissen der Nutzer orientiert waren, ja dass diese Bedürfnisse zugleich Triebfeder für neue technische Entwicklungen waren. Die technische Entwicklung ist heute in einem Stand, dass – mit Einschränkung – praktisch „fast alles realisiert werden kann". Man steht also häufig vor der Frage: „Wohin soll die Entwicklung noch gehen – was ist sinnvoll?" Unter diesem Eindruck ist es überlegenswert, sich mit den Bedürfnissen und Fähigkeiten des Menschen aus wissenschaftlicher Sicht zu beschäftigen. Das Wissensgebiet der Ergonomie befasst sich genau mit dieser Frage mit dem Ziel, aus der Kenntnis menschlicher Eigenschaften und Fähigkeiten Hinweise für die technische Gestaltung von Arbeitsmitteln und Arbeitsumgebung zu entwickeln. Seit etwa den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts hat sich die Ergonomie auch für die Entwicklung von Automobilen zunehmend etabliert und heute ist es eine Selbstverständlichkeit, dass jedes Automobilunternehmen entsprechende Fachleute in ihren Ergonomieabteilungen beschäftigt.

1.3.1 Kurzer Abriss der Entwicklung der Ergonomie

Die Ergonomie blickt inzwischen auf eine 150jährige Tradition zurück. Die menschenunwürdigen Arbeitsverhältnisse der frühen Industrialisierung und das Vertrauen des mechanistischen Weltbilds des 19. Jahrhunderts in die Herstellbarkeit von gewünschten „guten" Verhältnissen durch planerischen Eingriff legten es nahe, auch hinsichtlich der Arbeitswelt eine eigene Wissenschaftsdisziplin zu begründen. Bereits 1857 machte der polnische Wissenschaftler Jastrzebowski in der Zeitschrift „Natur und Industrie" den Vorschlag „ … uns mit einem wissenschaftlichen Ansatz zum Problem der Arbeit zu beschäftigen und sogar zu ihrer (der Arbeit) Erklärung eine gesonderte Lehre zu betreiben …, damit wir aus diesem Leben die besten Früchte bei der geringsten Anstrengung mit der höchsten Befriedigung für das eigene und das allgemeine Wohl ernten und damit anderen und dem eigenen Gewissen gegenüber gerecht verfahren." Er nannte diesen neuen Wissenschaftszweig „Arbeitswissenschaft" bzw. „Ergonomie", wobei letztere Bezeichnung in der Folgezeit allerdings wieder in Vergessenheit geriet.

Dennoch können seit Mitte des 19. Jahrhunderts viele Aktivitäten in verschiedenen Ländern beobachtet werden, die eine wissenschaftliche Betrachtung menschlicher Arbeit zum Gegenstand hatten. Gemäß dem herrschenden wissenschaftlichen Weltbild hielt man es insbesondere für möglich, Regeln aus der klassischen Physik auf alle Erscheinungen der Natur und damit auch auf die des menschlichen Lebens zu übertragen (siehe hierzu verschiedene Arbeiten von Reuleaux und die Psychophysik von Fechner). In den verschiedenen Ländern Europas und in den USA entstand so ein Wissenschaftsgebiet, das heute im deutschsprachigen Raum unter dem Begriff „Arbeitswissenschaft" zusammengefasst wird. (im Angloamerikanischen bürgerte sich die Bezeichnung „human factors" bzw. „human engineering" ein, speziell im europäischen Raum auch „ergonomics", s. u.). 1949 wurde in England

von Murrell das aus den altgriechischen Worten (εργον = ergon = Arbeit; und νομοσ = nomos = Gesetz, Gesetzmäßigkeit) zusammengesetzte Kunstwort „Ergonomie" „wiedererfunden". Von dieser Zeit an fanden in den verschiedenen Europäischen Ländern aber auch in außereuropäischen Ländern Gründungen wissenschaftlicher Gesellschaften dieses Namens (in Deutschland 1953: „Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, GfA") statt. 1959 wurden sie unter dem Dach der International Ergonomic Association (IEA) zusammengefasst.

1.3.2 Ergonomie und Arbeitswissenschaft (Micro Ergonomics und Macro Ergonomics)

Was den inhaltlichen Bereich des entstandenen Fachgebiets anlangt, gibt es unterschiedliche Auffassungen. Im Vorspann zu seinem umfassenden Werk darüber schreibt W. E. Woodson (1981): „Human Factors Engineering ist die Praxis der Produktgestaltung in solcher Weise, dass der Nutzer den geforderten Gebrauch, die Handhabung, die Bedienung und die unterstützenden Aufgaben mit einem Minimum an Belastung (stress) und einem Maximum an Effizienz durchführen kann". Er erwähnt auch den Begriff „Ergonomie", der nach seiner Darlegung im Allgemeinen mit dem Begriff Human-Factors-Engineering austauschbar gebraucht wird. Der einzige Unterschied, den man sehen könnte, läge darin, dass in den USA der Begriff „Human-Factors-Engineering" weiter verbreitet ist als in anderen Ländern. Inzwischen hat die entsprechende amerikanische wissenschaftliche Gesellschaft übrigens den Namen „Ergonomie" integriert und nennt sich nun „HUMAN FACTORS & ERGONOMICS SOCIETY (HFES)"

M. Helander (1981), der lange Jahre Präsident der IEA war, formuliert in erweiterndem Sinne: „Human-Factors-Engineering versucht Arbeitsabläufe und Arbeitsmittel in solcher Weise zu modifizieren, dass die physikalischen und psychologischen Fähigkeiten und Einschränkungen des Menschen berücksichtigt werden". Er zählt für diese Disziplin verschiedene Bezeichnungen auf, wie „Ingenieurpsychologie" (engineering psychology), „technische Psychologie" (technical psychology) und – vor allem in Europa gebräuchlich – „Ergonomie". Gerade in Verbindung mit der wissenschaftlichen Betrachtung des Geschehens im Straßenverkehr, aber auch in anderen Bereichen des Verkehrs hat sich die Ingenieurs- und Verkehrspsychologie herausgebildet, deren Schwerpunkt mehr auf dem Verständnis der psychologischen Prozesse der Mensch-Maschine-Interaktion liegt als in der Gestaltung der Arbeitsabläufe und Arbeitsmittel. Sie beschäftigt sich u. a. auch mit Fragen der Verkehrsgestaltung aber auch weiteren Themen (z. B. Folgen und Bekämpfung von Drogengebrauch im Straßenverkehr). Da sich Gestaltungsvorschläge nicht ohne das Verständnis der Prozesse ableiten lassen, verlaufen die Grenzen allerdings fließend und eine scharfe Abtrennung der angesprochenen Disziplinen ist praktisch nicht möglich.

Die Arbeitswissenschaft (internat. „ergonomics", s. o.) ist eine multidisziplinäre Wissenschaft, die ihr Grundwissen aus den Humanwissenschaften, den Ingenieurswissenschaften und den Wirtschafts- und Sozialwissenschaften bezieht. Sie umfasst zunächst die Bereiche Arbeitsmedizin, -psychologie, -pädagogik, -technologie und -recht sowie Betriebssoziologie. Jedes dieser Gebiete beschäftigt sich aus seiner Blickrichtung mit der menschlichen Arbeit und stellt damit eine der jeweiligen *Aspektwissenschaften* dar. Im Hinblick auf die praktische Anwendbarkeit wird dieses Grundwissen in sogenannten *Praxeologien* zusammengefasst (Luczak et al. 1987). Die mehr sozialwissenschaftlich orientierte davon ist die Arbeits- und Organisationslehre (international: „macro ergonomics"), die Regeln für die Gestaltung von Organisation, Betriebs- und Arbeitsgruppen bereitstellt; die mehr ingenieursmäßig orientierte ist die Ergonomie (international: „micro ergonomics"), deren Ziel es ist, Regeln für die technische Gestaltung von Arbeitsplätzen und Arbeitsmitteln zu geben. In beiden Fällen ist der spezielle Fokus der Forschung auf den individuellen Mensch und sein Erleben der Situation am Arbeitsplatz gerichtet.

1.3.3 Teilgebiet der Ergonomie

Eine Vorstellung von den die Arbeit beeinflussenden Faktoren bekommt man, indem man die Struktur des Mensch-Maschine-Systems (MMS) betrachtet (siehe ◘ Abb. 1.9). Man erhält sie, wenn man die

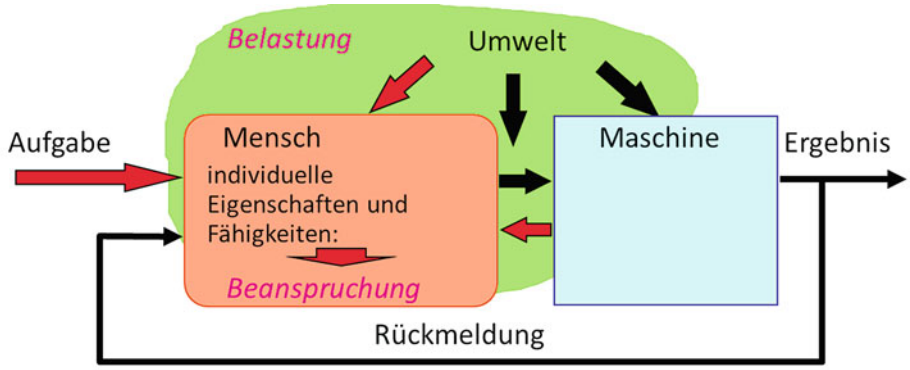


Abb. 1.9 Allgemeines Strukturschema des Mensch-Maschine-Systems (MMS)

menschliche Tätigkeit im Hinblick auf die darin enthaltene Information und den damit verbundenen Informationswandel untersucht. Dazu gehören die Aufgabenstellung bzw. Aufgabe und deren Verwirklichung, die Aufgabenerfüllung bzw. das Ergebnis. Der die Rückmeldung kennzeichnende Pfeil schließt den Regelkreis, der durch das MMS gebildet wird und zeigt, dass der Operateur im allgemeinen in der Lage ist, Aufgabe und Ergebnis miteinander zu vergleichen. Alle Einflüsse, die auf diesen Prozess einwirken, werden (soweit sie nicht aus prozess- oder systemimmanenten Einflüssen herrühren) als Umgebungseinflüsse bzw. Umwelteinflüsse bezeichnet.

Charakteristisch für die Ergonomie ist das sog. Belastungs-Beanspruchungskonzept. Danach werden unter Belastung all die Einflüsse zusammengefasst, die den Arbeitsprozess des Menschen beeinflussen können und die für jeden Menschen, der sich in dieser Situation befindet, gleich sind (in Abb. 1.9 durch die *auf* den Menschen gerichteten Pfeile charakterisiert). Beanspruchung ist die individuelle Reaktion auf diese Belastung (Reaktion *im* Menschen in Abb. 1.9). Aufgabe der ergonomischen Forschung ist u. a. das Spektrum dieser Reaktionsmöglichkeiten bei bestimmten Belastungskonstellationen zu untersuchen. Das Konzept ist insofern von großer Relevanz, als bei der technischen Gestaltung nur die Belastung beinflussbar ist. Das Belastungs-Beanspruchungskonzept lässt sich auf die Belastung durch die Aufgabenstellung und die Belastung durch die Umgebung anwenden.

Bei der *Analyse der Aufgabenstellung* unterscheidet man zwischen

- Aufgaben mit überwiegend physischem Anforderungscharakter (sog. „*körperliche Ar*beit"),
- Aufgaben mit überwiegend mentalem Anforderungscharakter (sog. „*geistige Arbeit*"),
- Aufgaben mit gemischtem Anforderungscharakter (sog. „*gemischte Arbeit*").

Bei der Analyse der Umgebungseinflüsse (sog. „*Umweltergonomie*") unterscheidet man

- physikalische Umwelteinflüsse, die sich messtechnisch erfassen lassen sowie ihre Auswirkungen auf den Menschen, die quantitativ bewertet werden können. Es sind dieses im wesentlichen Beleuchtung, Lärm, mechanische Schwingungen, Klima, giftige Gase und Dämpfe, Strahlungsbelastung, Staub, Schmutz und Nässe,
- soziale Umwelteinflüsse, die nur in Ausnahmefällen indirekt über physikalisch-messtechnische Zugänge erfasst werden können und folglich mit anderen Methoden analysiert werden müssen (Aufgabe der sog. Arbeitssoziologie, zum Teil auch der Arbeitspsychologie).

Ein weiteres Teilgebiet der Ergonomie ist die Analyse des *Mensch-Maschine-Systems (MMS)* im engeren Sinne. Diese Analyse kann einerseits im Hinblick auf die geometrische Auslegung des Arbeitsplatzes und der Arbeitsmittel geschehen (sog. „*anthropometrische Arbeitsplatzgestaltung*") und andererseits im Hinblick auf den Informationsfluss im Mensch-Maschine-System (sog. „*Systemergonomie*", s. u.).

Die *anthropometrische Arbeitsplatzgestaltung* bezieht sich auf die Gestaltung des Seh-, Greif- und

Fußraumes, von Körperunterstützungen (z. B. Sitze), sowie auf die Auslegung und Anordnung von Anzeigen und Stellteilen. Neben der Kenntnis der relevanten sinnesphysiologischen Grenzen und Bedingungen (z. B. Auflösungsvermögen des Auges, Bewegungsgenauigkeit der Extremitäten), die für die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen notwendig sind, spielt für die Gestaltung des Greif- und Fußraumes und die von Körperunterstützungen, insbesondere die unterschiedliche Größe der Menschen, eine vorrangige Rolle. Durch die Perzentilierung der einzelnen Körpermaße versucht man diese Problematik systematisch zu handhaben. Zur Erleichterung der oftmals komplexen geometrischen Gestaltungsaufgaben wurden darüber hinaus computergenerierte geometrische Menschmodelle (3D-Modelle) entwickelt, die eine Konstruktion von Arbeitsplätzen im CAD erlauben.

Die prinzipielle Struktur der Einbindung des Menschen in ein komplexes MMS kann innerhalb der sog. *Systemergonomie* mittels der Methoden der Systemanalyse untersucht werden. Ihr Ziel ist, Auslegungsanforderungen für die Mensch-Maschine-Interaktion im Rahmen der Spezifikation des MMS oder Hinweise für mögliche Verbesserungen bei bestehenden Systemen unter dem Aspekt des Informationsflusses zu erhalten. Da die Systemergonomie eine Optimierung dieser Interaktion anstrebt, wird damit auch ein Beitrag zur Verminderung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Arbeitsfehlern des Menschen (sog. „aktive Sicherheit"), bzw. ein Beitrag zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der Gesamtleistung des MMS geleistet.

1.3.4 Anwendungsgebiete der Ergonomie

Häufig wird eine Einteilung der Ergonomie nach ihren Anwendungsgebieten vorgenommen. So wird speziell zwischen der Produkt- und der Produktionsergonomie unterschieden.

Bei der *Produktergonomie* ist es vorrangiges Ziel, einen möglichst benutzerfreundlichen Gebrauchsgegenstand für eine im Prinzip unbekannte Kundschaft anzubieten. Für die Entwicklung solcher Produkte ist es also wichtig, die Variabilität des Menschen sowohl hinsichtlich seiner anthropometrischen Eigenschaften als auch hinsichtlich seiner kognitiven Eigenschaften zu kennen und in der Gestaltung zu berücksichtigen. Ein aktuelles und neues Forschungsgebiet der Produktergonomie ist die wissenschaftliche Erfassung dessen, was das *Komfortempfinden* ausmacht. Für die Gestaltung des Automobils spielen also besonders die Aspekte der Produktergonomie eine vorrangige Rolle.

Bei der *Produktionsergonomie* geht es darum, menschengerechte Arbeitsplätze in Produktions- und Dienstleistungsbetrieben zu schaffen. Hier ist das Ziel, die Belastung des Mitarbeiters zu reduzieren und zugleich die Leistungsabgabe zu optimieren. In den meisten Fällen geht es also um die Frage der Zumutbarkeit und Erträglichkeit. Im Gegensatz zur Aufgabenstellung der Produktergonomie sind hier normalerweise die Mitarbeiter bekannt und es kann individuell auf deren Bedürfnisse eingegangen werden. Die Produktionsergonomie spielt in der Automobilindustrie speziell für die Gestaltung der Produktionsanlagen eine wichtige Rolle. Da sowohl bei Produkt- wie bei Produktionsergonomie die oben beschriebenen Methoden der Ergonomie zum Einsatz kommen und da oftmals das „Produkt" des einen Herstellers „Arbeitsmittel" des andern ist, ist eine genaue Trennung zwischen diesen beiden Anwendungsgebieten praktisch nicht möglich.

Vorrangige Anwendungsgebiete, in denen heute systematisch ergonomische Entwicklung betrieben wird, ist der Bereich der Luftfahrt (speziell Cockpitgestaltung der Flugzeuge, Gestaltung der Radarlotsenarbeitsplätze), der Fahrzeuggestaltung (Pkw und Lkw: Cockpitgestaltung; anthropometrische Auslegung der Innenräume, sog. Packaging; Gestaltung neuer Informationsmittel, durch die Sicherheit, Komfort und individuelle Mobilität verbessert werden sollen), Wartengestaltung (Chemische Anlagen, Kraftwerke; hier spielen vor allem Aspekte der menschlichen Zuverlässigkeit eine wichtige Rolle) und Bürobereich (Gestaltung von Bildschirmen, Bürostühlen, der gesamten Anordnung zum Bildschirmarbeitsplatz, Softwareergonomie). Da die menschlichen Eigenschaften gegenüber diesen Anwendungsbereichen invariant sind, ergeben sich viele gegenseitige Anregungen zur ergonomischen Gestaltung aus diesen Anwendungsgebieten.

In diesem Buch stehen die Anforderungen an die technische Gestaltung eines Fahrzeugs im Vordergrund, die sich aus der Kenntnis der physiologischen

und psychologischen Eigenschaften und Fähigkeiten des Menschen bei der Führung von Kraftfahrzeugen ergeben. Da von der ursprünglichen Zielsetzung her das Autofahren die mühselige Fortbewegung durch körperliche Anstrengung kompensieren soll, spielen für die ergonomische Gestaltung des Autos die Aspekte der Informationsverarbeitung eine vorrangige Rolle. Es haben sich dafür im Bereich der Automobilindustrie teilweise eigene Bezeichnungen eingebürgert: So untersucht die **funktionale Ergonomie** die Alltagstauglichkeit des Gesamtsystems, also den Gebrauchsnutzen im Zusammenhang mit konkreten Nutzungsszenarien und die **kognitive Ergonomie** ein System bezüglich seiner Anpassung an die kognitiven Fähigkeiten des Menschen hinsichtlich Logik, Konsistenz und Erwartungskonformität der. Wie in Stein (2011) dargelegt, können Gebiete, wie „Kognitive Ergonomie", „Informationsergonomie", „Software-Ergonomie", „Kommunikationsergonomie" und „funktionale Ergonomie" ganz bzw. teilweise mit der Zielrichtung der Systemergonomie gleichgesetzt werden bzw. als eine deren Teildisziplinen angesehen werden. Ein wesentlicher Teil dieses Buches befasst sich also mit der speziellen Anwendung der ***Systemergonomie*** auf das Automobil (▶ Kap. 6).

Da Fahrer und Passagiere in einem Fahrzeug mit einem relativ begrenzten Raum auskommen müssen und zugleich oft lange Zeit (mehrere Stunden) in diesem Raum zubringen, spielt die so genannte ***Anthropometrische Ergonomie*** eine weitere wichtige Rolle in der Fahrzeuggestaltung. Ihre Aufgabe ist es, das Fahrzeug an die Körpermaße des Menschen anzupassen hinsichtlich Platzangebot, Erreichbarkeit und Sichtbarkeit der Bedienelemente und Anzeigen (▶ Kap. 7).

Daneben spielt der Komfort für die Gestaltung des Fahrzeugs eine herausragende Rolle. Viele Kenntnisse, die dafür notwendig sind, stammen aus der ***Umweltergonomie***. Die spezielle Anwendung dieses Teilgebiet der Ergonomie auf die Gestaltung von Fahrzeugen ist ein weiterer Gegenstand dieses Buches (▶ Kap. 8).

1.4 Hierarchie der Fahraufgabe

Für jede ergonomische Analyse ist die genaue Beschreibung der Aufgabe unbedingte Voraussetzung. Im Allgemeinen setzt sich eine Aufgabe aus mehreren Teilaufgaben zusammen. Das Fahren eines Kraftfahrzeugs erfordert die Bewältigung mehrerer Teilaufgaben, die teilweise hierarchisch geordnet und teilweise auch unabhängig voneinander sind. Es wird hier einem Einteilungsvorschlag von Geiser (1985) gefolgt, der von der sonst übliche Einteilung in zwei Aufgabenbereiche etwas abweicht[13]. Grundsätzlich lässt sich danach unterscheiden zwischen der primären Fahraufgabe, die vom Fahrer verlangt, das Fahrzeug mit einer bestimmten Geschwindigkeit auf Kurs zu halten, und sekundären Aufgaben, die in Abhängigkeit von der jeweiligen Verkehrssituation erforderlich sind und die primäre Aufgabe unterstützen. Als tertiäre Aufgaben bezeichnet man Bedienvorgänge, die mit dem eigentlichen Fahren nichts zu tun haben. ◘ Abbildung 1.10 vermittelt einen Überblick über diese Teilaufgaben.

1.4.1 Primäre Aufgabe

Die Aufgabenstellung für die primäre Fahraufgabe ist allgemein definiert durch den Transport von Personen und/oder Gütern, die zu einem bestimmten Zeitpunkt ihr Ziel erreichen sollen. Aus dieser Transportaufgabe leitet sich die ***Navigationsaufgabe*** ab: die Fahrtroute ist festzulegen, eine Durchschnittsgeschwindigkeit für die zu befahrende Strecke abzuschätzen, um damit den Startzeitpunkt für die Fahrt zu bestimmen. Die Navigationsaufgabe lässt sich selbst wieder in die soeben beschriebene ***Reiseplanung*** einteilen und in Abhängigkeit davon die notwendige Orientierung an den ***Knotenpunkten***, an denen in unterschiedlicher Form eine Entscheidung zur Abweichung von dem gegebenem Straßenverlauf notwendig wird. Bekanntlich werden beide Aspekte dieser Aufgabe heute durch GPS-basierte Navigationssysteme unterstützt, wobei

13 Üblicherweise erfolgt die Einteilung in „primäre Fahraufgabe", die alles subsummiert, was mit dem Fahren zu tun hat. Im Sinne der Geiser'schen Einteilung fasst dies die dort als primär und sekundär bezeichneten Bereiche zusammen. Als „sekundär" werden dann üblicherweise alle Aufgaben bezeichnet, die nichts direkt mit dem Fahren zu tun haben. Im Sinne der hier verwendeten Geiser'schen Einteilung sind das die tertiären Aufgaben.

Primäre Aufgabe: Halten des Fahrzeugs auf Kurs

- Navigation
- Führung
- Stabilisierung

Sekundäre Aufgabe: Tätigkeiten in Abhängigkeit von Fahranforderungen

- Aktion (Blinken, Hupen)
- Reaktion (Auf- und Abblenden, Wischen)

Tertiäre Aufgaben: Tätigkeiten, die nichts mit dem Fahren zu tun haben

- Komfortverbesserung (Klimaanlage, Sitzeinstellung, Radio …)
- Kommunikation (Radio, Telefon, Internet …) auch hier Aktion ↔ Reaktion

Abb. 1.10 Aufgaben des Autofahrers

der Fahrer bei den meisten Systemen die kürzeste oder schnellste Verbindung, Nebenstrecken oder Schnellstraßen wählen kann.

Durch die Festlegung der zu befahrenden Strecke ist ein globaler Rahmen für die tiefer gelegene Hierarchieebene, die ***Führungsaufgabe*** vorgegeben. Die Führungsaufgabe verlangt vom Fahrer, in Abhängigkeit von der aktuellen Verkehrssituation den Sollkurs und die Sollgeschwindigkeit festzulegen. Diese mental zu bildenden Führungsgrößen sind entsprechend der äußeren Bedingungen wie Straßenverlauf, Hindernisse auf der Fahrbahn, Witterungsbedingungen, Verkehrsdichte und dem Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer zu bestimmen. Im Detail lässt sich diese Aufgabe unterteilen: In der ***Manöverplanung*** entscheidet sich der Fahrer aufgrund der gegebenen Situation und seines eigenen inneren Antriebs für eine bestimmte Aktion. Trivial und praktisch ständig zu realisieren ist dabei das Manöver „dem Straßenverlauf folgen". Komplexer ist bereits das Manöver „dem vorausfahrenden Fahrzeug folgen", weil zusätzlich zu dem Verfolgen des Straßenverlaufs auch noch die Einregelung des korrekten Abstandes kommt. Die Entscheidung, das vorausfahrende Fahrzeug zu überholen, ist ein sehr komplexes Manöver, da das Beschleunigungsvermögen des eigenen Fahrzeuges abzuschätzen und damit die Länge des Überholweges mit der einsehbaren Strecke abzugleichen, sowie gegebenenfalls die Geschwindigkeit eines entgegenkommenden Fahrzeugs und der von diesem dabei zurückgelegte Weg abzuschätzen ist. Ein anderes, sich aus der Navigationsaufgabe beispielsweise ergebendes Manöver kann „Abbiegen von der Straße (links oder rechts)" sein. Es lassen sich so verschiedene Manöver definieren, die In Abhängigkeit von der jeweiligen Situation abgerufen werden. Liegt die Entscheidung für ein bestimmtes Manöver vor, so ist auf dieser Grundlage die ***Trajektorie*** so zu planen, dass eine Berührung mit stehenden oder sich bewegenden Objekten bzw. Personen in jedem Fall vermieden wird. Die Ergebnisse wissenschaftlicher Untersuchungen zeigen, dass diese Aufgabe permanent für eine räumliche Distanz bis maximal 200 m vor dem Fahrzeug und innerhalb eines Zeitfensters von etwa 2 s durchgeführt wird. Dabei legt der Fahrer von seiner aktuellen Position auf der Straße eine Verbindungslinie zu einem Zielpunkt im Straßenverlauf, der nicht weiter als 200 m entfernt ist. Bei Hindernissen auf der Straße, z. B. geparkten Fahrzeugen, ist diese Verbindungslinie entsprechend gekrümmt. Die Bestimmung des Sollkurses wird schwieriger, wenn sich

die Hindernisse auf der Straße bewegen (vorausfahrendes Fahrzeug, kreuzendes oder überholendes Fahrzeug, Fußgänger). Auf dieser Ebene der primären Fahraufgabe bieten aktuelle Entwicklungen eine Unterstützung für den Fahrer. Das bereits vorgestellte ACC-System hält eine vom Fahrer eingestellte Sollgeschwindigkeit und ändert diese, wenn ein langsameres Fahrzeug vorausfährt, wobei dann automatisch ein geschwindigkeitsabhängiger Abstand errechnet und eingehalten wird. Dabei wird das eigene Fahrzeug automatisch verzögert und wieder bis zur Sollgeschwindigkeit beschleunigt, wenn der Vordermann bremst bzw. wieder beschleunigt. Eine Erweiterung des ACC-Systems um eine automatische Erkennung von Geschwindigkeitsbegrenzungen durch die Vernetzung mit dem Navigationssystem (unveränderliche Bereiche mit Geschwindigkeitsbegrenzungen liegen über GPS-Koordinaten fest) oder durch Kamerasysteme (z. B. in Verbindung mit dem Spurführungsassistenten) steht kurz vor der Serienreife. Bei der Festlegung des Sollkurses unterstützt der Spurführungsassistent zumindest in dem Maße, als das Überschreiten von Toleranzbereichen für den Sollkurs durch korrigierende Lenkmomente dem Fahrer angezeigt wird. Auf etwas niedrigerem Niveau wird ähnliches durch die bereits beschreiben Spurverlassenswarner erreicht. Spezielle Teilaufgaben der Führungsaufgabe wie Spurwechsel werden durch Spurwechselwarner und Spurwechselassistent unterstützt. Die weitere Entwicklung von Assistenzsystemen, die der Verkehrssicherheit dienen, geschieht vor allem auf dem Gebiet der Führungsaufgabe.

Durch Betätigung der Bedienelemente bewirkt der Fahrer durch Erledigung der ***Stabilisierungsaufgabe*** die Übereinstimmung der Istgrößen (Istkurs, Istgeschwindigkeit) mit den im Rahmen der Führungsaufgabe mental gebildeten Sollgrößen. Für diese zweidimensionale Stabilisierungsaufgabe (Längs- und Querdynamik) werden in einem Hand geschalteten Fahrzeug fünf Bedienelemente verwendet, wobei allein vier Stellteile für die Regelung der Längsdynamik zu bedienen sind: Bremse, Kupplung, Schalthebel, Gas. Fahrzeuge mit Automatikgetriebe bieten hier den Vorteil, dass nur noch drei Bedienelemente zur Stabilisierung benötigt werden, was letztlich – zumindest theoretisch – der Konzentration auf das Verkehrsgeschehen förderlich ist.

1.4.2 Sekundäre Aufgaben

Sekundäre Fahraufgaben fallen in Abhängigkeit von der primären Fahraufgabe an, wobei der Fahrer mit Aktionen andere Verkehrsteilnehmer über seine Intentionen informiert oder auf äußere Bedingungen reagiert. Beispiele für *Aktionen* sind das Betätigen der Fahrtrichtungsanzeige beim Spur- bzw. Richtungswechsel sowie das Betätigen des Horn zur Warnung anderer Verkehrsteilnehmer und der Lichthupe, um eine Überholabsicht anzuzeigen oder aber auch z. B. einem an einer Ausfahrt wartenden Verkehrsteilnehmer anzuzeigen, dass man ihm Vorrang gewährt[14]. Beispiele für *Reaktionen* sind das Umschalten von Fernlicht auf Abblendlicht bei Gegenverkehr, das Einschalten des Wischers bei Regen oder das Einschalten der Nebelscheinwerfer bzw. der Nebelrückleuchte bei entsprechender Witterungs- und Sichtbedingung. Viele dieser reaktiven Sekundäraufgaben lassen sich automatisieren, wie in Fahrzeugen der gehobenen Mittelklasse oder Premiumklasse (meist jedoch nur als Sonderausstattung) bereits realisiert in Form intelligenter Lichtsysteme[15] oder durch

14 Man erkennt an diesen Beispielen, dass die Codierung dieser Kommunikationsmittel nach außen manchmal nicht ganz eindeutig ist und ggf. zu fatalen Missverständnissen Anlass geben kann.

15 Das „Intelligent Light System" von Mercedes-Benz besteht aus variabel steuerbaren Scheinwerfern mit fünf verschiedenen Lichtfunktionen. Ab einer Geschwindigkeit von mehr als 90 km/h schaltet sich in zwei Stufen automatisch ein Autobahnlicht ein, wobei zunächst die Leistung der Xenon-Lampen von 35 auf 38 Watt erhöht und in der zweiten Stufe ab 110 km/h die Reichweite des fahrbahninneren Scheinwerfers vergrößert wird. So entsteht ein gleichmäßiger, bis zu 120 Meter weit reichender Lichtkegel, der die Fahrbahn auf ihrer gesamten Breite ausleuchtet. Sobald bei einer Sichtweite von weniger als 50 Metern und einer Geschwindigkeit unterhalb von 70 km/h die Nebelschlussleuchte eingeschaltet wird, schwenkt der linke Bi-Xenon-Scheinwerfer um acht Grad nach außen und senkt seinen Lichtkegel gleichzeitig nach unten. Das erweiterte Nebellicht bleibt bis zu einer Geschwindigkeit von 100 km/h eingeschaltet. In der Zwischenzeit werden von verschiedenen Herstellern Lichtsysteme angeboten, die gesteuert von der Auswertung des Bildes einer elektronischen Kamera automatisch aus dem Licht des Fernlichtes den Bereich des blendgefährdeten Gegenverkehrs ausschneiden. Dies geschieht teilweise über eine mechanisch eingebrachte Blende, in Zukunft aber wohl durch Ansteuern von matrixartig angeordneten LED-Baugruppen im Scheinwerfer.

Regensensoren, über welche der Wischer bei Regen eingeschaltet und die Wischintervalle optimal an die Scheibenbenetzung angepasst werden können. Auch das Schalten der Gänge stellt eine sekundäre Fahraufgabe dar, die entweder als Reaktion auf äußere Bedingungen anfällt (z. B. Herunterschalten beim Befahren von Steigungen oder Gefälle) oder als Aktion bei bestimmten Fahrmanövern (z. B. Herunterschalten vor dem Überholen). Kupplung und Getriebe sind rein technisch gesehen erforderlich, um einerseits das Anfahren zu ermöglichen und um andererseits das von der Drehzahl abhängige Drehmoment des Motors an die Erfordernisse der Fahrsituation anzupassen. Wie bereits erläutert, ist das Anfahren ohne Betätigung eines Kupplungspedals und das Schalten der Gänge ohne Schalthebel durch ein Automatikgetriebe mit Drehmomentwandler bereits sehr früh in den USA (1940) automatisiert worden, was im Hinblick auf die zweidimensionale Fahraufgabe eine sinnvolle Entlastung des Fahrers darstellt[16]. Während amerikanische Hersteller so gut wie keine handgeschalteten Fahrzeuge für den amerikanischen Markt produzieren, gibt es in Europa weniger Befürworter als Gegner des Automatikgetriebes. Der technisch versierte Fahrer bezeichnet das Automatikgetriebe als „Drehmomentvernichter" und die eher sportlich orientierten Fahrer sehen in dem schnelleren Herunterschalten von Hand beim Überholen einen Sicherheitsgewinn. Tatsächlich reagiert die Automatik mit dem Herunterschalten erst mit einer gewissen Verzögerung auf den Kick-down mit dem Gaspedal, was ein vorausschauendes Fahren erforderlich macht. Beim Befahren eines starken Gefälles reagiert das Automatikgetriebe auf das Abbremsen des Fahrzeugs meist nicht mit der Fahrstufe, die für das „Motorbremsen" notwendig wäre. Deshalb sind bei Automatikgetrieben die verschiedenen Fahrstufen auch von Hand schaltbar. Die Beispiele zeigen, dass die Automatik speziell für den defensiven Fahrer einen Komfortgewinn darstellt, für bestimmte Fahrmanöver aber Defizite aufweist. Viele neue Entwicklungen (z. B. Doppelkupplungsgetriebe, Automatiken mit 7 bis zu 8 Gangstufen) haben aber die angedeuteten Nachteile voll kompensiert, sodass heute bei machen Fahrzeugen der Kraftstoffverbrauch mit Automatik sogar niedriger ist als mit der handgeschalteten Variante. Zudem nutzen neueste Entwicklungen Informationen aus dem Navigationssystem, um so gewisse Elemente des vorausschauenden Fahrens (z. B rechtzeitiges Zurückschalten vor einer Steigung, Nutzen der Motorbremse bei Gefälle) zu realisieren.

16 In den 60er Jahren gab es in Deutschland für fast alle Autos dieser Zeit alternativ zum Schaltgetriebe den „Saxomat" von Fichtel & Sachs. Dabei handelte es sich um eine elektropneumatisch geschaltete Kupplung, die zum Anfahren über eine Fliehkraftkupplung verfügte. Dadurch konnte das Kupplungspedal entfallen. Die Schaltvorgänge wurden durch den Fahrer mittels Gaspedal und Schalthebel kontrolliert. Berührte der Fahrer den Schalthebel, so wurde ausgekuppelt und man konnte schalten. Der Saxomat war vor allem bei älteren Fahrern beliebt, büßte aber im Laufe der Zeit an Beliebtheit ein, da die Einstellung schwierig sowie die Störanfälligkeit hoch waren. In vielen Fällen wurden mit dem Saxomat ausgerüstete Fahrzeuge auf normale Schaltung umgebaut.

1.4.3 Tertiäre Aufgaben

Tertiäre Fahraufgaben haben mit der eigentlichen Fahraufgabe nichts zu tun. Mit diesen Aufgaben nimmt der Fahrer einerseits Einfluss auf die Komfortbedingungen im Fahrzeug (z. B. Bedienung der Klimaanlage) oder sie dienen der Information und Kommunikation oder schlicht der Unterhaltung (z. B. Bedienung des Radios, um Verkehrsmeldungen oder den Wetterbericht zu hören, Telefonieren, Abspielen einer CD). Wie bei den sekundären Fahraufgaben lassen sich auch hier Aktionen und Reaktionen unterscheiden. Eine aktive Aufgabe stellt das Anrufen eines Gesprächspartners dar, während das Entgegennehmen eines Anrufs die Reaktion auf das Läuten des Telefons ist. In jedem Falle wenden tertiäre Aufgaben von der eigentlichen Fahraufgabe ab. Viele Untersuchungen haben gezeigt, dass der Fahrer in aller Regel Abwendungszeiten bis zu einer Zeitspanne von 2 s toleriert. In einer experimentellen Studie konnte Rassl (2004) jedoch zeigen, dass in einigen Fällen Ablenkungszeiten bis zu 16 s Dauer auftraten. Daraus leitet sich die Forderung ab, dass technische Einrichtungen nach systemergonomischen Regeln so gestaltet werden müssen, dass die dadurch bedingte Abwendung inhaltlich so gering und zeitlich so kurz wie möglich ist. Werden diese Regeln beachtet, kann die Wahrscheinlichkeit für

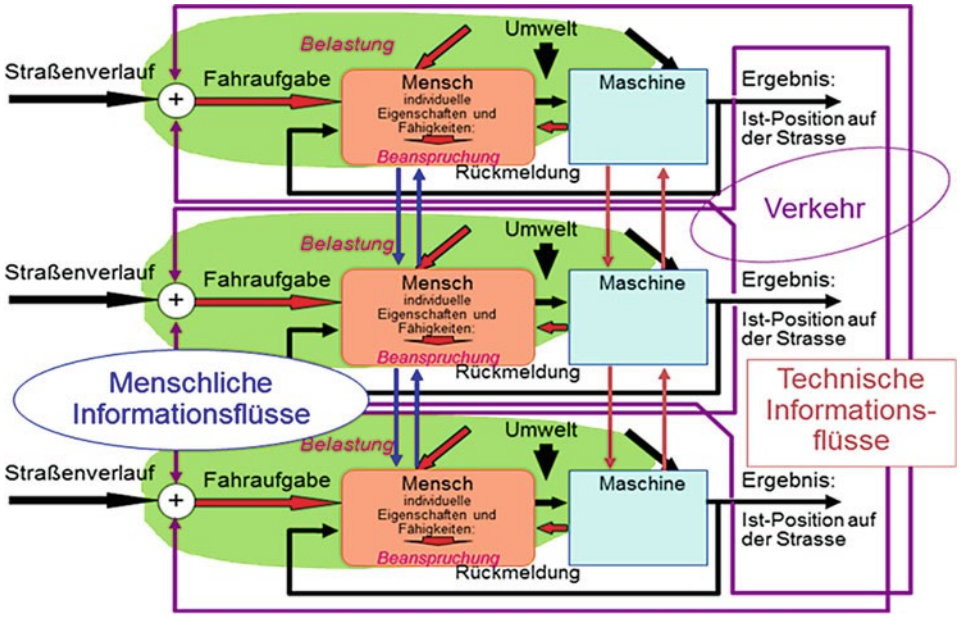


Abb. 1.11 Prinzipielle Informationsflüsse im Straßenverkehr.

das Auftreten extrem langer Ablenkungszeiten signifikant reduziert werden. Aktuell werden verschiedene Ansätze verfolgt, um tertiäre Fahraufgaben mit reaktivem Charakter mit Hilfe technischer Einrichtungen zu managen. Eine Idee beruht beispielsweise darauf, einen Telefonanruf in einer schwierigen Verkehrssituation so lange zu unterdrücken (mit einer automatischen Ansage an den Anrufer) bis ein gefahrloses Telefonieren während der Fahrt wieder möglich erscheint. Das technische Problem besteht darin, wie etwa auf der Basis von Bildverarbeitung Verkehrssituationen hinsichtlich der Bindung der Aufmerksamkeit seitens des Fahrers zu kategorisieren sind, während das ergonomische Problem darin zu sehen ist, wie der Fahrer über den Systemzustand zu informieren ist, ohne ihn nennenswert vom Verkehrsgeschehen abzulenken.

1.5 Informationsflüsse im Verkehr

Der Fahrer allein in seiner Wechselwirkung mit dem Fahrzeug ist für das Verständnis des Fahrens nicht ausreichend. Für die Bewältigung der Führungsaufgabe müssen speziell auch die Wechselwirkungen mit anderen Teilnehmern im Verkehr berücksichtig werden. Abbildung 1.11 stellt die entsprechenden Informationsflüsse zusammen. Die technischen Informationsflüsse im heutigen konventionellen Verkehr sind vor allem durch starre Verkehrsschilder, Wechselverkehrszeichen und insbesondere Ampelanlagen charakterisiert. Vereinzelt werden Informationen aus dem Verkehr heute auch in die Bildschirme der Navigationsgeräte überspielt (Verkehrszeichen, Alternativrouten bei Verkehrsstau). Im Wesentlichen spielen aber vor allem die menschlichen Informationsflüsse eine tragende Rolle. Zum Beispiel ist am wahrgenommenen Fahrverlauf des „gegnerischen" Fahrzeugs dessen zukünftiger Kurs abzuleiten. Womöglich spielen sekundäre Informationen dabei ein Rolle wie Haltung und Aussehen des „gegnerischen" Fahrers, Art und Aufmachung des Fahrzeugs u. ä. Vom Fahrer initiierte Äußerungen an andere Verkehrsteilnehmer können natürlich auch technisch unterstützt werden und ihre Verwendung ist teilweise auch zwingend vorgeschrieben (z. B. Blinker, Hupe, Lichthupe). In Zukunft werden technische Informationsflüsse aber an Bedeutung gewinnen (car2car), die teilweise direkt in das Fahrverhalten eingreifen, teilweise aber über Anzeigen Information dem Fahrer zukommen lassen werden.

Wie aus der Abb. 1.11 zu entnehmen ist, beeinflussen im Straßenverkehr neben dem Straßenverlauf die technischen Informationsflüsse direkt die Fahraufgabe des einzelnen Fahrers, während die menschlichen Informationsflüsse eher eine das individuelle Verhalten modifizierende Wirkung haben (z. B. Erregen von Zorn, großzügiges Gewähren von Vorrecht u. ä.). Bei den technischen Informationsangeboten, die zur Regulierung des Verkehrsflusses benutzt werden, kann zwischen statischen und dynamischen Systemen unterschieden werden. Alle Verkehrszeichen, die Vorschriften bzw. Empfehlungen für die Führungsaufgabe bereithalten (z. B. Geschwindigkeitsbegrenzungen, verbotene bzw. gebotene Spurnutzungen, Überholverbote, Beachtung von Vorfahrtsregelungen, Parkverbote, auf die Straße gemalte Hinweise u. v. m.) sind statische Hinweise. Von diesen sind die dynamischen Hinweise zu unterscheiden, die von den (technisch) eher einfachen Ampelregelungen über Wechselanzeigen bis zu dynamischen Verkehrsempfehlungen (z. B. Parkleitsysteme) reichen. Wegen ihrer Situationsangepasstheit erfahren die dynamischen Verkehrsregelungen seitens des Nutzers eine weitaus höhere Akzeptanz als die statischen, die in einer gegebenen Situation häufig als inadäquat empfunden werden. Die statischen Wegweiser stellen eine oftmals unentbehrliche Hilfe für die Durchführung der Navigationsaufgabe dar. Damit ist eine weitere grundsätzliche Unterscheidung der Verkehrszeichen angedeutet: Es gibt Verkehrszeichen, die auf eine kurzfristig nur an der betreffenden Stelle Bedeutung zukommende Situation hinweisen (z. B. Wegweiser, Richtungsverbote bzw. -gebote, Hinweis auf Zebrastreifen u. ä.) und solche, die über eine längere Fahrperiode Gültigkeit haben (z. B. Geschwindigkeitsbegrenzungen, Überholverbote, Halte- bzw. Parkverbote). Die korrekte Beachtung letzterer stellt entsprechende Anforderungen an die Merkfähigkeit des Fahrers und lässt bei ihm oftmals Zweifel aufkommen, ob das betreffende Gebot noch Gültigkeit hat oder schon aufgehoben ist. Die Unterscheidung in Verkehrszeichen mit Kurzeithinweis- bzw. Dauergültigkeitscharakter zeigt den Vorteil, den ein „Hereinziehen" der entsprechenden Information in das FAS bzw. FIS mit sich bringt; denn dort kann die Dauergültigkeit einer Vorschrift eindeutig von dem Kurzzeithinweischarakter einer anderen Vorschrift unterschieden werden. Nachdem dort alle Anzeigen quasi dynamischen Charakter bekommen, ist eine höhere Akzeptanz der entsprechenden Vorschriften zu erwarten.

Literatur

Verwendete Literatur

Die Entwicklung der Straßenverkehrsunfälle in der Bundesrepublik Deutschland und in Berlin (West), BASt, Heft 1 (1974)

Geiser, G.: Mensch-Maschine-Kommunikation im Kraftfahrzeug. ATZ **87**, 77–84 (1985)

Helander, M.: Human Factors/Ergonomics for Building and Construction. John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto (1981)

Lerner, M., Schepers, A., Pöppel-Decker, M., Leipnitz, C., Fitschen, A.: Voraussichtliche Entwicklung von Unfallzahlen und Jahresfahrleistungen in Deutschland – Ergebnisse 2013. Bundesanstalt für Straßenwesen, Dezember (2013)

Luczak, H., Volpert, W., Raeithel, A., Schwier, W.: Arbeitswissenschaft, Kerndefinition Gegenstandskatalog-Forschungsgebiete. Rationalisierungs-Kuratorium der Deutschen Wirtschaft (RKW) e.V., Eschborn (1987)

Rassl, R.: Ablenkwirkung tertiärer Aufgaben im Pkw – Systemergonomische Analyse und Prognose. Dissertation an der Technischen Universität München (2004)

Spies, R.: Entwicklung und Evaluierung eines Touchpadkonzeptes mit adaptiv haptisch veränderlicher Oberfläche zur Menübedienung im Fahrzeug. Dissertation an der Technischen Universität München (2013)

Stein, M.: Informationsergonomie – Ergonomische Analyse, Bewertung und Gestaltung von Informationssystemen. Habilitationschrift

Woodson, W.E.: Human Factor Design Handbook. Mc Graw Hill Book Company, New York (1981)

Weiterführende Literatur

Bubb, H.: Ergonomie. In: Landau, K. (Hrsg.) Lexikon der Arbeitsgestaltung, S. 495–498. Gentner-Verlag, ergonomie Verlag, Stuttgart (2005)

Murrell, F.H.: Ergonomie. Grundlagen und Praxis der Gestaltung optimaler Arbeitsverhältnisse. Chapman and Hall, Econ Verlag, Düsseldorf, Wien, London. (1971)

Rühmann, H., Bubb, H.: Fahrerassistenzsysteme. Ein Gewinn an Sicherheit und Komfort oder elektronischer Schnickschnack? Ergonomie aktuell **7**, 2–13 (2006)

Das Regelkreisparadigma der Ergonomie

Heiner Bubb

2.1 Fahrer-Fahrzeug-Interaktion – 28
2.1.1 Der Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis – 28
2.1.2 Folge- und Kompensationsaufgabe – 30
2.1.3 Qualität und Leistung – 31
2.1.4 Qualität bei der Querdynamik – 31
2.1.5 Qualität bei der Längsdynamik – 32

2.2 Grundbegriffe der Systemtechnik – 33

2.3 Systemdynamik – 37
2.3.1 Übergangsfunktionen und Frequenzgang – 37
2.3.2 Übergangsfunktion – 38
2.3.3 Frequenzgang – 40

2.4 Vom Fahrer geregelte Größen – 46
2.4.1 Querdynamik – 46
2.4.2 Längsdynamik – 51

2.5 Die primäre Fahraufgabe aus regelungstechnischer Sicht – 53

2.6 Systemzuverlässigkeit – 56
2.6.1 Sicherheit, Risiko, Grenzrisiko und Schutz – 56
2.6.2 Zuverlässigkeit, Fehler und Sicherheit – 57
2.6.3 Menschlicher Fehler und Unfallwahrscheinlichkeit – 60
2.6.4 Ableitung von Maßnahmen aus den Fehlerbaumanalysen – 61

Literatur – 64

H. Bubb et al., *Automobilergonomie,* ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-8348-2297-0_2, © Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

2.1 Fahrer-Fahrzeug-Interaktion

2.1.1 Der Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis

Um die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion genauer zu verstehen, ist auf das Strukturbild des Mensch-Maschinesystems, das in ◘ Abb. 1.9 wiedergegeben ist, zurückzugreifen. Die Aufgabe des Fahrers ist dabei – wie übrigens bei jeder Aufgabe einer Fahrzeugführung, sei es bei Land-, Luft- oder Wasserfahrzeugen – hierarchisch gegliedert in die Bereiche Navigation, Führung und Stabilisierung. Wie bereits in ▶ Abschn. 1.4 dargelegt, ist die Erfüllung der *Navigationsaufgabe* („auf welchem Weg will ich das Ziel erreichen?“) die Voraussetzung für die vor Ort zu erfüllende *Führungsaufgabe* („welchem genauen Pfad will ich folgen, durch den jede Kollision mit bewegten und stehenden Objekten vermieden wird?“). Erst wenn durch die Erfüllung dieser Aufgaben der genaue Sollkurs und die dafür adäquate Sollgeschwindigkeit gedanklich festgelegt ist, kann durch Betätigung der Bedienelemente über das Fahrzeug im Rahmen der Erfüllung der *Stabilisierungsaufgabe* der entsprechende Istkurs und die Istgeschwindigkeit realisiert werden. Durch die gegebene Fahrzeugtechnik sind auf dieser Ebene simultan zwei Aufgaben zu erledigen, nämlich über das Lenkrad die sog. *Querdynamik* und über die kombinierte Betätigung von Gaspedal und Bremspedal die *Längsdynamik*.

Im regelungstechnischen Sinn sind als Störgrößen die Einflüsse zu bezeichnen, die nicht Bestandteil der Aufgabe sind, die sich aber dennoch auf den Prozess auswirken. So bestimmen andere Verkehrsteilnehmer mit ihrem Verhalten zwar normalerweise einen Teil der Führungsaufgabe, gegebenenfalls kann aber ein unerwartetes Verhalten ein Ausweichmanöver nötig machen, das sich in einer plötzliche Änderung des Ausgangs der Führungsaufgabe manifestiert. Eine ähnliche Wirkung können auch Witterungseinflüsse haben (z. B. Nebel). Witterungseinflüsse können sich aber auch direkt auf die Längs- oder Querdynamik des Fahrzeugs auswirken (z. B. Seitenwind, starker Gegen- oder Rückenwind), was ein zusätzliches Ausregeln dieser Störung durch den Fahrer notwendig macht.

Wie bereits angesprochen, kommen zu diesen hierarchisch gegliederten Aufgaben noch die sekundären in Abhängigkeit von der Fahrsituation zu erfüllenden Aufgaben sowie die tertiären Aufgaben, die mit der Fahraufgabe nichts direkt zu tun haben, hinzu. ◘ Abbildung 2.1 stellt diesen Zusammenhang in einem entsprechenden Strukturbild noch einmal zusammen. Wie aus dieser Abbildung zu entnehmen ist, sind ein großer Teil der Aufgaben vom Fahrer mental zu bewältigende Forderungen, deren Ergebnis allerdings erst in der Betätigung der Stellteile sichtbar wird. Dieser mentale Anteil wird ausführlich in ▶ Kap. 3 behandelt. Im vorliegenden Kapitel sollen die Probleme zur Sprache kommen, die sich durch die unmittelbare Dynamik der Interaktion mit dem Fahrzeug ergeben.

Unter dieser Voraussetzung kann ein vereinfachtes Regelkreisbild angegeben werden, dass aber nun eine genauere Analyse der dynamischen Vorgänge erlaubt. Ein solches Bild ist in ◘ Abb. 2.2 wiedergegeben. Dieses Bild lässt sich sinngemäß jeweils auf die Längs- wie auf die Querdynamik anwenden.

Allgemein ist ein Regelkreis charakterisiert durch die *Aufgabe* und das *Ergebnis*, was in der Terminologie der Regelungstechnik mit *Führungs- und Nachführgröße* bezeichnet wird, zwischen die der *Regler* und die so genannte *Regelstrecke* gespannt ist. Der Regler, im vorliegenden Fall der Fahrer, reagiert auf die Abweichung zwischen Aufgabe und Ergebnis und wirkt auf die Regelstrecke, im Allgemeinen ist das die Maschine, im vorliegenden Fall das Fahrzeug, um die Differenz zwischen Führungs- und Nachführgröße zu minimieren. Diese Differenz wird am Summenpunkt (dargestellt durch einen Kreis) errechnet, an dem die Führungsgröße mit positivem Vorzeichen und die Nachführgröße mit negativem Vorzeichen eingespeist werden. Diese den Regelkreis charakterisierende Rückmeldung des Ergebnisses wird als *Feedback* oder *Rückkopplung* bezeichnet. Entfällt die Rückführung, spricht man von einer *Steuerung*, die naturgemäß auf äußere Einflüsse empfindlicher reagiert als die Regelung. Allgemein kann festgehalten werden: Vorteil der Steuerung ist die schnelle Reaktion, Vorteil der Regelung die präzise Anpassung von Führungsgröße und Nachführgröße. Dem Autofahren wird unter diesem Aspekt häufig eine Doppelstrategie zugesprochen: schnelle Reaktion erfolgt häufig im Sinne einer Steuerung ungenau (z. B. Reaktion auf ein plötzlich auftauchendes Hindernis, schnelles Fahren

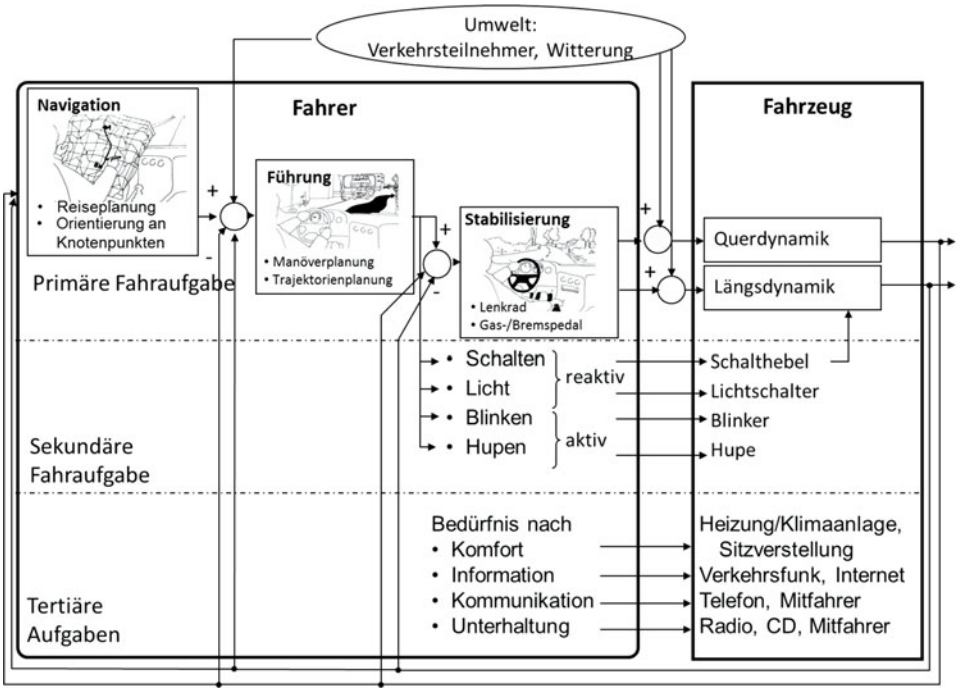


Abb. 2.1 Aufgaben des Fahrers im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis

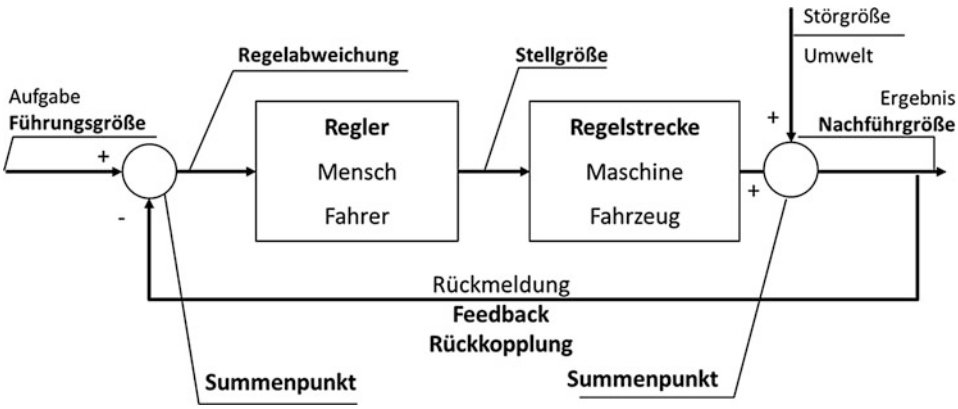


Abb. 2.2 Regelkreis als Paradigma für die Mensch-Maschine-Interaktion hier Fahrer-Fahrzeuginteraktion

auf einer kurvenreichen bekannten Strecke), während präzises Fahren nur durch Regelung möglich ist (z. B. Halten der Spur auf der Autobahn, Einhalten eines Abstandes, Rangiermanöver). Unabhängig davon, ob eine Steuerung oder eine Regelung vorliegt, wird die Differenz zwischen Führungs- und Nachführgröße als *Regelabweichung* bezeichnet, der Eingriff des Reglers in die Regelstrecke als *Stellgröße*. Der beschriebene Prozess kann durch äußere Einflüsse gestört werden (s. o.), die regelungstechnisch als *Störgrößen*, im Sinne der Ergonomie allgemein als *Umwelteinflüsse* bezeichnet werden. Sie werden über einen weiteren Summenpunkt aufaddiert, wobei es von der mathematischen Behandlung her gesehen unerheblich ist, an welcher Stelle innerhalb des Regelkreises dies geschieht.

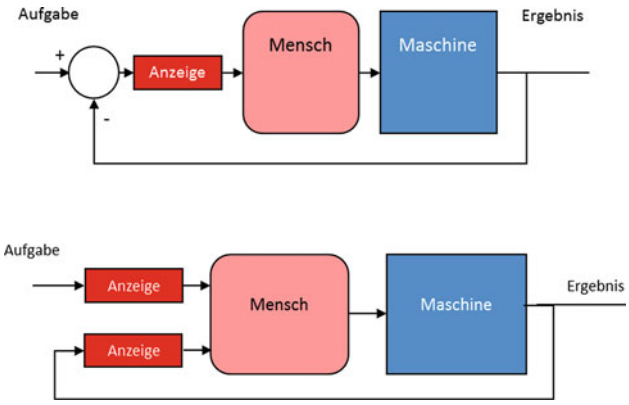


Abb. 2.3 Strukturbild von Kompensationsaufgabe (*oben*) und Folgeaufgabe (*unten*)

2.1.2 Folge- und Kompensationsaufgabe

Im regelungstechnischen Sinne wird am Summenpunkt die Differenz zwischen Führungsgröße und Nachführgröße gebildet. Wenn der Mensch als Regler auftritt, ergibt sich aber bereits die Frage auf welche Weise dieser Summenpunkt realisiert ist. Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten: Der Summenpunkt befindet sich außerhalb des Menschen, d. h. es wird ihm die Differenz zwischen Führungsgröße und Nachführgröße – normalerweise durch ein Instrument – direkt angezeigt. Seine Aufgabe besteht dann darin, die angezeigte Differenz „zu Null zu machen". Man spricht von einer *Kompensationsaufgabe*. Die andere Möglichkeit besteht darin, Führungsgröße und Nachführgröße getrennt darzubieten bzw. anzuzeigen. Der Summenpunkt liegt dann im Menschen, d. h. er muss die beiden Größen mental zur Deckung bringen. Man nennt diese Art der Interaktion *Folgeaufgabe*. Abbildung 2.3 zeigt die systemtechnische Darstellung der beiden Formen der Verschaltung von Mensch und Aufgabendarstellung.

Wie sieht die Situation nun bei der „natürlichen" Darstellung des Autofahrens aus? Der Autofahrer kann seine Position in der Welt nicht sehen (gleichwohl kann er sie sich bis zu einem gewissen Grad auf der Grundlage geistiger Leistung und Vorstellungskraft erschließen), direkt sehen kann er nur die Differenz der Position seines Fahrzeugs in Relation zu den beiden Rändern der Fahrspur (oder einer vorgestellten Sollspur). Insofern ist das Führen eines Fahrzeugs eine Kompensationsaufgabe. Allerdings sieht er beim Blick aus dem Fenster nicht nur den Abstand seines Fahrzeugs zum Fahrbahnrand, sondern auch den weiteren Verlauf der Straße, den er für den Lenkvorgang natürlich ganz wesentlich heranzieht. Oft wird argumentiert, dass diese Voraussicht auf die Straße in gewissem Maße den Charakter einer Folgeaufgabe habe und insbesondere dazu diene, im Sinne einer Steuerung schnell auf den dort gesehenen Verlauf zu reagieren. Im Sinne einer Regelung würde dann der Abstand zum Straßenrand (der vorgestellte Sollkurs, siehe ▶ Abschn. 2.5) korrigiert werden (näheres hierzu unter ▶ Abschn. 2.4.2). Das Fahren wäre demnach regelungstechnisch gesehen eine Mischform aus Steuerung und Regelung.

Die Überlegung zur Darstellungsform als Kompensations- bzw. Folgeaufgabe hat Bedeutung für die technische Darstellung von Information, die mit dem Fahren zu tun hat, also insbesondere der Navigationsanzeige (siehe ▶ Kap. 6). Die nordweisende Darstellung repräsentiert im Prinzip eine Folgeaufgabe. Das gilt auch, obwohl bei allen Systemen die Karte nachjustiert wird, wenn die eigene Position den Kartenrand erreicht. Dem gegenüber entspricht die fahrtrichtungsweisende Anzeige und speziell die sog. „Bird-view-Anzeige"[1] einer Kompensationsaufgabe. Diese Darstellungsform ist somit kompatibel

1 Bei der Bird-view-Anzeige wird die Sicht aus einer virtuellen Kamera realisiert, die sich quasi festverbunden mit dem Fahrzeug hinter diesem in einer erhöhten Position befindet.

mit der „natürlichen“ Fahraufgabe und somit aus ergonomischer Sicht vorzuziehen. Allerdings kann es für den Fahrer durchaus von Interesse sein, „wo in der Welt“ er sich befindet. Deshalb wäre die ergonomisch zu empfehlende Version, im Kombiinstrument hinter dem Lenkrad die Kompensationsversion der Navigationsanzeige zu zeigen, die eine Empfehlung gibt, welche Aktion im nächsten Aktionsbereich zum Erreichen des Fahrziels notwendig ist, und auf dem zentralen Bildschirm eine nordweisende Anzeige zur Verfügung zu stellen.

2.1.3 Qualität und Leistung

Der Effekt, der durch die Rückkopplungsschaltung erreicht wird, besteht darin, dass bis zu einem gewissen Grade, der im Wesentlichen durch die Eigenschaften des Reglers und die Forderung nach einer Stabilität des gesamten Regelkreises bestimmt ist, die Aufgabe T und das Ergebnis R jederzeit weitgehend miteinander übereinstimmen und dass sogar der Einfluss der Störungen beseitigt werden kann.

Diese Eigenschaft des Regelkreises kann man durch den Quotienten Q operationalisieren, der als *Qualität* bezeichnet wird[2]:

$$\mathrm{Q} = \frac{\text{Ergebnis}}{\text{Aufgabe}} = \frac{|\mathrm{R}|}{|\mathrm{T}|}. \tag{2.1}$$

Diese Definition hat allgemeine Gültigkeit. Sie gilt auch, wenn durch das Regelkreisparadigma allgemein menschliche Arbeit beschrieben wird (siehe Schmidtke 1993). Man spricht dann von der *Arbeitsqualität*.

Bei Versuchen mit dem Fahrzeug kann oftmals nur die Differenz zwischen Aufgabe T und Ergebnis R bestimmt werden (z. B. Halten des Fahrzeugs in Fahrstreifenmitte). Bestimmt man daraus die relative Differenz D

$$\mathrm{D} = \left|\frac{\mathrm{T} - \mathrm{R}}{\mathrm{T}}\right|, \tag{2.2}$$

so lässt sich die Qualität auch als Abweichung von der gewünschten maximalen Qualität Q = 1 beschreiben:

$$\mathrm{Q} = 1 - |\mathrm{D}|. \tag{2.3}$$

Betrachtet man die in der Zeit t erreichte Arbeitsqualität, so erhält man die Definition der *Arbeitsleistung L*:

$$\mathrm{L} = \frac{\text{Arbeitsleistung}}{\text{Zeit}} = \frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{t}}. \tag{2.4}$$

Auch im Zusammenhang mit der Beherrschung des Fahrzeugs durch den Fahrer ist es sinnvoll, konsequent diese Definitionen anzuwenden. Bolte (1991) und Reichart (2001) haben hierzu detaillierte Angaben und Formeln entwickelt, die schon aus Gründen der Vergleichbarkeit auch bei der experimentellen Erfassung individueller Fahrerleistungen herangezogen werden sollten. Es sei hier vermerkt, dass bei vielen Fahrexperimenten zur Auswertung nicht die hier angesprochenen Maße konsequent verwendet werden (siehe ► Abschn. 11.2.5). Häufig begnügt man sich als Maß für die Fahrgüte mit der Abweichung von einer Sollspur beziehungsweise von einer vorgegebenen Geschwindigkeit. Da diese Größen variieren, zieht man je nach Fragestellung die Mittwerte und ggf. die Standardabweichung zur Beurteilung heran. In eher seltenen Fällen erfolgt bezüglich der angesprochenen Abweichungswerte eine Frequenzanalyse.

2.1.4 Qualität bei der Querdynamik

2.1.4.1 Geradeausfahrt

Für die *Qualität bei Querdynamik*, die sog. „Seitenführungsqualität Q_S“ gibt nach obigen Formeln Reichart an:

$$\mathrm{Q} = 1 - \kappa, \tag{2.5}$$

wobei κ der Ausnutzungsgrad des seitlichen Bewegungsspielraums ist:

$$\kappa = \left|\frac{2 \cdot y_q}{b_{FS} - b_{Fzg}}\right| \tag{2.6}$$

2 Die Größen für Aufgabe (Task) T und Ergebnis (Result) R müssen in Absolutbeträgen angegeben werden, da die Qualität nur positive Werte annehmen kann.

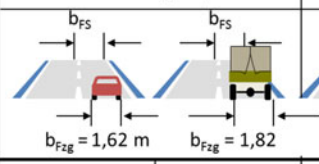
Situation	Fahrbahnbreite b_{FS} = 3,0 m		Fahrbahnbreite b_{FS} = 3,75 m	
				
	b_{Fzg} = 1,62 m	b_{Fzg} = 1,82	b_{Fzg} = 1,62 m	b_{Fzg} = 1,82
Ausnutzungsgrad κ bei 0,5 m Versatz zur Fahrstreifenmitte	72,5%	85%	47%	52%
Spurhaltequalität Q_S	27,5%	15%	53%	48%

Abb. 2.4 Spurhaltequalität bei unterschiedlichen Konstellationen (nach Reichart 2001)

mit:
y_q = Versatz der Fahrspur zur Fahrstreifenmitte,
b_{FS} = Fahrspurbreite,
b_{Fzg} = Fahrzeugbreite.

Abb. 2.4 zeigt die Spurhaltequalität nach Gl. 2.5, wenn man annimmt, dass entsprechend vielfältiger Beobachtung der Fahrer dazu neigt, das Fahrzeug bei Geradeausfahrt ca. 0,5 m nach links versetzt gegenüber der Fahrspurmitte zu halten (bei keinem Versatz wäre nach Gl. 2.6 in Gl 2.5 die Spurhaltequalität = 1).

Die Fahraufgabe ist umso schwieriger, je größer die notwendige Spurhaltequalität ist. Interessanterweise konnte Reichart (2001) finden, dass sich der Faktor 3,2, um den das Fahren eines LKW auf engen Straßen schwieriger ist als auf breiten, sich nahezu in den Unfallzahlen wiederfindet: auf engen Landstraßen geschehen fast 4 mal so viele Lkw-Unfälle wie auf breiten Bundesstraßen.

2.1.4.2 Freie Kurvenfahrt

Freie Kurvenfahrt soll dadurch charakterisiert sein, das keine Geschwindigkeitsbegrenzung und auch keine anderen, die Fahrt beeinflussenden Verkehrsteilnehmer vorhanden sind. Dann ist die Aufgabe T dadurch charakterisiert, dass die Querbeschleunigung nicht größer als die maximal mögliche Querbeschleunigung ist. Die Spurhaltequalität bestimmt sich also in diesem Fall zu

$$Q = 1 - \frac{|a_{qmax} - a_q|}{a_{qmax}} \tag{2.7}$$

mit:
a_{qmax} = maximal mögliche Querbeschleunigung
a_q = gefahrene Querbeschleunigung

Für praktische Fälle kann es in Abhängigkeit von der Fragestellung durchaus sinnvoll sein, bezüglich der maximal möglichen Querbeschleunigung einen Sicherheitsabschlag zu machen (z. B. nur 70 % der physikalisch möglichen Querbeschleunigung) oder sich auf die bekannten Komfortbeschleunigungen zu beziehen, die bei $a_{qmax} \leq 0{,}3\,m/s^2$ liegt (bei höheren Geschwindigkeiten sogar noch niedriger!).

2.1.5 Qualität bei der Längsdynamik

2.1.5.1 Fahrt ohne weitere Verkehrsteilnehmer

Bei freier Fahrt ohne Geschwindigkeitsbegrenzung wird die höchste Längsführungsqualität naturgemäß bei der Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs erreicht. Liegt eine Geschwindigkeitsbegrenzung (welcher Art auch immer) vor, so ergibt sich die Qualität zu

$$Q = 1 - \left| \frac{v_{max} - v_{ist}}{v_{max}} \right| \tag{2.8}$$

mit:
v_{max} = maximal mögliche bzw. gestattete Geschwindigkeit,
v_{ist} = gefahrene Geschwindigkeit.

2.1.5.2 Fahrt mit vorausfahrenden Fahrzeug

Für die *Qualität in Längsrichtung* kann nach Bolte (1991) angeben werden:

$$Q = 1 - \frac{x_{soll} - x_{ist}}{x_{soll}} \tag{2.9}$$

mit

x_{soll} = geforderter Sicherheitsabstand ($x_{soll} = v_{ist} \cdot t_s$; v_{ist} = gefahrene Geschwindigkeit, t_s = Sicherheitszeit, z. B.: $t_s = 1{,}5$ s),

x_{ist} = tatsächlicher Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug.

Die Gl. 2.9 hat nur Gültigkeit, wenn $x_{ist} \leq x_{soll}$. Für den Fall $x_{ist} \geq x_{soll}$ liegt bezüglich der Qualitätsberechnung der Fall freier Fahrt vor.

In Abhängigkeit von der jeweiligen Fragestellung sind im Sinne der Gln. 2.1–2.3 sinnvolle Größen zu definieren. Ist eine Versuchsfahrt durch Phasen charakterisiert, in denen mehrere unterschiedliche Qualitätsgrößen gebildet werden können (z. B. Spurhaltequalität in Kurven und Längsführungsqualität mit vorausfahrendem Fahrzeug), so bestimmt immer die niedrigste Qualität die Gesamtqualität.

In jedem Fall gilt die Gl. 2.4 für die Leistung. Sie hat definitionsgemäß die Einheit 1/sec. In vielen Fällen erhält man eine höhere Leistung bei größerer Geschwindigkeit. Da im Verlauf einer Fahrt die Qualitätsmaße temporären Schwankungen unterworfen sind, sind in Abhängigkeit von der jeweiligen Fragestellung den Verlauf zusammenfassende Berechnungen wie Mittelwert und Standardabweichung, Modalwert, Median, Maximalwerte bzw. Perzentile oder auch Frequenzanalysen angebracht.

2.2 Grundbegriffe der Systemtechnik

Die Systemtheorie hat ihren Ursprung in der Nachrichtenübertragungstechnik (Wunsch 1985). Sie behandelt jeden betrachteten Komplex von (Natur)-Erscheinungen prinzipiell nach dem gleichen Grundschema. Dies beinhaltet den Vorteil, auch den Menschen in seiner Wechselbeziehung mit der technischen Umwelt mit einheitlichen Methoden behandeln zu können. Die Systemtheorie stellt deshalb nicht nur im Bereich der Technik eine Grundlagendisziplin dar (Unbehauen 1993), sondern liefert die gedankliche Basis u. a. auch für Managementmethoden (Daenzer und Huber 1992). Insbesondere eignet sie sich, die Beziehung zwischen dem biologischen Wesen „Mensch“ und dem technischen System „Fahrzeug“ mit weitgehend einheitlichen Modellvorstellungen zu beschreiben. Sie beschäftigt sich mit der Beziehung zwischen den (erwünschten bzw. unerwünschten) Eigenschaften von Elementen, Systemen und Umwelt.

Unter einem *System* versteht man die Gesamtheit der zur selbstständigen Erfüllung eines Aufgabenkomplexes erforderlichen technischen, organisatorischen und/oder anderen Mittel der obersten Betrachtungsebene. Es stellt also eine sinnvolle, einen bestimmten Zweck verfolgende Anordnung von technischen Einheiten allein, eine Anordnung von technischen Einheiten und Menschen oder eine Anordnung nur von Menschen dar, wobei die technischen Einheiten und Menschen untereinander und miteinander in Wechselbeziehung stehen. Jedes System lässt sich aus Elementen zusammengesetzt denken, wobei diese Elemente miteinander in Wechselwirkung stehen (VDI 4005, Blatt 1). Der wesentliche Aspekt der Systemtheorie liegt darin, dass von der physikalischen Natur der Wechselwirkung (z. B. Kraft, elektrische Spannung/Strom, Temperatur, Luft- oder Körperschall usw.) abgesehen wird und nur die darin enthaltene *Information* bzw. die durch das System bewirkte Informationsänderung berücksichtigt wird. Unter Information ist dabei jede Abweichung vom natürlichen (in letzter Konsequenz thermischen) Verteilungszustand von Energie und Materie zu verstehen. Praktisch kann die angestrebte Informationsänderung sowohl in der Veränderung von Materie (Aufgabe der „Arbeitsmaschinen“) als auch in der von Energie (Aufgabe der „Kraftmaschinen“ bzw. „Energieerzeugung“) als auch in der örtlichen Veränderung von Energie/Materie (Aufgabe der Hebezeuge, Förderanlagen, Pumpen, Ventilatoren, Fahrzeuge) oder in der Veränderung von Materie/Energieverteilungen (Aufgabe der informationsverarbeitenden Maschinen, wie z. B. Computer, Datenträger u. ä.) bestehen. Durch die

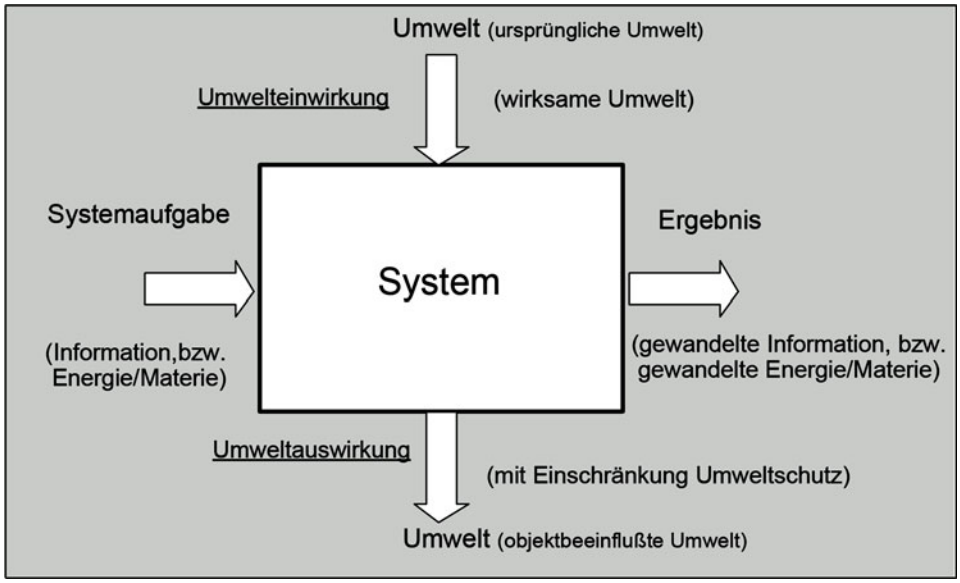


Abb. 2.5 Allgemeine Darstellung eines Systems und der Systemumgebung

Bedienung überträgt der Mensch Information auf die Maschine und sorgt so dafür, dass diese die von ihm erwünschten Effekte bewerkstelligt.

Die gewünschte Änderung kann nur erfolgen, wenn das System mit der sogenannten Systemumgebung im Informationsaustausch steht (sog. „offenes System", siehe Abb. 2.5). Das System besitzt somit eine Eingangsseite („Input"), durch die aus der Umgebung Information (d. h. Energie bzw. Materie) auf einem oder mehreren Kanälen aufgenommen wird und eine Ausgangsseite („Output"), durch welche die gewandelte Information (d. h. gewandelte Energie bzw. Materie) auf einen oder mehreren Kanälen abgegeben wird.

Alle Einwirkungen, die den gewünschten Prozess der Informationswandlung durch das System beeinflussen, werden in diesem Sinne als Umwelt bezeichnet. Man spricht deshalb von Umwelteinwirkung. Von der Vielzahl der möglichen *Umwelteinwirkungen* sind allerdings nur die zu betrachten, welche die Funktion des Systems beeinflussen. Es handelt sich dabei um die sogenannte *„wirksame Umwelt"* (VDI 4005, Blatt 1). Dies erhebt die Frage des sinnvollen Ziehens der Systemgrenzen (die Weltraumstrahlung ist z. B. ein Merkmal der Umwelteinwirkung auf fast alle technischen Erzeugnisse. Sie bleibt aber bei der Konstruktion eines Fahrzeugs unberücksichtigt, da sie nicht zur wirksamen Umwelt eines Automobils gehört). Alle Merkmale der Umwelt, die vor der Existenz des Systems vorhanden waren, werden als *ursprüngliche Umwelt* bezeichnet. Schon die bloße Existenz und erst recht der Betrieb des Systems verändert aber auch die Umwelt, so dass eine neue, *objektbeeinflusste Umwelt* entsteht. Diese Beeinflussung nach außen wird *Umweltauswirkung* genannt, was Fragen des Umweltschutzes einschließt. Gerade in Verbindung mit dem Kraftfahrzeug spielt dieser Aspekt der objektbeeinflussten Umwelt und speziell der Umwelteinfluss in der heutigen Diskussion eine herausragende Rolle und wird schon in naher Zukunft die Technik des Fahrzeugs wesentlich beeinflussen (siehe u. a. die Argumente für die Einführung der Elektromobilität).

Um eine genauere Vorstellung der Funktionen und Wirkungsmechanismen des Systems zu bekommen, denkt man es sich aus *Elementen* zusammengesetzt, wobei diese Elemente miteinander im Informationsaustausch stehen. Durch die *Systemstruktur* werden die Wirkbeziehungen der Elemente untereinander beschrieben. Graphisch werden die Informationskanäle als Pfeile dargestellt, die somit auch

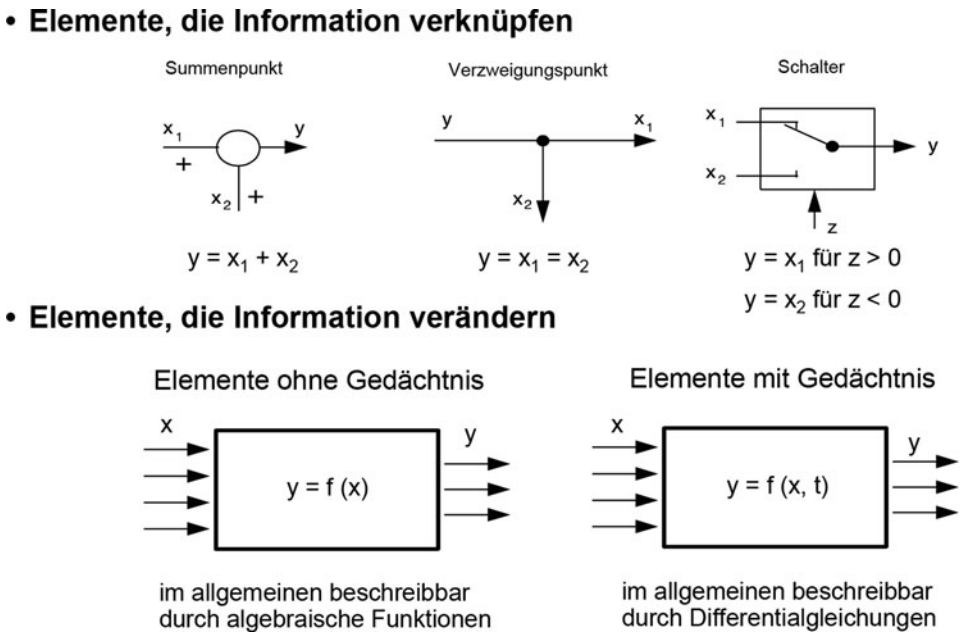


Abb. 2.6 Zusammenstellung typischer Systemelemente und ihrer Funktionen

die Wirkrichtung der Information kennzeichnen. Innerhalb eines solchen Wirkungsgefüges werden die Teile als Elemente bezeichnet, welche die eingehende Information auf charakteristische Weise verändern. Man unterscheidet Elemente, die Information miteinander verknüpfen bzw. Information verteilen (Summenpunkt, Verzweigungspunkt, Schalter), und Elemente, die Information gemäß einer Funktion verändern, wobei solche, bei denen die Zeit keine Rolle spielt („Elemente ohne Gedächtnis"), von jenen, bei denen die Zeit eine Rolle spielt („Elemente mit Gedächtnis"), separiert werden (siehe Abb. 2.6). Die jeweiligen Funktionen der Elemente können

- mathematisch beschrieben werden (z. B. bei vielen technischen Systemelementen) oder,
- in Form von Graphen dargestellt werden (z. B. in speziellen Fällen von sog. Nichtlinearitäten) oder,
- verbal dargelegt werden (z. B. bei Funktionen, die der Mensch erfüllt).

Das Vorhandensein von Elementen mit Gedächtnis bewirkt eine ganz spezifische *Systemdynamik*, die in einfachen Fällen durch Differentialgleichungen bzw. in komplexeren Fällen durch Frequenzgänge beschrieben werden kann (siehe ▶ Abschn. 2.3).

Unter dem dargestellten Aspekt kann sowohl die Maschine als auch der Mensch als Bestandteil eines *„Mensch-Maschine-Systems"* angesehen werden. Abbildung 2.2 ist ein Beispiel für eine derartige Darstellung nach Regeln der Systemtheorie. Abbildung 2.7 zeigt die beiden möglichen Verschaltungsprinzipien von Mensch und Maschine. Eine *serielle Verschaltung* beschreibt die Variante, dass der Mensch die Information der Aufgabenstellung aufnimmt, in adäquater Weise umwandelt und über die Stellteile auf die Maschine überträgt. Diese verändert – oft unter Wandlung von separat zufließender Energie – die Eingangsinformation in das beabsichtigte Ergebnis (sogenanntes *aktives System*). Der traditionelle Prozess des Autofahrens entspricht diesem Bild: die Aufgabe liegt in der Straßenführung und in der sich dort darstellenden Situation, das Ergebnis ist die aktuelle Position des Fahrzeugs auf der Straße. Im Allgemeinen kann der Mensch dabei das Ergebnis beobachten und aus dem Vergleich mit der Aufgabe neue Eingriffe über die Stellteile ableiten. Es handelt sich also um einen *geregelten* Prozess

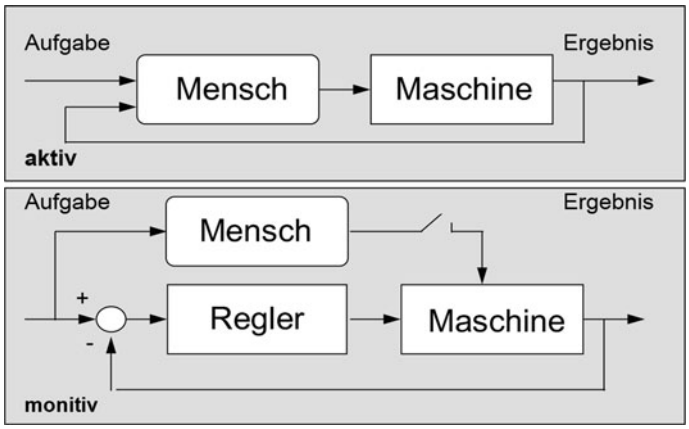


Abb. 2.7 Systemstruktur eines Mensch-Maschine-Systems *oben:* Serielle Schaltung (aktives System), *unten:* parallele Schaltung (monitives System)

(s. o.). Wenn die Zeit zwischen Stellteileingriff und Erhalt des Ergebnisses jedoch zu groß wird, muss er die Stellteilbetätigung allein aus der Aufgabe ableiten. Man spricht nun von einer *Steuerung* (wie bereits angesprochen, kann das Autofahren als eine Mischung von Steuerung und Regelung angesehen werden). Der Prozess kann durch Umwelteinflüsse gestört werden, wobei nun genauer festzulegen ist, ob sich diese Störung auf den Menschen und seine Fähigkeiten (z. B. Lärm), auf die Übertragung zwischen Mensch und Maschine (z. B. mechanische Schwingungen) und auf die Maschine selbst (z. B. Seitenwind oder auch Störung der Funktion durch elektromagnetische Felder) bezieht.

Bei der *parallelen Verschaltung* von Mensch und Maschine kommt dem Menschen eine Beobachtertätigkeit zu (sogenanntes *monitives System*). Die Maschine, als Automat ausgelegt, wandelt selbstständig die die Aufgabe beschreibende Information in das gewünschte Ergebnis. Falls der Mensch unzulässige Abweichungen bzw. sonstige Unregelmäßigkeiten beobachtet, greift er in den Prozess ein (durch den Schalter symbolisiert) und unterbricht den Vorgang bzw. übernimmt die Regelung von Hand Es sind auch andere Interaktionsformen denkbar; siehe hierzu ► Abschn. 2.6). Gegebenenfalls verstellt er auch Parameter an dem System, um so den gewünschten Effekt zu erzielen (z. B. stellt das Fahren mit ACC bezüglich der Längsdynamik eine solche parallele Verschaltung von Fahrer und Fahrzeug dar; falls dem Fahrer die von dem System eingeregelten Abstände zu groß erscheinen, kann er den Parameter „Sicherheitszeit" während des Regelungsvorgangs verstellen)[3]. Auch der automatisierte Prozess kann durch die Umwelt gestört werden, wobei wieder die typischen Ansatzpunkte der Mensch, die Maschine und die Übertragungswege sind.

Es gibt zwei grundsätzlich unterschiedliche Behandlungsweisen der Systemstruktur. Einerseits kann man die oben genannte Verschaltung sowie die Eigenschaften der einzelnen Systemelemente nutzen, um die Qualität des Systems, das heißt das Maß der Übereinstimmung von Aufgabe und Ergebnis zu kalkulieren. Nachdem im Allgemeinen die Aufgabe zeitabhängig ist und zudem Systemelemente mit Gedächtnis involviert sind, ist auch diese Qualität zeitabhängig. Man betrachtet also die *Systemdynamik*. Das Charakteristikum dieser Betrachtungsweise ist das in der Technik übliche Paradigma des „Ursache-Wirkung-Prinzips". Viele Methoden zur Berechnung dafür stammen aus dem Bereich der so genannten *Regelungstechnik*.

Eine andere Betrachtungsweise sieht von dem zeitlichen Aspekt völlig ab und interessiert sich dafür, ob die einzelnen Systemelemente überhaupt funktionieren. Die Betrachtung bezieht sich also darauf, ob ein Systemelement in dem Gefüge der

3 Die meisten Bedienvorgänge der sekundäre und tertiären Fahraufgabe sind unter diesem Aspekt der parallelen Verschaltung von Mensch und Maschine zu verstehen: selbst wenn man „nur" das Licht oder den Scheibenwischer einschaltet, vertraut man darauf, dass der der durch den Schaltvorgang initiierte Prozess korrekt selbstständig abläuft und kontrolliert quasi nur den Erfolg.

Systemstruktur fehlerhaft arbeitet. Man versucht die Wahrscheinlichkeit für einen solchen Fehler abzuschätzen und in diesem Zusammenhang die Fehlerwahrscheinlichkeit des Gesamtsystems. Es geht also in diesem Fall um die *Systemzuverlässigkeit* („Wie sehr kann ich mich darauf verlassen, dass alles in Ordnung ist?"). Die in diesem Bereich angewendeten Methoden sind die der so genannten *Probabilistik*.

Für beide Betrachtungsweisen gilt: Unabhängig davon, ob man sich bei der Behandlung technischer Abläufe über die implizit bzw. explizit gewählten Systemgrenzen klar ist, besteht gerade darin eine nicht zu unterschätzende Problematik. Man kann zwar alle nicht genauer zu analysierenden Einflüsse der Systemumwelt zurechnen; nur solche Umweltfaktoren, deren Einwirkungsfeld und dessen Wirkungsmechanismus man kennt, lassen aber eine Prognose über mögliche Einwirkungen, Folgen oder Schädigungen zu. Dinge, die „vergessen" worden sind, sind auch nicht berücksichtigt. Sowohl aus ökonomischen Gründen als auch aus Gründen der Machbarkeit und des aktuellen Kenntnisstandes bleiben aber bei jeder Systembetrachtung gewisse Einflüsse unberücksichtigt. Darin liegt sicherlich ein nicht zu leugnendes und auch nicht abzuschätzendes Risiko.

2.3 Systemdynamik

2.3.1 Übergangsfunktionen und Frequenzgang

Ziel einer dem technischen Design dienenden Modellierung ist eine mathematische Beschreibung menschlicher Eigenschaften, da so eine kalkulatorische Anpassung der ebenfalls mit mathematischen Methoden beschriebenen technischen Elemente machbar erscheint. Die Regelungstheorie bietet für die Behandlung kontinuierlicher informatorischer Prozesse hierfür einen Formalismus, der im Rahmen dieses Kapitels allerdings nur andeutungsweise behandelt werden kann.

Grundlage für diese Beschreibung ist das einfache Regelkreisbild der Abb. 2.2. Generell wird auch die Definition 1 benutzt, um die so genannten Führungseigenschaften des Regelkreises bei sich zeitlich ändernder Führungsgröße und zeitlich schwankenden Störgrößen zu charakterisieren. Es seien in Abb. 2.2 die Aufgabe (Führungsgröße) mit w(t), das Ergebnis (Nachführgröße) mit x(t), sowie die Regelabweichung mit $x_W(t)$ und die Stellgröße mit y(t) bezeichnet[4]. Die im Allgemeinen recht komplexen Eigenschaften des Reglers (Fahrer) seien mit $\mathbf{V_R}$ (Verstärkungsfaktor Regler) und die der Regelstrecke (Fahrzeug) mit **S** (Systemparameter der Regelstrecke) gekennzeichnet, wobei diese Größen im allgemeinen zeitabhängige Eigenschaften dieser Systemelemente beinhalten, auf die hier zunächst nicht näher eingegangen werden soll. Mit diesen stark vereinfachten Bezeichnungen lassen sich folgende Beschreibungen durchführen:

1) die Stellteilbetätigung y(t) des Fahrers, veranlasst durch die Regelabweichung x_W:

$$y(t) = \mathbf{V_R} \cdot x_w(t)$$

2) die Reaktion x(t) (seitliche Abweichung bzw. Geschwindigkeit) des Fahrzeugs aufgrund der Stellteilbetätigung y(t):

$$\mathbf{S} \cdot x(t) = y(t)$$

Die Eigenschaften des Regelkreises werden durch folgende Formeln beschrieben:

3) Regelabweichung:

$$x_W(t) = w(t) - x(t)$$

4) Qualität:

$$Q = \frac{x(t)}{w(t)}$$

Mit elementarer Mathematik lässt sich durch Einsetzen von Zeile 1) und 2) in 3) und 4) finden:

$$Q = \frac{V_R}{S + V_R} \tag{2.10}$$

4 Anm.: das in Klammern gesetzte „t" soll charakterisieren, dass sich die jeweilige Größe in Abhängigkeit von der Zeit verändert.

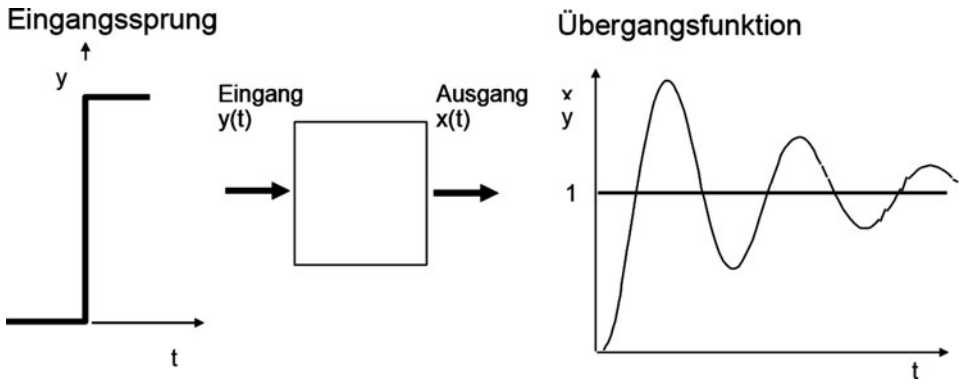


Abb. 2.8 Reaktion eines Pendels auf eine sprungförmige Anregung

Gleichung 2.10 beschreibt eine allgemeine Eigenschaft jedes Regelkreises: bei beliebigen Eigenschaften der Regelstrecke lässt sich eine gewünschte Übereinstimmung zwischen Führungsgröße und Nachführgröße ($Q \approx 1$) erreichen, wenn man den Verstärkungsfaktor des Reglers hinreichend groß macht. In der Praxis sind dem aber Grenzen gesetzt, die einerseits in den Eigenschaften des Reglers begründet liegen (u. a. hat der Regler Mensch beispielsweise nur ein begrenztes Auflösungsvermögen bei der Wahrnehmung von Regelabweichungen, was allein eine beliebig hohe Verstärkung verhindert) und anderseits in der Forderung nach Stabilität des Regelkreises, da mit zunehmender Verstärkung des Reglers durch dynamische Eigenschaften der Systemelemente (siehe unten) ein Aufschaukeln der Regelabweichung bewirkt wird.

Aufgabe des Regelkreises ist nun aber gerade, der zeitlich sich verändernden Führungsgröße zu folgen und/oder zeitlich sich ändernde Störgrößen auszuregeln. Damit spielen die dynamischen Eigenschaften der einzelnen Systemelemente und des gesamten Regelkreises eine dominante Rolle. Um diese dynamischen Eigenschaften zu beschreiben bzw. zu testen, bedient man sich zweier unterschiedlicher einander ergänzender Verfahren, wodurch zwei Extreme des Verhaltens der Systemelemente bzw. des gesamten Regelkreises beschrieben werden: durch die sog. *Übergangsfunktion* wird die Reaktion auf eine sich plötzlich einstellende Änderung (z. B. Abfangen des Fahrzeugs bei einer plötzlich auftretenden Windböe) und durch den *Frequenzgang* das Verhalten im so genannten eingeschwungenen Zustand (z. B. Folgen einer kurvenreichen Landstraße) beschrieben. Bei beiden Verfahren wird zur mathematischen Beschreibung der oben dargestellte Grundgedanke der Qualität benutzt: ob bezogen auf den gesamten Regelkreis oder bezogen auf ein einzelnes Systemelement, immer wird das Verhältnis von Ausgangssignal zu Eingangssignal gebildet. Im Fall der Übergangsfunktion werden diese Größen in Abhängigkeit von der Zeit und im Fall des Frequenzgangs in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt.

2.3.2 Übergangsfunktion

Als Testfunktion wird bei der Übergangsfunktion eine sprungförmige Änderung am Eingang des Elements herangezogen. Es wird dann die zeitliche Reaktion darauf an der Ausgangsseite untersucht. Die dort gefundenen Größen werden immer auf die Größe des Eingangssprungs bezogen (s. o.), um so von dessen absoluter Größe unabhängige normierte Angaben zu erhalten, die nur das zeitliche (= dynamische) Verhalten wiedergeben. Dies kann theoretisch mit mathematischen Methoden geschehen oder praktisch, indem ein entsprechendes Experiment gemacht wird. Am Beispiel eines angestoßenen Pendels (= sprungförmige Änderung am Eingang) soll dies veranschaulicht werden (siehe Abb. 2.8). Auf die sprungförmige Anregung schwingt das Pendel mit über der Zeit abnehmender Amplitude (wegen der Dämpfung). Diese auf die Größe des Eingangssprungs bezogene zeitliche Funktion stellt die Übergangsfunk-

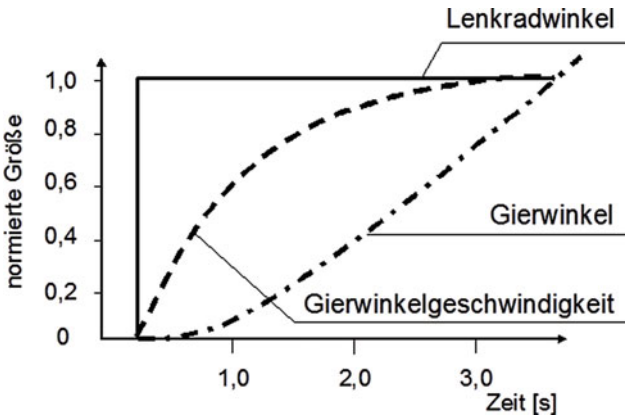


Abb. 2.9 Reaktion eine Kraftfahrzeugs auf eine sprungförmige Änderung des Lenkradwinkels

tion dar. Da das zeitliche Verhalten des Pendels mittels Differentialgleichungen beschrieben werden kann, kann die Übergangsfunktion auch als eine spezielle Lösung dieser Differentialgleichung berechnet werden.

Ein besonderer Aspekt des dynamischen Verhaltens eines Fahrzeugs wird üblicherweise auch auf der Basis dieser Überlegung getestet: nach dem Anreißen und anschließenden Festhalten des Lenkrades kann nun der mit einer gewissen Verzögerung (üblicherweise um 200 ms, besonders „handliche" bzw. „sportliche" Fahrzeuge drücken diesen Wert auf unter 100 ms) einsetzende Gierwinkel (Drehung um die Hochachse) beobachtet werden, der erst langsam, dann nach einer gewissen Zeit mit konstanter Geschwindigkeit zunimmt. Entsprechend muss die Gierwinkelgeschwindigkeit zunächst stark zunehmen und dann einem Endwert zustreben, der konstante Kurvenfahrt bedeutet und gemäß der oben angesprochenen Normierung hier durch den Wert „1" beschrieben ist (siehe Abb. 2.9). Es ist die Kunst des Fahrwerkstechnikers dabei, das Überschwingen, wie es in Abb. 2.8 dargestellt ist, durch Dämpfung zu verhindern, ohne dabei die Lenkung allzu träge zu machen.

Auch das Verhalten des Menschen auf sprungförmige Änderungen kann so getestet werden. Es sei hier auf die so genannten Tracking-Experimente verwiesen, die vor allem in den 60er und 70er Jahren des letzten Jahrhunderts vielerorts durchgeführt wurden (siehe hierzu Poulton 1974; Sheridan et al. 1974; Wickens 1984). Eine allgemeine Erkenntnis aus diesen Experimenten ist die typische Antwortreaktion des menschlichen Reglers, die in Abb. 2.10 wiedergegeben ist: Nach einer Reaktionszeit, die im Wesentlichen durch die Geschwindigkeit der Signalübertragung in den Nervenbahnen gegeben ist (sie liegt typischerweise bei ca. 180 ms), zeigt sich ein „geschmeidiger" Anstieg, der auf die Trägheiten des Hand-Arm-Systems zurückgeführt werden kann. Er hat „*integrierende*" Eigenschaft und wird deshalb regelungstechnisch als „I-Verhalten" bezeichnet. Es zeigt sich in entsprechenden Experimenten, insbesondere bei absolut überraschendem Auftreten des Eingangssprungs (z. B. Reaktion auf ein die vorgesehene Fahrspur unerwartet querendes Hindernis) ein typisches Überschwingen: der Mensch reagiert nur auf die Änderung nicht auf die Größe des Sprungs. Dieses „*differenzierende*" Verhalten wird als D-Verhalten bezeichnet. Im Verlauf von ca. 500 ms wird dann der durch die Eingangsgröße geforderte Wert gefunden. Da der Regler Mensch nun „*proportional*" auf diese Größe reagiert, wird dies P-Verhalten genannt. Insgesamt zeigt der Mensch für Änderungen das Verhalten eines so genannten PID-Reglers, wobei allerdings der jeweilige P-, I- und D-Anteil starken Schwankungen unterliegt. Es muss an dieser Stelle erneut darauf hingewiesen werden, dass das in Abb. 2.10 wiedergegebene Antwortverhalten einen „typischer" Verlauf darstellt, d. h. von diesem Verlauf gibt es in der Praxis erhebliche individuelle und situationsabhängige Abweichungen.

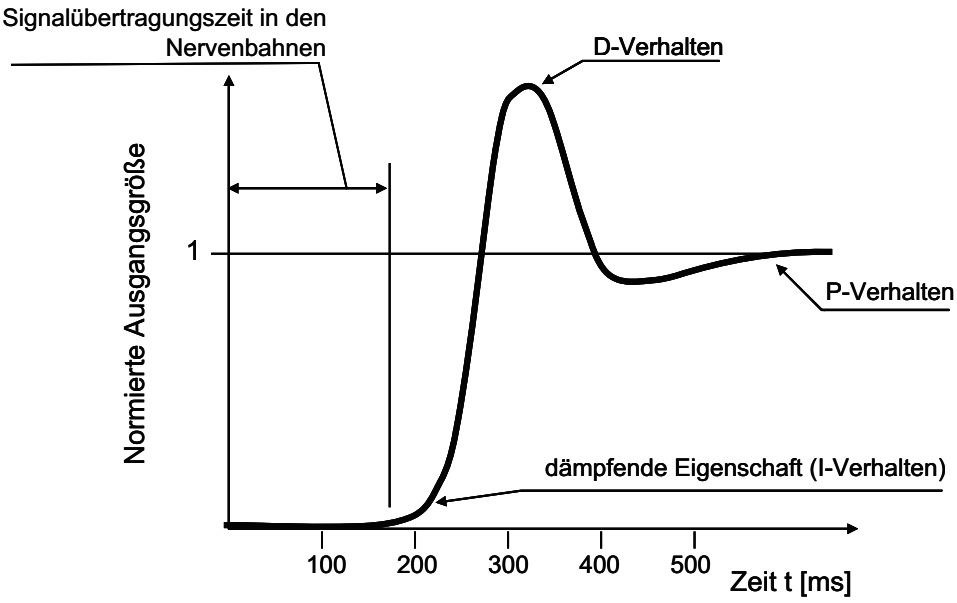


Abb. 2.10 Typische Reaktion des Menschen auf ein sprungförmiges Eingangssignal

2.3.3 Frequenzgang

Mit dem Frequenzgang F(p) wird im Gegensatz zur Übergangsfunktion der eingeschwungene Zustand bei einer sich kontinuierlich verändernden aber nicht durch Sprünge charakterisierten Eingangsgröße beschrieben. Er ist durch das frequenzabhängige Ausgangssignal y(p) in Relation zum frequenzabhängigen Eingangssignal x(p) definiert:

$$F(p) = \frac{x(p)}{y(p)} \tag{2.11}$$

Die Frequenz wird dabei als sog. „imaginäre Frequenz" eingeführt, wobei die sog. Kreisfrequenz ω (s. u.) zu diesem Zweck mit der imaginären Zahl ($i = \sqrt{-1}$) multipliziert wird:

$$p = i \cdot \omega. \tag{2.12}$$

Wenn man wieder das Beispiel des Pendels heranzieht, so würde der Frequenzgang das Verhalten charakterisieren, das sich ergibt, wenn das Pendel kontinuierlich bewegt wird, beispielsweise in einem schwankenden Schiff. Um dieses Verhalten zu beschreiben, benutzt man als Testfunktion am Eingang eine sinusförmige Anregung, deren Frequenz im interessierenden Bereich langsam verändert wird (ein Fachausdruck aus der Nachrichtentechnik dafür ist „Durchwobbeln"). Am Ausgang zeigt sich dann im eingeschwungenen Zustand die gleiche Frequenz allerdings mit anderer Amplitude und gegenüber der Eingangsgröße mit einem zeitlichen Versatz.

Hier zeigt der Vorteil der Nutzung der imaginären Frequenz. Spannt man nämlich eine Ebene aus den Ästen Realteil *Re* und Imaginärteil *Im* auf und lässt dort einen Punkt eine Kreisbahn mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega = \phi/t$ umlaufen, so erhält man die in der Realität sichtbare Sinusbewegung als Projektion dieser Kreisbewegung auf die Realachse (siehe Abb. 2.11a). Die Frequenz ν stellt die Häufigkeit eines wiederkehrenden Ereignisse pro Zeiteinheit dar. Da der Umfang des Einheitskreises in der imaginären Ebene 2π ist, ergibt sich der Zusammenhang von Frequenz ν und Kreisfrequenz ω zu:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu \tag{2.13}$$

Angewendet auf das Beispiel des mit einer Sinusbewegung angeregten Pendels bedeutet das: Da der

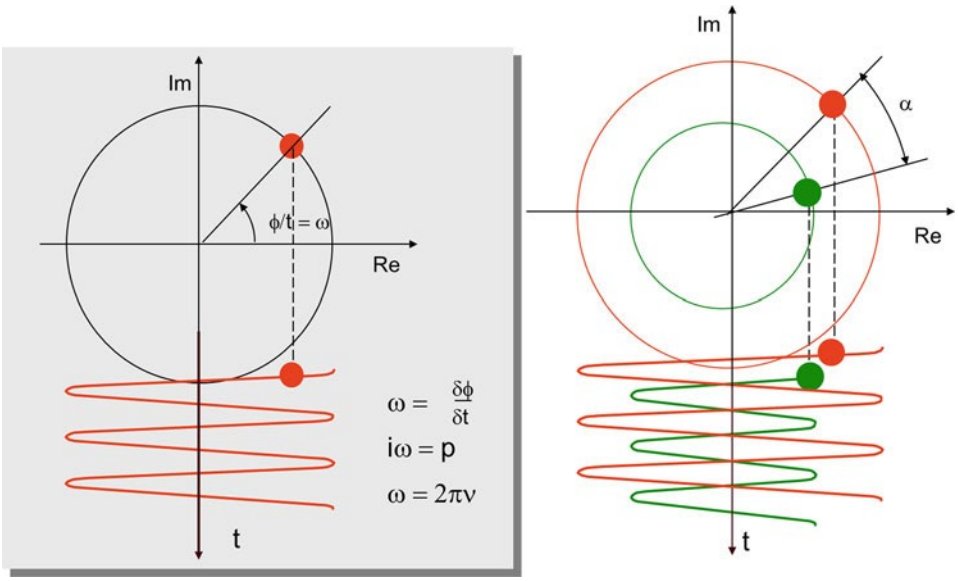


Abb. 2.11 **a** Sinusschwingung dargestellt als Kreisbewegung in der imaginären Ebene, **b** Anregendes Eingangssignal (*rot*) eines Pendels (dynamisches System zweiter Ordnung) und reagierendes Ausgangssignal (*grün*)

augenblickliche Wert des sinusförmigen Eingangssignals durch einen Winkelwert beschrieben werden kann, kann auch der augenblickliche Wert am Ausgangssignal durch einen Winkelwert beschrieben werden. Der zeitliche Versatz wird also durch eine entsprechende Winkeldifferenz zwischen diesen beiden Werten wiedergegeben, den sog. Phasenwinkel α. Die Amplitude der Ausgangsfrequenz unterscheidet sich zugleich von der der Eingangsfrequenz, die definitionsgemäß auf den Wert „1" gesetzt wird. Die in der Realität sichtbare Bewegung des Ausgangssignals ist ebenfalls durch die Projektion dieser Bewegung auf die Realsachse charakterisiert (Abb. 2.11b).

Um die Abhängigkeit von Eingangssignal und Ausgangssignal beim „Durchwobbeln" der Frequenz zu veranschaulichen, werden zwei Diagramme übereinander dargestellt, die beide auf der Abszisse die Frequenz enthalten (Abb. 2.12). Üblicherweise wird die Frequenz im logarithmischen Maßstab in Form der sog. Kreisfrequenz ω dargestellt. Das obere Diagramm zeigt auf der Ordinate das Amplitudenverhältnis von Ausgang zu Eingang. Es stellt den sog. *Amplitudengang* G(ω) dar. Auch der Amplitudengang wird üblicherweise im logarithmischen Maßstab dargestellt. Wenn der jeweilige Wert mit dem Faktor 20 multipliziert wird, benutzt man dafür die (dimensionslose) Bezeichnung Dezibel (dB; G(ω) [dB] = 20 · log (Ausgang(ω)/Eingang(ω)). Das untere Diagramm stellt auf seiner Ordinate den zugehörigen Verlauf des Phasenwinkels α dar. Diese Kombination von Diagrammen wird *Bodediagramm* genannt[5]. Ein Bodediagramm findet sich in der Abb. 2.12 für das Beispiel des Pendels. An ihm möge die Idee des Frequenzgangs veranschaulicht werden: Regt man das Pendel mit einer sinusförmigen Schwingung sehr niedriger Frequenz an, so wird das Pendel mit dieser Frequenz und auch gleicher Amplitude der Anregung folgen. Im oberen Teil (Amplitudengang) des Bodediagramm, wird dies durch den Wert „0 dB" (log 1 = 0) charakterisiert. Es stellt sich kein Phasenverzug ein. In unteren Diagramm des Phasengangs liest man deshalb den Wert α = 0 ab. Erhöht man nun die Frequenz, so steigt der Wert des Amplitudengangs an, bis er im Bereich der sog. Eigenresonanz einen Maximalwert hat. An dieser Stelle ist der Phasenver-

5 Anm.: es gibt noch weitere Diagrammformen, mit denen das dynamische Verhalten im eingeschwungenen Zustand dargestellt werden kann, die aber für das „erste Kennen lernen" weniger anschaulich sind.

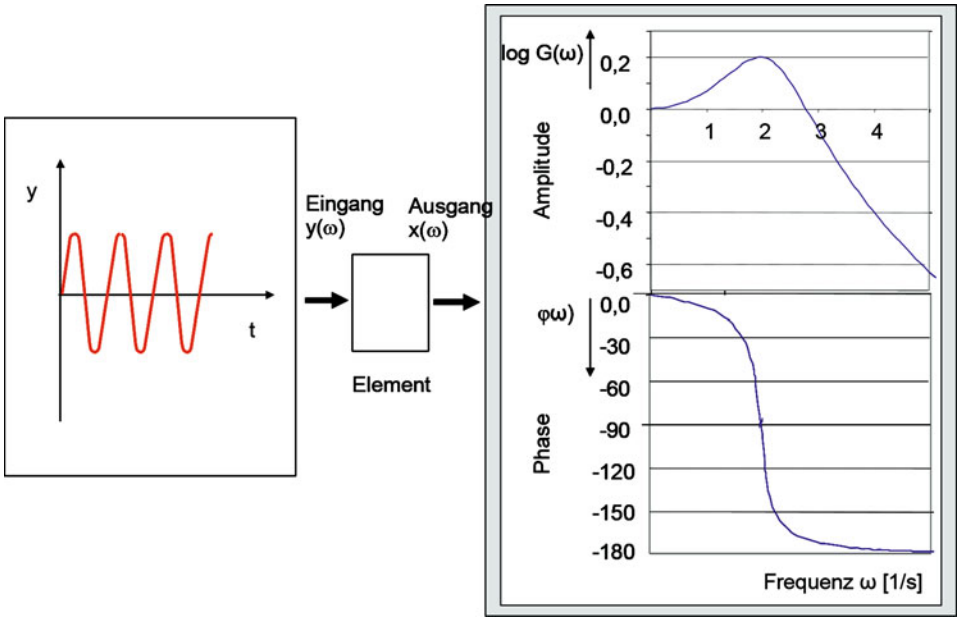


Abb. 2.12 Frequenzgang eines Pendels, dargestellt durch das Bodediagramm (*rechts*)

zug $\alpha = -90°$. Oberhalb der Eigenresonanz fällt das Amplitudenverhältnis kontinuierlich ab. Der Grund dafür ist, dass das Pendel wegen seiner Eigenträgheit der zunehmenden Eingangsfrequenz immer weniger folgen kann. Zugleich nähert sich der Phasenverzug dem Wert $\alpha \approx -180°$.

Das Bodediagramm der Abb. 2.12 lässt sich aus der mathematischen Beschreibung des Pendels mittels Differentialgleichungen berechnen. Man nennt das „parametrisches" Verfahren, da man die entsprechenden physikalischen Parameter (z. B. Masse, Dämpfung u. ä.) direkt aus den Eigenschaften des Übertragungselementes bestimmt.

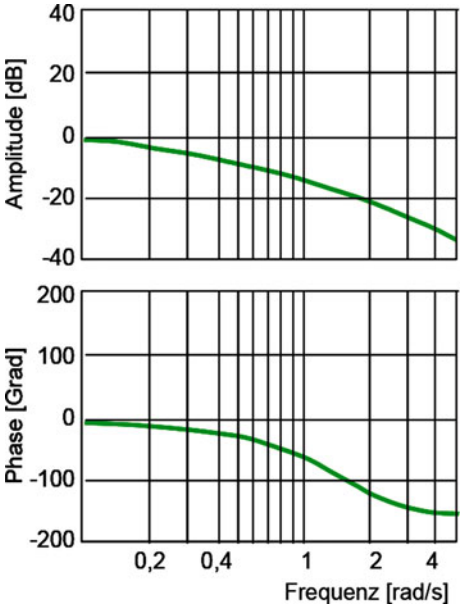
Abbildung 2.13 zeigt für die Reaktion eines Kraftfahrzeugs auf die Lenkbewegung das entsprechende Bodediagramm. Es ist ebenso zu lesen, wie das zuvor dargestellte Beispiel des Pendels: auf sehr langsame Lenkbewegungen reagiert das Fahrzeug exakt ($G(\omega_{\text{sehr klein}}) \approx 0\,\text{dB}$) und ohne Phasenverzug ($\varphi_{\text{sehr klein}} \approx 0°$). Mit zunehmender Frequenz der Lenkbewegung kann das Fahrzeug aufgrund seiner Trägheit nicht folgen, es reagiert immer weniger auf die Bewegungen, wobei sich der Phasenverzug wie beim Pendel dem Wert $-180°$ nähert. Fahrzeuge werden heute bezüglich der Querdynamik so ausgelegt, dass die (latent vorhandene) Eigenfrequenz weitgehend weggedämpft ist; das Fahrzeug besitzt eine immanente Eigenstabilität. Die hier getroffene Aussage gilt allerdings immer nur so lange, wie die auftretenden Kräfte auch tatsächlich, bedingt durch die gegebenen Reibungsverhältnisse, auf die Straße übertragen werden können. Das Überschreiten der maximal möglichen Reibungskraft, die bekanntlich erheblich von den jeweiligen Straßen- und Witterungsverhältnissen abhängt, stellt regelungstechnisch eine Nichtlinearität dar und ist mit den hier beschriebenen Methoden nicht ohne weiteres zu behandeln.

In vielen Fällen ist eine Herleitung aus den einzelnen Bestandteilen des Übertragungselementes zu komplex oder gar unmöglich, wie es z. B. beim Menschen der Fall ist, wo man sich sehr schwer täte, die differenzierenden und integrierenden Eigenschaften der Informationsverarbeitung auf physikalische Elemente zurückzuführen. In solchen Fällen kann man den Frequenzgang auch experimentell bestimmen, entweder indem man den Eingang tatsächlich „durchwobbelt" und das zugehörige Ausgangssignal misst oder indem man als Eingangsgröße ein Mischsignal verwendet, das einen

möglichst großen Frequenzbereich enthält. Durch eine sog. Fourierzerlegung[6] lassen sich die enthaltenen Frequenzen extrahieren, die das scheinbar zufällige Signal beschreiben. Das gleiche kann man mit dem experimentell simultan gemessenen Ausgangssignal machen. Durch spezielle Korrelationsmethoden kann man nun aus diesen beiden Signalen das Bodediagramm in grafischer Form ableiten, das die dynamischen Eigenschaften im eingeschwungenen Zustand beschreibt. Diese Vorgehensweise wird *„nichtparametrisches Verfahren"* genannt. Es liefert nur das Bodediagramm. Es ist nun Aufgabe des interpretierenden Wissenschaftlers, die Kenntnis von Eigenschaften physikalisch bekannter Übertragungselemente zu nutzen, um diese so zu kombinieren, dass sie das gleiche Verhalten wie das in Form des Bodediagramms beobachtete zeigen. Somit wird indirekt das Übertragungsverhalten des unbekannten Elementes (also z. B. des Menschen) modelliert. Auf diese Weise ist beispielsweise das auch heute noch vielfältig genutzte regelungstechnische Modell nach Tustin (1944) entwickelt worden (siehe ▶ Abschn. 3.3).

Das Arbeiten mit Frequenzgängen hat gegenüber der Übergangsfunktion einen erheblichen Vorteil. Es lassen sich damit auch komplizierte Verknüpfungen von Einzelfrequenzgängen mathematisch behandeln. Würde man nämlich in Gl. 2.10) für das Verhalten des Reglers (Mensch) $\mathbf{V}_R$ und der Regelstrecke **S** die entsprechenden beschreibenden Differentialgleichungen einsetzen, stieße man sehr bald an die Grenzen der algebraischen Auflösungsmöglichkeiten. Für das Zusammensetzen von Einzelfrequenzgängen zu einem komplexen Gebilde gelten demgegenüber recht einfache Regeln. Im hier interessierenden Zusammenhang soll nur das Hintereinanderschalten und die sog. negative Rückkopplung dargestellt werden. ◘ Abbildung 2.14 zeigt die entsprechenden Strukturbilder.

Mit einfacher Mathematik kann man die jeweiligen resultierenden Frequenzgänge berechnen, wenn man berücksichtigt, dass definitionsgemäß



◘ **Abb. 2.13** Bodediagramm für die Querdynamik (Reaktion auf die Lenkbewegung) eines Kraftfahrzeugs

der jeweilige Gesamtfrequenzgang F_{ges} durch das Verhältnis von frequenzabhängigem Ausgangssignal y(p) und Eingangssignal x(p) bestimmt ist (siehe Gl. 2.11; um den Effekt des Phasenverzugs mathematisch einfach und zugleich korrekt behandeln zu können, muss die Frequenz dabei als imaginäre Frequenz beschrieben werden; siehe Gl. 2.12).

Es ergibt sich dann für das Hintereinanderschalten:

$$F_{ges} = F_1(p) \cdot F_2(p) \tag{2.14}$$

und für die negative Rückkopplung:

$$F_{ges} = \frac{F_1(p)}{1 + F_1(p) \cdot F_2(p)} \tag{2.15}$$

Wie ◘ Abb. 2.15 zu entnehmen ist, setzt sich der geschlossene Regelkreis aus dem Hintereinanderschalten des Frequenzgangs des Reglers F_R und der Regelstrecke (Maschine) F_M (sog. „offener Regelkreis"), was in Gl. 2.15 dem Frequenzgang F_1 entspricht, sowie einer frequenzunabhängigen Rückkopplung zusammen, was durch $F_2 = 1$ be-

6 Die Fourierzerlegung ermöglich es, ein Frequenzgemisch durch eine additive Zusammensetzung von einzelnen Frequenzen, die jeweils mit unterschiedlicher Amplitude vorkommen, darzustellen.

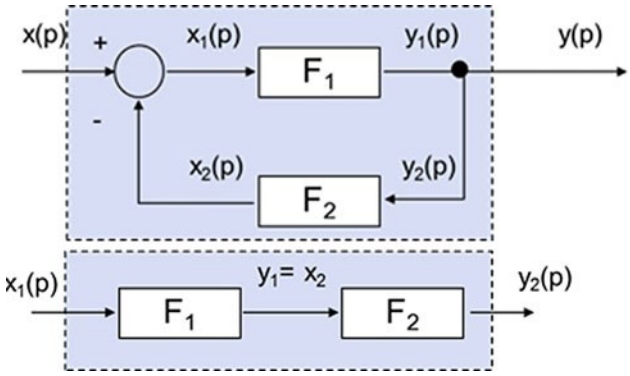


Abb. 2.14 Serielle und parallele Verschaltung von zwei Frequenzgängen

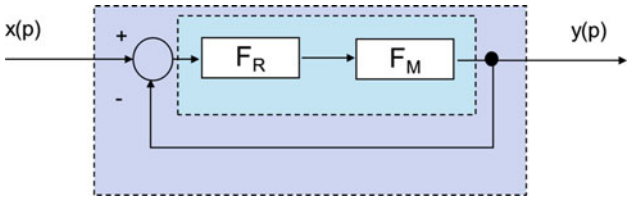


Abb. 2.15 Schaltbild für den geschlossenen Regelkreis (siehe auch Abb. 2.2)

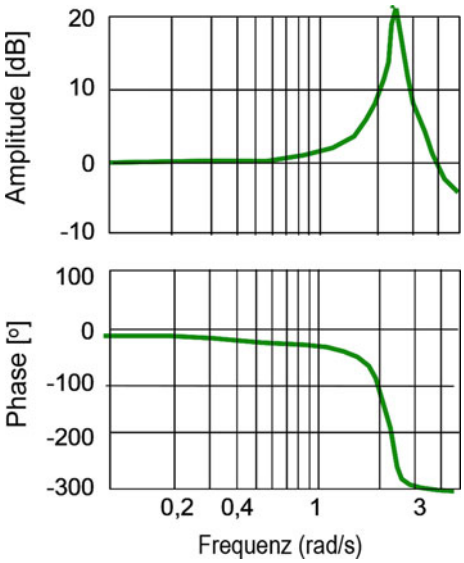


Abb. 2.16 Bodediagramm des Frequenzgangs der Querdynamik des geschlossenen Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises

schrieben werden kann. Damit ergibt sich für den Frequenzgang F_{RK} des geschlossenen Regelkreises:

$$F_{RK} = \frac{F_R(p) \cdot F_M(p)}{1 + F_R(p) \cdot F_M(p)} \tag{2.16}$$

Mit Hilfe dieser Gleichung und einiger aus experimenteller Beobachtung gefundener Parameter für die Modellierung des Menschen (siehe ▶ Abschn. 3.3) ist es damit möglich, den geschlossenen Frequenzgang der Querdynamik bestehend aus Fahrer und Fahrzeug zu bestimmen und das entsprechende Bodediagramm zu erstellen (siehe Bolte 1991). Abbildung 2.16 zeigt das Ergebnis, wobei das in Abb. 2.13 dargestellte Fahrzeugverhalten zugrunde liegt. Es fällt auf, dass dieser Frequenzgang eine deutliche Resonanzspitze bei $\omega \approx 2{,}5$ rad/s besitzt, was einer Frequenz von $\nu \approx 0{,}4$ Hz entspricht.

Das so sehr gefürchtete „Schleudern des Fahrzeugs" ist also nicht, wie allgemein angenommen wird, eine Eigenschaft des Fahrzeugs, das gemäß Abb. 2.13 eine Eigenstabilität besitzt, sondern eine des geschlossenen Regelkreises, wobei der Schleudervorgang selbst durchaus durch einen nichtlinearen Effekt (z. B. kurzfristiges Überschreiten der Haftgrenze), aber auch durch ungünstige Verkehrskonstellationen, die zu einer entsprechenden hektischen Reaktion Anlass geben, initiiert werden kann. Das gefürchtete Aufschaukeln kommt dann aber wesentlich durch das zeitliche Verzögern des Menschen in Verbindung mit den Fahrzeugträgheiten zustande. Wie Bolte (1991)

zeigt, kann durch adäquate haptische Rückmeldung im Steuerorgan (z. B. entsprechende Steer-by-Wire (SbW) Auslegung des Lenkrades oder sog. „Aktives Bedienelement"; siehe auch Huang 2004) dieser Effekt reduziert werden, da der haptische Sinneskanal über den sog. Eigenreflexbogen[7] praktisch um den Faktor 4 schneller anspricht als die optische und kinästhetische Rückmeldung (Gillet 1999). Auch die Wirkung von elektronischen Stabilisierungshilfen wie ESP[8] muss unter dem Aspekt dieser Überlegung relativiert werden: sie reduziert lediglich die Wirkung der Schleuderinitiierung. Wie wirkungsvoll aber bereits diese Maßnahme ist, zeigt die eindeutige Auswirkung der Einführung von ESP auf die Unfallstatistik (Unselt et al. 2004). Könnte man nun den Schleudervorgang selbst noch „zähmen", wäre zweifellos eine weitere bedeutende Verbesserung zu erwarten.

Wie das Beispiel des Schleudervorgangs zeigt, ist es Ziel der regelungstechnischen Betrachtung der Mensch-Maschine-Interaktion, Resonanzspitzen in der Übertragung zu vermeiden oder zumindest in einen solchen Bereich zu verschieben, dass es sehr unwahrscheinlich ist, in diesen zu gelangen. So kann man z. B. davon ausgehen, dass der Mensch oberhalb von Frequenzen um 2 Hz kaum noch Übertragungsverhalten zeigt. Um die Nähe zu dieser Gefahr abschätzen zu können, bedient man sich der Überlegung zur sog. *Schnittfrequenz* (cross-over-frequency). Die Basis dafür liefert die

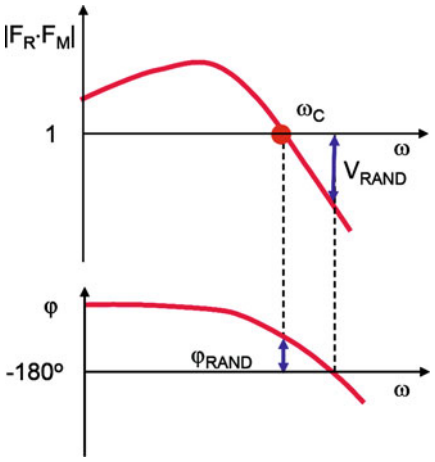


Abb. 2.17 Bodediagramm eines hypothetischen Frequenzgangs und Definition der Schnittfrequenz ω_C

Gl. 2.16 des Frequenzgangs des geschlossenen Regelkreises. Für das Verständnis der folgenden Überlegung ist in diesem Zusammenhang bedeutsam, dass – wie bereits erwähnt – zur vollkommenen Beschreibung aus mathematischen Gründen die Frequenz ω als imaginäre Zahl $p = i \cdot \omega$ eingeführt werden muss. Dies bewirkt, dass in Gl. 2.16 der Term $F_R \cdot F_M$ bei bestimmten Frequenzen, zumindest theoretisch, den Wert „−1" einnehmen kann. An dieser Stelle wäre also der Frequenzgang F_{RK} des geschlossenen Regelkreises unbestimmt groß. Sie charakterisiert die beschriebene Resonanzstelle. Dieser Wert kann sich aber nur einstellen, wenn zugleich der Absolutbetrag von $|F_R \cdot F_M| = 1$ und der Phasenwinkel $\varphi = -180°$ ist. Abbildung 2.17 zeigt am hypothetischen Frequenzgang eines offenen Regelkreises (siehe Gl. 2.14) die mögliche Beschreibung zu diesem kritischen Punkt. Als *Schnittfrequenz* ω_C wird die Frequenz bezeichnet, bei der der Amplitudengang des offenen Regelkreises den Wert „1" erreicht. Der Abstand, den der zugehörige Phasengang von dem kritischen Wert $\varphi = -180°$ zeigt, wird als *Phasenrand* φ_{Rand} bezeichnet. Der Regelkreis ist umso stabiler, je größer dieser Abstand ist. Er sollte nach Merz (1973) $> 30°$ und nach Pressler (1967) $> 40° - 60°$ sein. Mit der *Verstärkungsreserve* V_{Rand} wird der Abstand des Amplitudenwertes an der kritischen Stelle $\varphi = -180°$ von dem kritischen

7 Eigenreflexbogen: Die mittels der Muskelspindeln gemessene Muskellänge wird im Rückenmark direkt mit der vom Großhirn kommenden Information (α-Innervation) über die gewünschte Muskellänge (α-Motoneuron) rückgekoppelt, sodass durch diesen Unterregelkreis äußere Störungen ohne Aktivität des Großhirns ausgeregelt werden (siehe hierzu Abschn. 3.2.3).

8 ESP = **E**lektronisches **S**tabilitäts **P**rogramm: Wenn die mittels geeigneter Sensoren erfasste Querbeschleunigung und Gierwinkelrate des Fahrzeugs nicht mit der durch die gemessene Lenkradstellung und die Geschwindigkeit geometrisch feststehende Querbeschleunigung und Gierwinkelrate des Fahrzeugs (siehe hierzu Abb. 2.13) innerhalb gewisser Grenzen übereinstimmt, wird durch einen gezielten asymmetrischen Bremseingriff der Kurs des Fahrzeugs korrigiert. Dabei werden die ohnedies vorhandenen Sensoren für die Raddrehzahl und die Aktuatoren des ABS-Systems (**A**nti-**B**lockier-**S**ystem) genutzt.

Wert „1" bezeichnet. Er sollte zum Erhalt stabiler Verhältnisse nach Pressler > 1,3 und nach Merz > 2 sein.

2.4 Vom Fahrer geregelte Größen

Um eine mathematischen Modellierung, wie sie in dem ▶ Abschn. 2.3 skizziert worden ist, zu ermöglichen, ist genau festzulegen, welche Größen dem Fahrer für eine Regelung zur Verfügung stehen. Wegen des unterschiedlichen technischen Aufbaus und der daraus resultierenden Bedienelemente wird diese Betrachtung getrennt für Quer- und Längsdynamik durchgeführt, obwohl ein Teil der jeweiligen Informationskanäle für beide Dynamiken identisch ist. Der Querdynamik wird dabei in der Literatur größere Beachtung geschenkt, weil bei ihr die Führungsgröße in engeren Grenzen, also eindeutiger festliegt (siehe hierzu auch ◘ Abb. 2.4) und sich damit eine regelungstechnische Modellierung eher anbietet.

2.4.1 Querdynamik

Bereits von Fiala (1966) bzw. Ohno (1966) wurden in Übereinstimmung mit Crossmann und Szostak (1969) drei Rückmeldeniveaus über die Fahrzeugbewegung für den optischen Informationskanal angegeben:

1. Die Vorinformation durch Voraussicht auf die Straße *(„Scheinwerferorientierung")*,
2. die Fahrzeugrichtung *(„Richtungsorientierung")*,
3. der seitliche Abstand *(„Nebelorientierung")*.

Erst durch die aus der Voraussicht gewonnene Information ist der Fahrer in der Lage, einen inneren Sollkurs im Sinne der Führungsaufgabe für die gegebene Situation zu bilden, dem er nachzufahren versucht (Führungsebene der Fahraufgabe). Viele Untersuchungen über das Blickverhalten (siehe hierzu ▶ Abschn. 3.3.2) zeigen zudem, dass diese Voraussicht sich im Allgemeinen auf einen Bereich ca. 1 bis 2 Sekunden vor dem Fahrzeug beschränkt. Für die Generierung der notwendigen Lenkreaktion (Stabilisierungsebene der Fahraufgabe) verwendet der Fahrer die beiden weiteren optischen Rückmeldeniveaus (Richtungs- und Nebelorientierung) und zusätzlich die kinästhetische Wahrnehmung der Querbeschleunigung. Der Ableitung der beschreibenden Differentialgleichungen dieser drei Rückmeldeniveaus liegt die ◘ Abb. 2.18 zugrunde. Es wird dabei unterstellt, dass der Fahrer durch einen leichten Lenkradeinschlag von dem gewünschten Geradeauskurs geringfügig (in der Abbildung ist das aus Gründern der Anschaulichkeit übertrieben dargestellt) abkommt, wodurch ein seitlicher Versatz gegenüber diesem Sollkurs entsteht.

Durch den Lenkradwinkel λ, wird bei einem Lenkungsübersetzungsverhältnis u ein Einschlagwinkel $u \cdot \lambda$ an den Vorderrädern bewirkt. Dadurch ist mit dem Radstand l ein Kurvenradius r_K bestimmt. Für kleine Winkel gilt:

$$r_K = \frac{l}{u \cdot \lambda} \tag{2.17}$$

Durchfährt das Fahrzeug auf diesem Radius einen Bogen der Länge $r_K \cdot \varphi_F$, so hat sich die Fahrzeuglängsachse gegenüber der ursprünglichen Richtung um den Winkel φ_F geändert. Gleichzeitig zeigt es von dem ursprünglichen Geradeauskurs den Seitenversatz a. Nachdem es sich hier um eine Betrachtung handelt, bei der es in erster Linie auf die Rückmeldung für den Fahrer in unkritischen Fahrzuständen ankommt, kann auf die Beschreibung von Effekten höherer Ordnung, wie sie durch Schwimmwinkel (in diesem Fall würde die Orientierung der Längsachse des Fahrzeugs einen Winkel zur Tangente des aktuellen Kurvenradius zeigen), Querschlupf usw. zustande kommen, verzichtet werden. Aus ◘ Abb. 2.18 lässt sich bei kleinem Winkel φ_F für den Seitenversatz des Fahrzeuges vom Sollkurs angeben:

$$\frac{d^2a}{dt^2} = \frac{v^2 \cdot u}{l} \cdot \lambda \tag{2.18}$$

Mit dem Lenkradwinkel λ wird also die Beschleunigung $d^2a/dt^2 = \ddot{a}$ des Seitenversatzes a direkt proportional beeinflusst, wobei dieser Einfluss noch

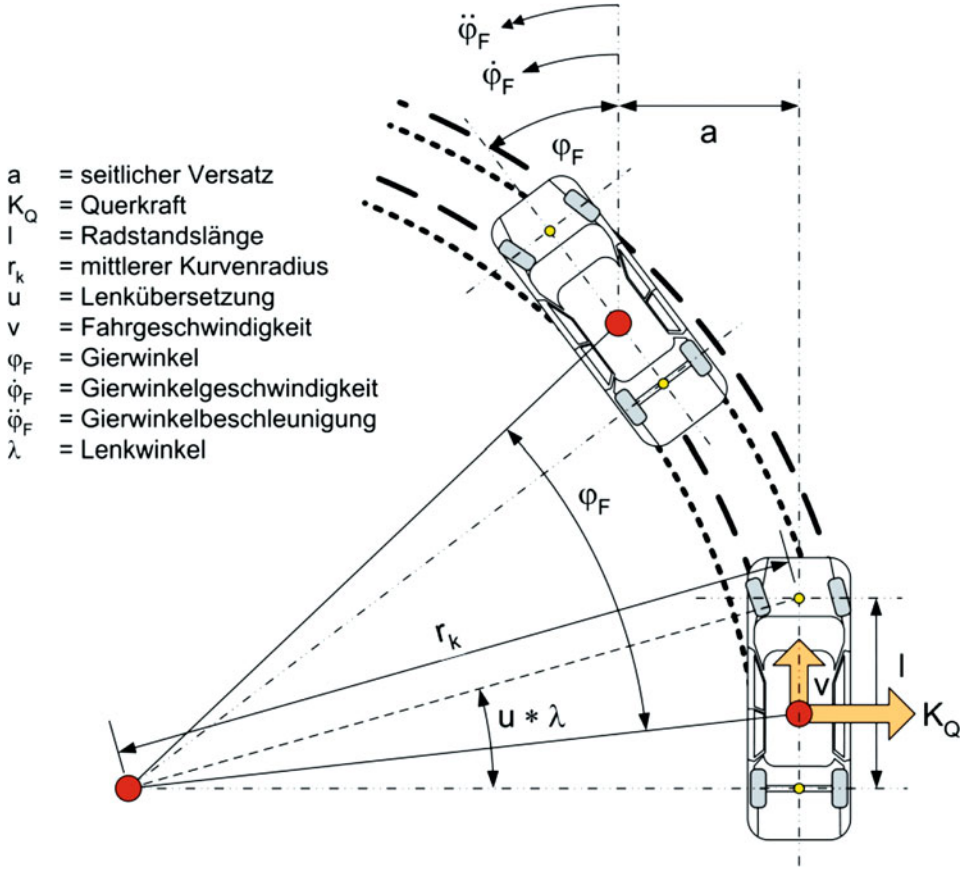


Abb. 2.18 Geometrie für die Kurvenfahrt eines Kraftfahrzeugs (ohne Berücksichtigung dynamischer Effekte; häufig auch als „Fahrradmodell" bzw. „Einspurmodell" bezeichnet)

quadratisch von der Geschwindigkeit modifiziert wird; d. h. für den Fahrer hat hinsichtlich des Seitenversatzes die gleiche Lenkradstellung unterschiedliche Wirkung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Ergonomisch gesehen handelt es sich bei konstanter Fahrgeschwindigkeit um eine Beschleunigungssteuerung (siehe Bubb 1993a), die besonders bei Kompensationsaufgaben (d. h. nur die Abweichung wird gesehen, nicht die wahre Position des Fahrzeugs auf der Straße, wie es von einer hypothetischen Vogelsicht möglich wäre) schwierig zu handhaben ist.

Für die zeitliche Änderung der Längsorientierung φ_F des Fahrzeuges lässt sich aus Abb. 2.18 ableiten:

$$\frac{d\Phi_F}{dt} = \frac{v \cdot u}{l} \cdot \lambda \qquad (2.19)$$

Durch die Verstellung λ des Lenkrades wird also die Geschwindigkeit $d\varphi_F/dt = \dot{a}$ der Längsorientierung φ_F bestimmt. Auch dieser Einfluss ist abhängig von der Fahrgeschwindigkeit v, allerdings nur linear. Bei konstanter Fahrgeschwindigkeit ist dies eine sog. Geschwindigkeitssteuerung, die bei einer Kompensationsaufgabe (s. o.) besonders einfach zu handhaben ist.

Da man davon ausgehen kann, dass der Fahrer auf Grund seiner Erfahrung eine Erwartung (siehe hierzu ▶ Kap. 3) über die Querbeschleunigung in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit und dem über den optischen Kanal wahrgenommenen

Kurvenradius der Straße hat, stellt auch die auf das kinästhetische Empfinden wirkende Zentrifugalkraft Z eine in den Regelungsprozess einbezogene Rückmeldung über den Bewegungszustand des Fahrzeuges dar. Es gilt:

$$Z = \frac{m \cdot v^2 \cdot u}{l} \cdot \lambda \qquad (2.20)$$

wobei m die Masse des Fahrers ist. Im Falle des geforderten Geradeauskurs würde die Aufgabe des Fahrers darin bestehen, die empfundene Querbeschleunigung zu Null zu machen.

Bei der Regelung nach dem kinästhetischen Empfinden wird durch den Lenkradwinkel somit direkt die Größe der Querbeschleunigung bestimmt (ergonomisch als „Lagesteuerung" bezeichnet). Wenn der Fahrer eine bestimmte Vorstellung von der zu erwartenden Querbeschleunigung hat, ist dies für sich gesehen eine Folgeaufgabe (auch „pursuit tracking" genannt; Sollgröße und Istgröße werden getrennt voneinander erfasst), für welche die Lagesteuerung besonders einfach zu handhaben ist. Auch dieser Einfluss wird ebenso vom Quadrat der Fahrgeschwindigkeit v beeinflusst wie die Beschleunigung der Querabweichung a und von der Fahrermasse, die aber für das jeweilige Individuum eine Konstante darstellt (natürlich sind Gln. 2.18 und 2.20 physikalisch gesehen äquivalent, da die Querbeschleunigung d^2a/dt^2 die Zentrifugalkraft gemäß $Z = m \cdot d^2a/dt^2$ festlegt; vom Fahrer wird aber das eine über den visuellen Sinneskanal *gesehen* und das andere über den kinästhetischen Sinneskanal *gespürt*).

Gerade die Betrachtung des Problems der Geradeausfahrt ist von besonderem Interesse. Die Frage ist, wonach regelt der Mensch in diesem Fall, wo doch quasi alle Führungsgrößen „Null" sind. Abbildung 2.19 zeigt den Lenkradwinkel, der (bei einer durchschnittlichen Auslegung eines Mittelklasse-Pkw) gerade zu einem wahrnehmbaren Ereignis führt. Für das Diagramm wurde von einem dynamischen visuellen Auflösungsvermögen für den Sehwinkel von $\sigma_{min} \approx 2'/s$ (Lindsay und Norman 1972) und einer minimal wahrnehmbaren Beschleunigung von $b_{min} \approx 0{,}008\,m/s^2$ (Steward 1971) ausgegangen. Man erkennt, dass eine Abweichung vom Geradeauskurs bis zu einer Geschwindigkeit von ca. 50 km/h zuerst optisch wahrgenommen wird, darüber dominiert die kinästhetische Wahrnehmung. Das erklärt die in Experimenten gefundene Eigenheit, dass Fahrer auch auf völlig geraden Straße einen leichten Zick-Zack-Kurs fahren (Jürgensohn 2000): Der Fahrer sieht die gerade Strecke, weiß, dass hier keine Querbeschleunigung zu erwarten ist und regelt auf Querbeschleunigung „Null". Da die Längsrichtung des Fahrzeugs dabei leicht von der Längsrichtung der Straße abweichen kann, nimmt er optisch erst nach einer gewissen Zeit die Abweichung vom Kurs wahr, korrigiert, regelt dann aber wieder auf Querbeschleunigung „Null" usw. (siehe auch Gothelp 1984). Dies ist auch die Ursache für das überzogene Lenkverhalten in Fahrsimulatoren, die über keine kinästhetische Rückmeldung verfügen, und das dort beobachtete Phänomen der Tendenz zu hohen Geschwindigkeiten.

Aus diesen Darlegungen geht hervor, wie wichtig es für den Menschen als Fahrzeugführer ist, über Erfahrung zu verfügen, die eine richtig koordinierte Vorhersage über die unterschiedlichen Rückmeldeniveaus des *einen* sich bewegenden Fahrzeuges zulässt. Es wird auch verständlich, dass der ungeübte Fahrer sich zunächst an dem mit geringerem mentalem Modellaufwand zu erfassenden Seitenversatz orientiert, deren Beherrschung aber nur über die schwierige Beschleunigungssteuerung möglich ist. Mit zunehmender Übung ist er in der Lage, nun auch Längsorientierung und Querbeschleunigung mit in den Regelungsvorgang einzubeziehen, wodurch er auch wegen der damit verbundenen einfacheren Steuerungsarten sicherer wird.

Wie oben dargelegt, hängt die Wirkung des Lenkradwinkels erheblich von der Fahrgeschwindigkeit ab. Man kann davon ausgehen, dass der Fahrer aufgrund seiner Erfahrung für normale Fahrsituationen diese Abhängigkeit „im Gefühl" hat. Grobe Abweichungen von dem erlernten Zusammenhang, wie sie bei extremen Fahrmanövern auftreten (z. B. Kurvenfahrt mit hoher Querbeschleunigung, Bremsen in der Kurve), führen jedoch zu Schwierigkeiten in der Fahrzeugbeherrschung. Die Systemparameter sind dann nicht mehr umgekehrt

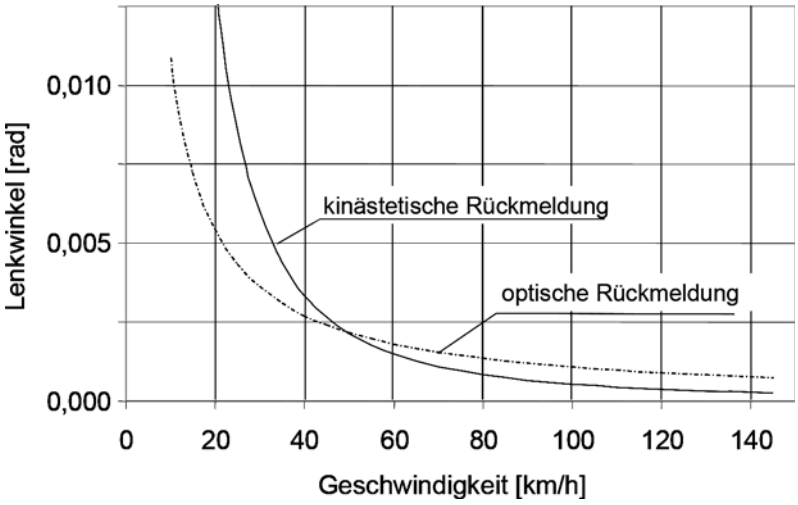


Abb. 2.19 Lenkausschläge, die zu einem gerade spürbaren Ereignis führen

proportional bzw. umgekehrt quadratisch proportional von der Geschwindigkeit abhängig, sondern stehen dazu in noch komplizierterer Abhängigkeit. Um der Gefahr in solchen Grenzsituationen vorzubeugen, bevorzugt man heute eine „neutrale Fahrwerkauslegung", d. h. auch bei extremen Querbeschleunigungen ändert sich die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Systemparameter nur graduell, nicht prinzipiell; der Fahrer kann auch in dieser Situation seine Erfahrung nahezu unverändert einsetzen; er benötigt nur einen etwas größeren Lenkradeinschlag. Anders ist dies bei einer Fahrwerksauslegung mit Neigung zum Untersteuern oder Übersteuern, charakterisiert durch einen Schwimmwinkel größer oder kleiner Null (siehe hierzu ► Abschn. 6.4.1). In diesem Falle wird bei höher Geschwindigkeit zum Durchfahren des gleichen Kurvenradius ein überproportional höherer bzw. geringerer Lenkwinkel benötigt.

Schulze hat schon 1981 Versuche mit einer geschwindigkeitsabhängigen Lenkübersetzung durchgeführt, wodurch die quadratische Abhängigkeit bezüglich der seitlichen Abweichung und der Querbeschleunigung (Gln. 2.18 und 2.20) zu einer einfachen Geschwindigkeitsabhängigkeit reduziert werden kann und für die Längsorientierung die Geschwindigkeit sogar ganz heraus fällt. Er konnte zeigen, dass dadurch das Lenken einfacher wird. Auch Untersuchungen von Honda (2000) und Fleck (2003) sowie die Untersuchungen zur Lenkung mit dem aktiven Bedienelement von Eckstein (2001) und Penka (2000) zeigen übereinstimmend diesen Effekt, wobei allerdings bei allen gefunden wurde, dass unterhalb einer Geschwindigkeit von ca. 40 km/h die Lenkübersetzung geschwindigkeitsunabhängig sein sollte. Das hat offensichtlich damit zu tun, dass in diesem Bereich der Fahrer mental von einer Kompensationsaufgabe in eine Folgeaufgabe umschaltet, wobei er sich die Bewegung sozusagen aus einer „objektiven" Vogelsicht vorstellt, wie er es auch benötigt, um z. B. Rangiermanöver beim Einparken durchzuführen. Aus Sicherheitsgründen wird heute in Serienfahrzeugen, die eine solche geschwindigkeitsabhängige Lenkübersetzung besitzen[9], im oberen Geschwindigkeitsbereich (oberhalb 160–200 km/h) ebenfalls eine geschwindigkeitsunabhängige Lenkübersetzung bevorzugt.

Der Vorteil einer geschwindigkeitsabhängigen Lenkübersetzung wird weiterhin offensichtlich, wenn man die oben erwähnte Voraussicht auf die Straße, die „Scheinwerferorientierung" berücksichtigt. Bereits Kondo (1953) ging davon aus, dass der Fahrer so lenkt, dass bezüglich eines imaginären Zielpunktes (aim point) in einer bestimmten Vor-

9 Gegenwärtig kommen immer mehr Fahrzeuge auf den Markt, für die zumindest als Sonderausstattung eine solche Lenkung erworben werden kann. Durch sie wird nicht nur ein Komfortvorteil erreicht (geringerer Lenkeinschlag beim Einparken), sondern durch die bessere Anpassung der dynamischen Fahrzeugeigenschaften an den Fahrer auch ein Sicherheitsgewinn.

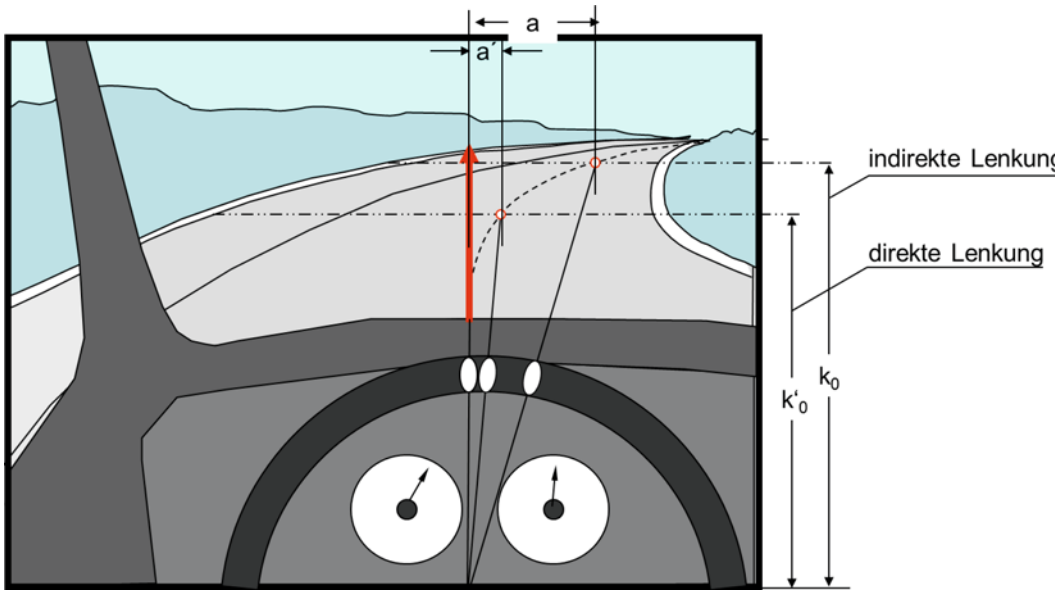


Abb. 2.20 Illustration der antizipatorischen Steuerung

ausschauentfernung (preview distance) möglichst immer der Sichtpunkt (sight point) mit der Sollfahrbahnlinie (predetermined course) zusammenfällt. Abbildung 2.20 illustriert, wie einfach sich für den Fahrer diese antizipatorische Lenkung bei hinreichend großen Kurvenradien darstellt: er hat das Lenkrad (augenblickliche Position im Bild markiert durch einen hellen Punkt) nur in die Richtung des anvisierten Zielpunktes in der Umgebung zu drehen. Sie illustriert aber auch den Effekt unterschiedlicher Lenkungsauslegungen: Eine sog. direkte Lenkung bezieht sich auf einen näheren Zielpunkt (in der Abbildung durch a‘ und k_0‘ dargestellt), eine indirekte Lenkung auf einen ferneren Zielpunkt (in der Abbildung durch a und k_0 dargestellt; für den gleichen Kurvenradius ist hier eine größere Lenkraddrehung notwendig als bei der direkten Lenkung). Da bei höheren Geschwindigkeiten in der gleichen Zeit größere Strecken durchmessen werden, ist die indirektere Lenkung dort sinnvoll, während bei niedriger Geschwindigkeit das Fahrzeug mit der direkteren Lenkung handlicher erscheint. Durch eine geschwindigkeitsabhängige Lenkung können beide Forderungen zugleich erfüllt werden (s. o.).

Verschiedene Untersuchungen haben sich mit der notwendigen Vorausschau beschäftigt. Für sie wurden erfolgreich bei der Simulation des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises jeweils Werte in der Größenordnung von 1 s bei der Querdynamik und 1.5 s bei der Längsdynamik verwendet (Yuhara et al. 1999; Guan et al. 2000). Donges (1978) kam bei Versuchen im Fahrsimulator mit Bewegungsrückmeldung zu dem Ergebnis, dass die Antizipationszeit bzw. Vorausschauzeit unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit ist und bei ca. 1 s liegt, wobei der Fahrer – wie Blickzuwendungsuntersuchungen zeigen – im Allgemeinen bis zu 2 s bereit ist, den Blick von der Straße abzuwenden (siehe hierzu auch das Modell von Gengenbach 1997). Die Entfernung zum Vorausschaupunkt wird durch die steigende Fahrgeschwindigkeit vergrößert, da die Entfernung bei einer konstanten Vorausschauzeit proportional zur Fahrgeschwindigkeit ist. Das wurde auch objektiv in Blickuntersuchungen von Schweigert (2003) gefunden (Näheres hierzu siehe ▶ Abschn. 3.3) .

Als Maß für die Güte der Querdynamikregelung wird häufig die Zeit herangezogen, die bei unverändertem Lenkeinschlag vergeht, bis das Fahrzeug den Fahrbahnrand erreicht bzw. überschreitet. Sie wird als „Time to line crossing, TLC“ bezeichnet. Sie kann aus dem Winkel $\Delta\phi$ zwischen der Fahrzeugorientierung und der Ausrichtung der Fahrbahn, der

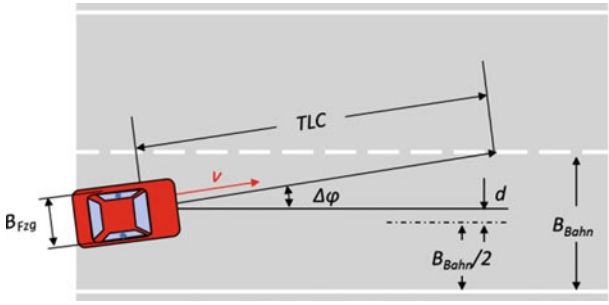


Abb. 2.21 Für die Berechnung der Größe „Time to line crossing, TLC" benötigte Werte

aktuellen Position d des Fahrzeugs bezogen auf die Fahrspurmitte, der Fahrzeugbreite B_{Fzg}, der Fahrspurbreite[10] B_{Bahn} und der Geschwindigkeit v des Fahrzeugs nach der folgenden Gl. 2.21 berechnet werden (siehe Abb. 2.21)

$$TLC = \frac{\frac{1}{2} \cdot (B_{Bahn} - B_{Fzg}) - d \cdot \text{sign}(\Delta\phi)}{v \cdot \sin \Delta\phi} \quad (2.21)$$

In Simulatorexperimenten konnte gefunden werden, dass der TLC im Mittel bei ca. 3,7 s liegt. Daraus geht hervor, dass es normalerweise kein Problem darstellt, das Fahrzeug auf der Straße zu halten. Die große Häufigkeit von Unfällen, die mit „Abkommen von der Fahrbahn" charakterisiert werden, ist wohl zum größten Teil zum einen auf überhöhte Geschwindigkeit (s. u.) und zum anderen auf Ablenkung, Unaufmerksamkeit oder den berüchtigten Sekundenschlaf zurückzuführen.

2.4.2 Längsdynamik

Wie bereits durch Abb. 2.1 dargestellt, liegt die Aufgabe bei der Beherrschung der Längsdynamik in der Generierung der Führungsgröße, d. h. der Sollgeschwindigkeit, die im Gegensatz zur Querdynamik, wo Straßenrand und Objekte auf der Straße relativ enge objektive Grenzen vorgeben, nicht unmittelbar aus der Sicht abgeleitet werden kann. Bereits eine bekannte Fahrschulregel legt aber diese Sollgeschwindigkeit fest: die Geschwindigkeit darf nur so hoch gewählt werden, dass innerhalb der Sichtweite ein Anhalten des Fahrzeugs möglich ist. Der Anhalteweg x_A errechnet sich aus der Fahrphysik nach:

$$x_A = v \cdot t_R + \frac{v^2}{2\mu g} \quad (2.22)$$

wobei v die Ausgangsgeschwindigkeit, t_R die Reaktionszeit des Fahrers (meist mit 1 s angenommen, da davon auszugehen ist, dass der Fahrer eine Mindestzeit benötigt, um zu erkennen, dass ein Bremsmanöver notwendig ist) und μ der Kraftschlussbeiwert ist, der die mittlere maximale Verzögerung bei gegebenen Reifen auf einer bestimmten Straßenoberfläche beschreibt. g stellt die Erdbeschleunigungskonstante dar. Aufgabe des Fahrers wäre es nun, nicht nur die Straßenverhältnisse, sondern auch noch nach der Gl. 2.22 die quadratische Geschwindigkeitsabhängigkeit des Anhalteweges richtig abzuschätzen. Dies ist ihm nach aller Erfahrung praktisch unmöglich. In der Fahrschule werden deshalb vereinfachende Faustregeln für den Anhalteweg gelehrt, die aber im realen Straßenverkehr ebenfalls praktisch nicht angewendet werden, weil u. a. ein zahlenmäßiges Abschätzen von Entfernungen aus einem bewegten System für dem Menschen noch schwieriger ist als von einem unbewegten Standpunkt aus[11]. Be-

10 Alle Daten beziehen sich immer auf die eigene Fahrspur; in der Realität steht hier oftmals mehr zur Verfügung, wenn sich das Fahrzeug beispielsweise auf der rechten Fahrbahn einer mehrspurigen Autobahn befindet, oder auf der rechten Seite einer Fahrbahn mit Gegenverkehr. Allerdings ist in letzteren Fällen zu beachten, dass es bei entsprechender Verkehrslage beim Verlassen der eigenen Fahrspur zu einer Kollision mit einem anderen Fahrzeug kommen kann.

11 Häufig gilt als Faustformel für den Bremsweg: $x_B = (v[km/h]/10)^2$. Diese Faustformel unterstellt eine sog. Komfortbremsung mit maximal 0,3 g. Für den Fall einer Notbremsung wird deshalb der so kalkulierte Wert noch halbiert.

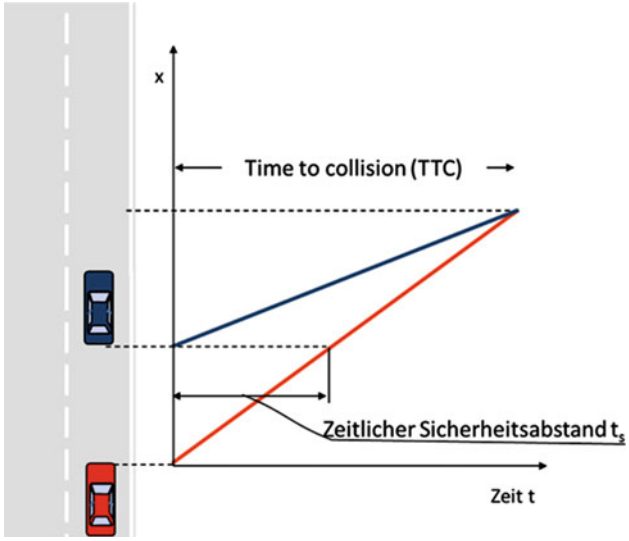


Abb. 2.22 Sicherheitsabstand gemessen in Sicherheitszeit t_s und Zeit bis zum Auffahren (Time to Collision TTC), falls die Spur nicht gewechselt wird

rücksichtigt man die oben dargestellten Erkenntnisse, dass der Fahrer seine Handlungsabsichten aus einem Zeithorizont von 1–1,5 s, maximal 2 s ableitet, so ist zu berechnen, welche Voraussichtzeit t_V benötigt wird, damit die Strecke bis zum hypothetischen Anhaltpunkt übersehen werden kann:

$$t_V = \frac{v}{2\,\mu g} + t_R \tag{2.23}$$

Geht man von einer Reaktionszeit t_R von 1 s aus und unterstellt eine Voraussicht von 2 s, dürfte auf trockener Straße ($\mu \approx 0{,}8$) nur maximal eine Geschwindigkeit von 60 km/h gefahren werden, auf nasser Straße ($\mu \approx 0{,}4$) eine Geschwindigkeit von 30 km/h und auf winterlich glatter Straße ($\mu \approx 0{,}1$) gar nur von 7 km/h. Eine solche Forderung ist natürlich unrealistisch und auch unnötig, da im Allgemeinen längere Strecken, die einer größeren Voraussichtzeit entsprechen, als Sichtweite zur Verfügung stehen (Bubb 1975). Aus Gl. 2.23 ist aber auch zu entnehmen, dass bei einer Geschwindigkeit von 200 km/h eine Voraussichtzeit von ca. 4 s (das entspricht einer Sichtweite von 222 m) notwendig ist. Mit der gleichen Sicherheitsreserve dürfte man dann aber auf nasser Straße nur noch ca. 100 km/h fahren und auf glatter Straße gar nur 25 km/h. Auch diese Überlegung zeigt, dass das reale Verhalten von diesen idealen Forderungen weit abweicht.

Aller Erfahrung nach wird aber die Geschwindigkeit eher unter Komfortaspekten gewählt, indem die zu erwartende Querbeschleunigung beim Durchfahren von Kurven als Maßstab herangezogen wird. So fanden bereits Herrin und Neuhardt (1974), dass bis zu Geschwindigkeiten von 130 km/h im Durchschnitt eine maximale Querbeschleunigung von 0,3 g akzeptiert wird, bei höheren Geschwindigkeiten wird dieser Wert sogar wesentlich kleiner.

Im Kolonnenverkehr kann davon ausgegangen werden, dass nur das Fahrzeug an der Kolonnenspitze einen eigenen Anhalteweg benötigt, während die folgenden Fahrzeuge einen solchen Sicherheitsabstand halten müssen, dass die Reaktionszeit des Fahrers kompensiert wird. Der Sicherheitsabstand x_S errechnet sich dann einfach aus:

$$x_S = v \cdot t_R \tag{2.24}$$

Üblicherweise geht man dabei von Sicherheitszeiten t_R zwischen 1 und 2 s aus. Die Straßenverkehrsordnung ahndet ein Unterschreiten des Sicherheitsabstandes von 0,8 s.[12] Experimentelle

12 Da das Abschätzen von Abständen in Zeitform offensichtlich Schwierigkeiten bereitet, wird in Fahrschulen und auch in sonstigen Empfehlungen der sog. halbe Tachoabstand gefordert. Nachdem die Geschwindigkeit im Straßenverkehr in km/h angegeben wird, entspricht diese Forderung einem zeitlichen Sicherheitsabstand von $t_s = 3{,}6 / 2 = 1{,}8$ s.

Untersuchungen von Assmann (1985) zeigen die tatsächlich geringe Geschwindigkeitsabhängigkeit von Sicherheitsabständen. Es scheint eher so zu sein, dass der Fahrer eine absolute Wegdistanz für sicher hält und diese nahezu unabhängig von der Geschwindigkeit einhält, mit der Folge, dass im Durchschnitt bei niedrigen Geschwindigkeiten eher zu große und bei hohen Geschwindigkeit zu geringe Sicherheitsabstände eingehalten werden.

Untersuchungen von Popiv et al. (2009) auf Autobahnen mit einem Fahrzeug, das mit einem auf Radarbasis arbeitenden Abstandsmesssystem ausgerüstet war, zeigen die in Abb. 2.23 gefundenen Ergebnisse. Es wurde dabei untersucht, ab welchem Abstand der Lenker des Versuchsfahrzeugs beim Annähern an ein langsameres Fahrzeug die Fahrspur wechselt. In Abhängigkeit von der Geschwindigkeit wird dieser Abstand gemäß Gl. 2.24 durch die Sicherheitszeit ts charakterisiert. Aus Abb. 2.22 ist zu entnehmen, dass eine weitere Kenngröße für diesen Vorgang die Zeit bis zum Aufprall auf das vorausfahrende Fahrzeug ist, für den Fall, dass die Spur nicht gewechselt wird. Diese Zeit wird Time to collision, TTC genannt.

Abbildung 2.23 zeigt die in dieser Untersuchung gefundenen Werte für die Sicherheitszeit t_s und die TTC. Gemäß Fastenmeier et al. (2001) und van der Horst et al. (1994) müssen Werte von $t_s < 0{,}6\,s$ und $TTC < 5\,s$ als kritisch eingestuft werden.

Aus all diesen Überlegungen leitet Bubb (1975) die Forderung nach einer kontaktanalogen Anzeige des Bremsweges im Head-Up-Display (HUD) ab. Wie die Untersuchungen von Assmann (1985) mit einem Versuchsfahrzeug, das nach diesen Vorstellungen umgerüstet war, zeigen, werden durch eine derartige Anzeige die Sicherheitsabstände sogar bei solchen Fahrern vergrößert, welche eine derartige Hilfe ablehnen.

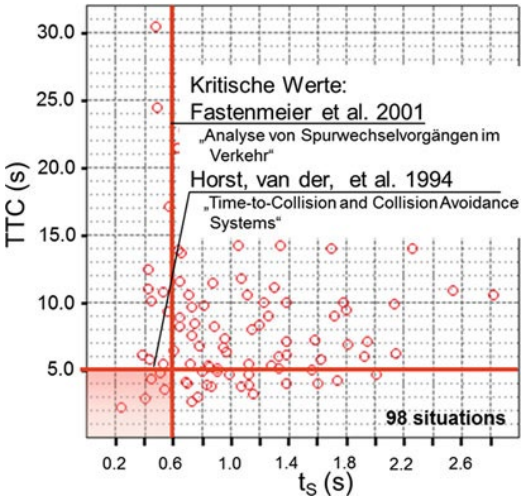


Abb. 2.23 Verhalten beim Annähern an ein langsameres Fahrzeug (Popiv et al. 2009)

2.5 Die primäre Fahraufgabe aus regelungstechnischer Sicht

In ▶ Kap. 1 wurde bereits die hierarchische Gliederung der primären Fahraufgabe in die Teile Navigation, Führung und Stabilisierung erläutert. Aus regelungstechnischer Sicht ist hierfür zu untersuchen, wie und wie genau die jeweilige Führungsgröße gewonnen wird und inwieweit der Fahrer in der Lage ist, die sich daraus ergebende Forderung zu erfüllen.

Die Erledigung der Navigationsaufgabe erfolgt im Wesentlichen wissensbasiert auf der Grundlage von rationalen Überlegungen und Abwägungen (siehe ▶ Abschn. 6.3.1.3), wenn man einmal von der Navigationsaufgabe, die sich aus täglichen Routinen (z. B. Weg zur Arbeit) ergeben, absieht. Dies gilt selbst dann, wenn die Fahrt keineswegs detailliert geplant wird, sondern ad hoc auf der Grundlage von grobem geographischem Wissen und mit Hilfe von Wegweisern erfolgt. Wie im Folgenden gezeigt wird, muss dann in der Führungsaufgabe aus Abschätzungen wahrgenommener Größen und der Erfahrung in Abhängigkeit von der aktuellen Situation die innere Führungsgröße (Sollgröße) hinsichtlich Ort („Sollkurs") und Zeit („Sollgeschwindigkeit") gebildet werden, die in der weiteren Folge im Rahmen der Stabilisierungsaufgabe durch Betätigung der Bedienelemente des Fahrzeugs realisiert wird. Der Vorgang dieser Ausregelung kann weitgehend mittels regelungstechnischer Modellierungen des Menschen beschrieben werden (siehe hierzu die vorangehenden Abschnitte und insbesondere ▶ Abschn. 3.3 sowie ▶ Abschn. 5.1.1).

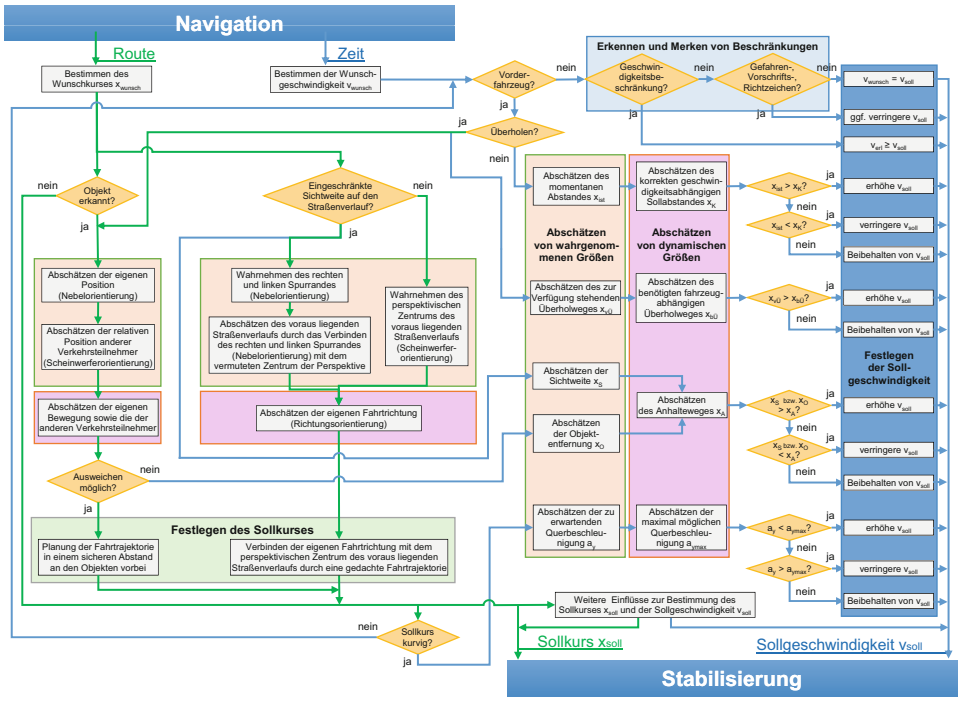


Abb. 2.24 Entscheidungsmodell der Fahrzeugführungsebene (Bergmeier 2009, erweitert nach Bubb 1993; Lange 2008)

In diesem Abschnitt werden die Aufgaben modelliert, die der Fahrer auf der Führungsebene zu erledigen hat. Nachdem diese Aufgaben äußerst vielfältig sind, kann dies hier nur ansatzweise geschehen. Dennoch eröffnet bereits dieser Ansatz wichtige Erkenntnisse mit Blick auf eine ergonomische Gestaltung der Fahraufgabe. Abbildung 2.24 zeigt ein schematisches Flussdiagramm der Führungsaufgabe.

Dabei ist von der Bestimmung der Wunschführungsgrößen in Form des individuellen Wunschkurses x_{wunsch} und der individuellen Wunschgeschwindigkeit v_{wunsch} auszugehen. Bei Letzterem entspricht, wie bereits erwähnt, die Wunschgeschwindigkeit v_{wunsch} der Sollgeschwindigkeit v_{soll}, wenn keine Anpassung aufgrund von Vorderfahrzeugen, Geschwindigkeitsbeschränkungen, diversen Verkehrszeichen, sicherheitskritischen Objekten, eingeschränkter Sichtweite oder einem kurvigen Straßenverlauf erforderlich ist. Im gleichen Sinne entspricht der Wunschkurs x_{wunsch} dem Sollkurs x_{soll}, wenn keine Adaption aufgrund des vorausliegenden Straßenverlaufs oder sicherheitskritischer Objekte stattzufinden hat. Andernfalls werden beide Führungsgrößen durch den Fahrer anhand zahlreicher antizipatorischer Teilaufgaben an die Umweltfaktoren der aktuellen Situation angepasst, welche in Abb. 2.24 durch entsprechende Entscheidungsnotwendigkeiten (als Raute gekennzeichnet) und durchzuführenden Aufgaben (als Rechtecke gekennzeichnet) dargestellt sind. Wie aus dieser Abbildung zu entnehmen ist, können all diese Aufgaben nur durch Abschätzungen der wahrgenommenen Größen (z. B.: Entspricht der wahrgenommene Abstand zu einem Fahrzeug der wirklichen Entfernung? Es ist bekannt, dass deutlich wahrnehmbare Objekte als näher empfunden werden als nur schemenhaft sichtbare) und der dynamischen Größen des eigenen Fahrzeugs (z. B.: In welcher Entfernung würde mein Fahrzeug bei einer notwendigen Bremsung zum Stehen kommen? In welcher Entfernung würde ich beim Überholen wieder auf die rechte Fahrspur wechseln können?) und fremder Fahrzeuge (z. B.: Bei einem Überholvorgang: wann würde

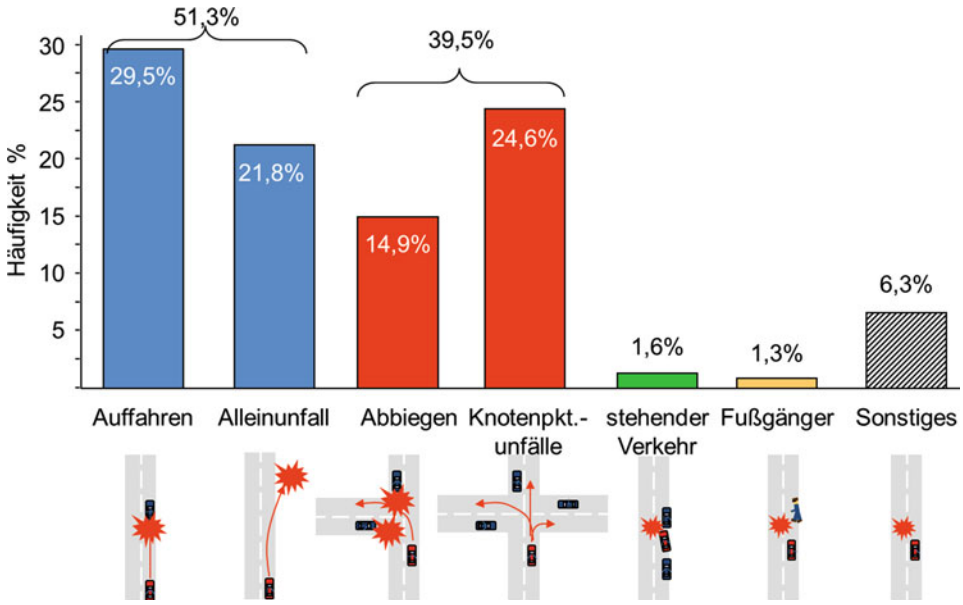


Abb. 2.25 Verteilung der Unfallarten nach Gründl (2005)

das entgegenkommende Fahrzeug mich passieren?) erfasst werden. All die genannten Beispiele beziehen sich auf die letztlich auf wagen Schätzungen beruhende Festlegung der Sollgeschwindigkeit. Es ist festzuhalten, dass die Grenzen für die Festlegung des Sollkurses – zumindest beim normalen Verfolgen des Straßenverlaufes unter der Voraussetzung idealer Sichtverhältnisse – visuell eindeutiger erfassbar sind und somit diese Aufgabe auch leichter zu bewältigen ist. Das Problem besteht hier darin, dass sich aus der Festlegung des Sollkurses auch Einschränkungen der Geschwindigkeit ergeben, die selbst wieder auf Schätzvorgängen beruhen.

Die auf gefühlsmäßige Schätzungen zurückzuführenden Schwierigkeiten zeigen sich auch in der Unfallstatistik. In dem Forschungsprojekt GIDAS, das in Zusammenarbeit mit der Polizei durchgeführt wird, informiert die Polizei, wenn sie zu einem Unfall gerufen wird, eine Crew von Wissenschaftlern, die aus technischem, psychologischem und medizinischem Personal besteht und die ihre Untersuchungen unabhängig von der Polizei durchführen. So können u. a. in den Interviews einige Aussagen ohne Angst vor Schuldzuweisung durchgeführt werden. Gründl (2005) hat Interviews mit 528 Fahrern, die insgesamt in 312 Verkehrsunfällen verwickelt waren, gesammelt und analysiert. In Übereinstimmung mit anderen Unfallstatistiken fand er, dass mit ca. 30 % am häufigsten Unfälle im Längsverkehr geschehen, wenn ein schnelleres Auto ein langsameres Auto wegen zu geringem Sicherheitsabstand berührt (siehe hierzu und zum Folgenden ◘ Abb. 2.25).

Ungefähr 22 % aller Unfälle sind so genannte Alleinunfälle ohne Beteiligung eines anderen Verkehrsteilnehmers. Durch eine Unachtsamkeit gerät der Fahrer an den Fahrbahnrand; normalerweise erschrickt er dann. Er verreißt das Steuerrad und bringt erst dadurch das Fahrzeug in einen gefährlichen schlitternden Zustand. Es ist dieser Unfalltyp, der durch das auf der Stabilisierungsebene wirkende ESP-System (siehe ▶ Kap. 1 und 9) wirkungsvoll verhindert werden kann.

Alle folgenden wichtigen Unfälle kommen auf Kreuzungen vor. Die meisten von ihnen sind solche, wo der verursachende Fahrer nach links abbiegt und dabei das dynamische Verhalten entgegen kommender oder sich auf ihn zubewegender Fahrzeuge richtig abschätzen und zu seiner eigenen Dynamik in korrekte Beziehung setzen muss (ca. 15 %). Die anderen Unfälle sind sehr

vielgestaltig und werden hier unter dem Begriff „Knotenpunktunfälle“ zusammengefasst (25 %). Meist sind sie dadurch charakterisiert, dass der Fahrer seine Führungsaufgabe auf der Grundlage vieler sich gleichzeitig zu beobachtender Objekte erledigen muss. Unfälle mit stehenden Objekten sind in Relation zu alledem relativ selten (ca. 2 %). Das gleiche gilt auch für die Unfälle mit Fußgängern (ca. 1 %). Der Rest sind verschiedene andere Unfälle. Aus dieser und ähnlichen anderen Analysen kann gesehen werden: Die wichtigsten Unfälle sind mit ca. 51 % die sog. Longitudinalunfälle (Auffahrunfälle und Von-der-Fahrbahn-Abkommens-Unfälle). Auf dem zweiten Platz oder abhängig vom Land und der jeweiligen Unfallstatistik sogar auf dem ersten Platz sind Kreuzungsunfälle (hier: ca. 40 %).

Wenn man davon absieht, dass ein Teil der Von-der-Fahrbahn-Abkommens-Unfälle auf Ablenkung und Unaufmerksamkeit („Sekundenschlaf“) zurückzuführen sind, so zeigt die oben dargestellte Analyse der Führungsaufgabe, wie sehr das Unfallgeschehen durch die falschen Abschätzung von Entfernungen und insbesondere dynamischer Größen dominiert ist. Eine ergonomische Maßnahme, die sich daraus ableitet, ist in der Objektivierung und Sichtbarmachung dieser Größen zu sehen, was einen Ansatzpunkt für die ergonomische Konzeption von Assistenzsystemen im Fahrzeug darstellt (siehe hierzu ▶ Kap. 9).

2.6 Systemzuverlässigkeit

Die Erfahrung zeigt nun aber, wie bereits im letzten Abschnitt angedeutet, dass menschliche und technische Systemelemente nicht unter allen Umständen im Sinne des gedachten Einsatzzweckes funktionieren. Man versucht deshalb die Wahrscheinlichkeit des „Ausfalls“ von Systemelementen abzuschätzen (sog. *probabilistisches Verfahren*). Indem man diese mit den Regeln der Booleschen Algebra unter Berücksichtigung der Systemstruktur verknüpft und die zu erwartende Gesamtausfallwahrscheinlichkeit berechnet, können nicht nur die Elemente ausfindig gemacht werden, die die Gesamtausfallwahrscheinlichkeit besonders stark beeinflussen, sondern es kann auch durch eine Umstellung der Systemstruktur, die natürlich so vorgenommen werden muss, dass die Gesamtfunktion erhalten bleibt, eine Verbesserung der Ausfallwahrscheinlichkeit erreicht werden. Unter anderem kann dieses Vorgehen – insbesondere wenn der Mensch in die Betrachtung mit einbezogen wird – bis hin zu Veränderungen der Organisation und zu organisatorischen Vorschriften führen, was im Bereich des Straßenverkehrs u. a. durch die Vielzahl an Verkehrsvorschriften deutlich wird.

2.6.1 Sicherheit, Risiko, Grenzrisiko und Schutz

Im Meyers Großes Universallexikon von 1985 findet sich einer sehr allgemeine Definition der Sicherheit: „***Sicherheit*** ist der Zustand des Unbedrohtseins, der sich objektiv im Vorhandensein von Schutzeinrichtungen bzw. Fehlen von Gefahrenquellen darstellt und subjektiv als Gewissheit von Individuen oder sozialen Gebilden über die Zuverlässigkeit von Sicherungs- und Schutzeinrichtungen empfunden wird“. Besonders zu beachten hierbei ist, dass sich „Sicherheit“ primär auf das Verhalten des Systems gegenüber dem Menschen bezieht. Sicherheit wird durch das Maß der „Abwesenheit von Gefahr“ beschrieben. Unter ***Gefahren*** aller Art versteht man Beeinträchtigungen von Leben und Gesundheit, soweit ihre Wirkung bei bestimmungsgemäßer Verwendung technischer Erzeugnisse ein nach dem jeweiligen Stand der Technik zumutbares Risiko überschreitet … (DIN 31 000 bzw. VDI 1000). Dabei gelten folgende Definitionen:

- *Sicherheit* ist eine Sachlage, bei der das Risiko nicht größer als das Grenzrisiko ist.
- *Grenzrisiko* ist das größte noch vertretbare Risiko eines bestimmten technischen Vorgangs oder Zustands. Im Allgemeinen lässt sich das Grenzrisiko zwar nicht quantitativ erfassen, im Straßenverkehr gilt aber die allgemein akzeptierte Übereinkunft, dass jede Schädigung von Objekten und insbesondere Menschen nicht toleriert werden kann.

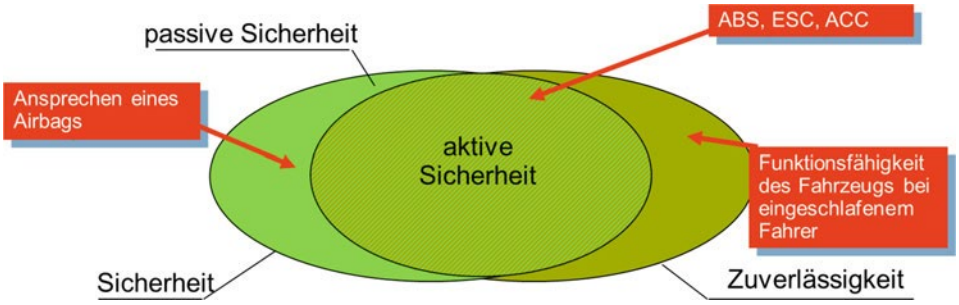


Abb. 2.26 Bereiche der Sicherheit und Zuverlässigkeit und deren Zuordnung zu den Begriffen „aktive" und „passive" Sicherheit

- *Schutz* ist die Verringerung des Risikos durch Maßnahmen, die entweder die Eintrittshäufigkeit oder das Ausmaß des Schadens oder beides einschränken. Oftmals lässt sich nur durch das Zusammenwirken mehrerer derartiger Maßnahmen Sicherheit erreichen.

Zwischen Sicherheit und Gefahr besteht also auf der Achse zunehmenden Risikos ein kontinuierlicher Übergang. Pragmatisch wird zwischen den Bereichen Sicherheit und Gefahr durch das im obigen Sinn definierte Grenzrisiko getrennt. Unter dem Risiko selbst wird in Übereinstimmung mit im wirtschaftswissenschaftlichen Bereich üblichen Definitionen, welche die erwartete Schadenshäufigkeit und den erwarteten Schadensumfang oft multiplikativ miteinander verknüpft, eine Wahrscheinlichkeitsaussage über den zu erwartenden ungünstigen Ablauf eines Vorgangs verstanden. Im Straßenverkehr reduziert sich diese Definition oftmals allein auf die Betrachtung der Schadenshäufigkeit.[13]

13 Das ist nicht grundsätzlich so: die meisten Unfallstatistiken registrieren nur solche Unfälle, bei denen es zu (meldepflichtigen) Verletzten und Getöteten gekommen ist. Im juristischen Sinn ist aber jede Schädigung (auch geringfügige Sachschäden) regulierungspflichtig. Aus dieser Verpflichtung ergibt sich auch die ganz allgemeine Aufgabe des Autofahrers, seine Fahrt so zu bewerkstelligen, dass jede Berührung von festen und beweglichen Objekten und Personen vermieden wird.

2.6.2 Zuverlässigkeit, Fehler und Sicherheit

Um den Zusammenhang von Zuverlässigkeit und Sicherheit zu verstehen, kann man sich den Bereich der Sicherheit und den der Zuverlässigkeit in Form von Venn-Diagrammen gezeichnet vorstellen (siehe Abb. 2.26). Danach gibt es also einen zentralen und erwünschten Bereich, in dem Sicherheit durch den zuverlässigen Betrieb erreicht wird. Dies ist der Bereich, den man als „aktive Sicherheit" („primary safety") bezeichnet. Er wird vor allem durch ein zuverlässiges Zusammenwirken von Fahrzeug und Fahrer, aber u. a. auch durch Assistenzsysteme wie ABS, ESC, ACC erreicht. Wird dieser gemeinsame Bereich verlassen, so kann dennoch ein gewisses Maß an Sicherheit zumindest für die Passagiere des Fahrzeugs außerhalb der (normalen) Funktionsfähigkeit gewährleistet werden, indem beispielsweise Sicherungselemente wie Knautschzone, Sicherheitsgurt und Airbag wirksam werden. Dieser Bereich wird bekanntlich als „passive Sicherheit" („secundary safety") bezeichnet. Es sei hier auf eine häufig beobachtete Verwechslung aufmerksam gemacht: passive Sicherheit kann sowohl durch passive Sicherungselemente, wie z. B. die Knautschzone als auch durch aktive Sicherungselemente, wie z. B. den Airbag erreicht werden. Der Bereich außerhalb der Sicherheit bei Erhalt der (technischen) Funktionsfähigkeit ist vollkommen unerwünscht. Er würde beispielsweise ein führerloses aber sonst technisch intaktes Fahrzeug kennzeichnen.

Nach ISO 8402 leiten sich alle mit der Zuverlässigkeit in Verbindung stehenden Begriffe von der Qualität ab, wie er in Gl. 2.1 definiert worden ist. Danach ist *Zuverlässigkeit* ein zusammenfassender

Ausdruck zur Beschreibung der Verfügbarkeit und ihrer Einflussfaktoren Funktionsfähigkeit, Instandhaltbarkeit und Instandhaltungsbereitschaft (ISO 9000, Teil 4). *Verfügbarkeit* ist die Fähigkeit einer Betrachtungseinheit[14], in einem Zustand zu sein, in dem sie zu einem vorgegebenen Zeitpunkt oder während eines vorgegeben Zeitintervalls eine geforderte Funktion unter vorgegebenen Bedingungen erfüllen kann, vorausgesetzt, dass die erforderlichen Mittel bereitgestellt sind (IEC 50-191). Für die Merkmale der Betrachtungseinheit bzw. die Funktion können *zugelassene Abweichungen* bzw. *Forderungen* definiert werden. Überschreitet der augenblickliche *Zustand* diese Forderungen, so spricht man von einem *Fehler*, einer Störung bzw. von Ausfall (= Beendigung der Funktionsfähigkeit) oder Versagen (= Entstehen einer Störung bei zugelassenem Einsatz der Einheit). Diese etwas abstrakt wirkenden Definitionen ermöglichen es, aus dem kontinuierlichen zeitlichen Verlauf einer Beschaffenheit diskrete, zählbare Fehler zu definieren, was notwendig ist, wenn man Wahrscheinlichkeiten für das Versagen abschätzen möchte.

Auf experimenteller Basis erhält man so die so genannte Ausfall- bzw. Fehlerquote κ

$$\kappa = \frac{\text{Zahl der beobachteten Fehler}}{\text{Zeiteinheit}} \quad (\text{z. B. } [1/\text{Jahr}]) \tag{2.25}$$

Sie ist eine so genannte a posteriori Größe, die bei hinreichend langer Beobachtungszeit und genügend großer beobachteter Fehlerzahl ein guter Schätzwert für die theoretische Ausfall- bzw. Fehlerrate λ ist. Um im obigen Sinne Wahrscheinlichkeiten aufgrund des Wirkungsgefüges abzuschätzen, müssen diese Größen gemäß dem Laplace'schen a priori Wahrscheinlichkeitsbegriff[15] p

$$p = \frac{\text{Zahl der beobachteten Ereignisse i}}{\text{Zahl der möglichen Ereignisse n}} \tag{2.26}$$

bzw. dessen a posteriori Schätzwert h

$$h = \frac{\text{beobachtete Häufigkeit N}}{\text{Zahl der Beobachtungen n}} = \hat{p} \tag{2.27}$$

in eine dimensionslose Wahrscheinlichkeit umgerechnet werden. Dies ist nur mit der Annahme über die Verteilungsfunktion der zugrunde liegenden Wahrscheinlichkeit möglich. Die einfachste Verteilungsform hierfür stellt die Exponentialverteilung[16] dar. Es gilt dann für die Wahrscheinlichkeit R, dass es *nicht* zu einem Fehler kommt:

$$R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \tag{2.28}$$

Die Größe R(t) kennzeichnet somit die zeitabhängige Zuverlässigkeit der betrachteten Einheit. Folglich ist die Fehlerwahrscheinlichkeitsfunktion F(t) das mathematische Komplement zu der Zuverlässigkeit:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \tag{2.29}$$

Die beiden Funktionen R(t) und F(t) kennzeichnen den grundsätzlichen Zusammenhang, dass mit der Zeit die Zuverlässigkeit jedes Systems abnimmt und die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Fehlers zunimmt. Die Größe λ kann auch als die so genannte Prozesskonstante bezeichnet werden, die letztlich charakterisiert, wie dicht Ereignisse auftreten können, wie oft also praktisch die Chance für einen Fehler besteht. Deshalb charakterisiert ihr Kehrwert

$$1/\lambda = \text{MTTF} \tag{2.30}$$

die mittlere Zeit bis zu einem Fehler (Mean Time To Failure, MTTF). Sie ist ein anschaulicher Wert, der das Verständnis der oft als abstrakt empfundenen Wahrscheinlichkeitswerte verständlich macht.

14 „Betrachtungseinheiten" können dabei je nach dem Zweck der Betrachtung einzelne Komponenten des Fahrzeugs sein, das Fahrzeug insgesamt, das System bestehend aus Fahrer und Fahrzeug und insgesamt das gesamte Verkehrssystem.

15 Eine a priori-Wahrscheinlichkeit ist beispielsweise die Wahrscheinlichkeit beim Würfeln eine bestimmte Zahl zu werfen. Sie ist p = 1 / 6.

16 Bei den Zuverlässigkeitsbetrachtungen spielen auch andere Verteilungsformen eine wichtige Rolle. Im Wesentlichen sind dies bei in der Praxis quasi beliebig dichten Ereignissen die Normalverteilung, die logarithmische Normalverteilung (durch sie kann berücksichtigt werden, dass kein Ereignis in negativen Zeiten auftreten kann) und die weit gehend anpassbare Weibull-Verteilung. Im Rahmen dieser Abhandlung soll aber auf dieses Spezialgebiet nicht weiter eingegangen werden.

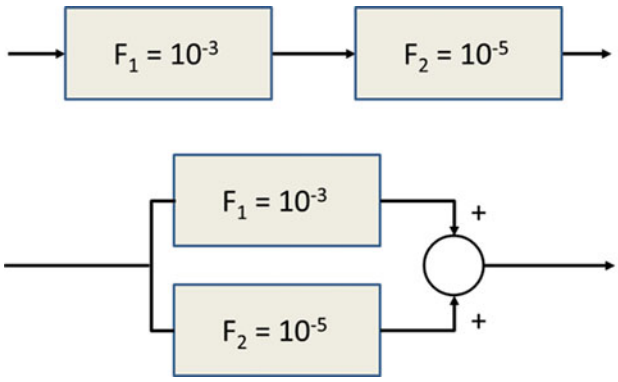


Abb. 2.27 Serielle und parallele Verschaltung von zwei Systemelementen

Die dimensionslose Wahrscheinlichkeit ermöglicht es, auf der Grundlage des Strukturbildes die Gesamtwahrscheinlichkeit E_{Ges} eines Ereignisses mithilfe der Booleschen Algebra zu berechnen. Sind die Ereignisse durch eine ***UND-Verknüpfung*** miteinander verbunden, tritt das Gesamtereignis nur ein, wenn alle beteiligten n Ereignisse E_i zugleich eintreten. Es gilt dann:

$$E_{Ges} = \prod_{i=1}^{n} E_i \tag{2.31}$$

Bei einer ***ODER-Verknüpfung*** tritt das Gesamtereignis E_{Ges} ein, wenn nur eines der Einzelereignisse Wirklichkeit wird oder mehrere davon oder sogar alle[17]. Die Formel dafür ist:

$$E_{Ges} = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - E_i) \tag{2.32}$$

Sind beispielsweise zwei Systemelemente hintereinander (seriell) geschaltet (siehe Abb. 2.27 oben), die jeweils eine Fehlerwahrscheinlichkeit von $F_1 = 10^{-3}$ und $F_2 = 10^{-5}$ haben, so wirkt sich der Fehler eines Elements immer auf die Gesamtfehlerwahrscheinlichkeit aus; es gilt also die ODER-Verknüpfung:

$$\begin{aligned} F_{Ges} &= 1 - (1 - F_1) \cdot (1 - F_2) \\ &= 1 - (1 - 10^{-3}) \cdot (1 - 10^{-5}) \\ &= 10^{-3} \end{aligned} \tag{2.33}$$

Sind hingegen die Systemelemente parallel geschaltet (siehe Abb. 2.27 unten) und nehmen beide über einen Summenpunkt auf das Systemgesamtergebnis Einfluss, so tritt ein Fehler nur dann ein, wenn beide zugleich versagen. Es gilt also die UND-Verknüpfung:

$$F_{Ges} = F_1 \cdot F_2 = 10^{-3} \cdot 10^{-5} = 10^{-8} \tag{2.34}$$

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse in den Gln. 2.33 und 2.34 zeigt den großen Vorteil der Redundanz, die immer dazu beiträgt, dass durch sie die Gesamtfehlerwahrscheinlichkeit kleiner bzw. die Zuverlässigkeit größer (siehe Gl. 2.29) wird. Welche Konsequenzen dies für den Einsatz von Assistenzsystemen hat, wird in ▶ Abschn. 9.3 näher erläutert.

17 Dieses mathematische „einschließende Oder" unterscheidet sich von dem umgangssprachlichen „ausschließenden Oder", das im Allgemeinen im Sinne von „entweder … oder …" verstanden wird.

2.6.3 Menschlicher Fehler und Unfallwahrscheinlichkeit

Im Sinne der Laplace'schen Definition des a posteriori Schätzwertes wird die menschliche Fehlerwahrscheinlich (Human Error Probability) HEP definiert als:

$$\text{HEP} = \frac{\text{Anzahl der fehlerhaft durchgeführten Aufgaben eines Typs i}}{\text{Anzahl der durchgeführten Aufgaben des Typs i}} \quad (2.35)$$

Im Allgemeinen kann man für hochgeübten Tätigkeiten durchschnittlich von einem Wert $\text{HEP} \approx 10^{-3}$ ausgehen, während für wissensbasierte Tätigkeiten die Fehlerwahrscheinlichkeit schon auf Werte zwischen 10^{-1} und 10^{-2} steigt (u. a. Swain und Gutmann, 1983; siehe auch ▶ Abschn. 3.4). Doch was bedeuten solche Angaben aus Sicht des Einzelnen? Es ist logisch, dass derjenige keinen Straßenverkehrsunfall erfährt, der sich nicht in den Straßenverkehr begibt. Es geht also um die so genannte Prozessintensität, wenn man von den Fehlern zur eher anschaulichen mittleren Zeit zwischen Fehlern (MTBF) gelangen will. Für die Prozessintensität kann man auf Untersuchungen von Pöppel (2000) zurückgreifen, der für hochgeübte Tätigkeiten eine interne Zykluszeit des Menschen von 3 Sekunden und für neuartige Tätigkeiten eine von 2 Sekunden gefunden hat (siehe auch ▶ Abschn. 3.3.1). Das bedeutet, dass man für hochgeübte Tätigkeiten, wie sie das stressfreie normale Autofahren darstellt, damit rechnen muss, dass man im Mittel alle 3 Sekunden die „Chance" für einen Fehler hat. Bei einer Wahrscheinlichkeit von 10^{-3} wird die MTBF also ca. 50 min betragen.

Nicht jeder kleine Fehler führt aber zu einem Unfall. Er wird entweder rechtzeitig korrigiert oder er bleibt folgenlos. Folgenlos bleibt er, wenn kein Konfliktobjekt vorhanden ist (z. B.: Überfahren einer roten Ampel, wenn kein Querverkehr vorhanden ist). Erst wenn als Folge des Fehlers (oder mehrerer Fehler) ein Schadensereignis droht und dieses nur durch eine Vermeidungsaktion des oder der Beteiligten vermieden werden kann, spricht man von einem Konflikt, bei Fahraufgaben speziell vom Verkehrskonflikt (Zimolong 1982). Auslösendes Ereignis für das Auftreten eines Verkehrskonfliktes sind entweder fehlerhafte Handlungen des Fahrzeugführers oder in seltenen Fällen Fehler technischer Systeme des Fahrzeuges. Erst bei Vorhandensein von stationären oder bewegten Konfliktobjekten (z. B. andere Verkehrsteilnehmer, Bäume, Straßenbegrenzungen) kommt es zum Verkehrskonflikt. Beim Alleinunfall liegt die einzige Möglichkeit einer Vermeidungsreaktion beim Konflikt auslösenden Fahrer. Nur der unbewältigte Konflikt mündet in einen Unfall, das Schadensereignis. Diese grundsätzliche Betrachtung der Unfallentstehung wurde unter anderem von Durth und Bald (1987) vorgeschlagen. Von Reichart (2001) wurde diese Modellvorstellung der Entstehung eines Unfalles in einer Fehlerbaumdarstellung interpretiert (siehe ◘ Abb. 2.28). Im Sinne des Fehlerbaums wird der Unfall bzw. das Schadensereignis als TOP-Event bezeichnet wird.[18]

Mit dem Wert für die menschliche Fehlerwahrscheinlichkeit bei hochgeübten Tätigkeiten sowie einigen zusätzlichen Annahmen (Situationen wechseln ständig, was mit einer Wahrscheinlichkeit von $p = 0{,}5$ charakterisiert wird; das Auftreten von Konfliktobjekte kann mit $p = 10^{-2}$ realitätsnah abgeschätzt werden – all diese Bedingungen müssen im Sinne einer UND-Verknüpfung zusammentreffen) lässt sich die Wahrscheinlichkeit für einen Konflikt zu $p = 10^{-6}$ abschätzen. Erst wenn nun auch noch eine Vermeidungsaktion fehlschlägt ODER ganz ausfällt (da es sich hier für den Fahrer um ein eher seltenes Ereignis handelt, wird beides zu $p = 10^{-2}$ geschätzt) kommt es zu einem TOP-Event, zu dem Unfall. Seine Wahrscheinlichkeit kann also pauschal zu $p = 10^{-7}$ geschätzt werden.

Doch was bedeutet das nun in der praktischen Anwendung? Um ein Gefühl für diese Wahr-

18 An der Spitze eines Fehlerbaums steht das TOP-Ereignis. Darunter befinden sich die „Zweige", die zu den Ereignissen führen, welche die Voraussetzung für das Zustandekommen des TOP-Events sind. Die Zweige werden in Abhängigkeit von der Logik des Gesamtablaufs durch UND- (&) bzw. ODER- (≥ 1) Verknüpfungen an den Verbindungsknoten miteinander verbunden.

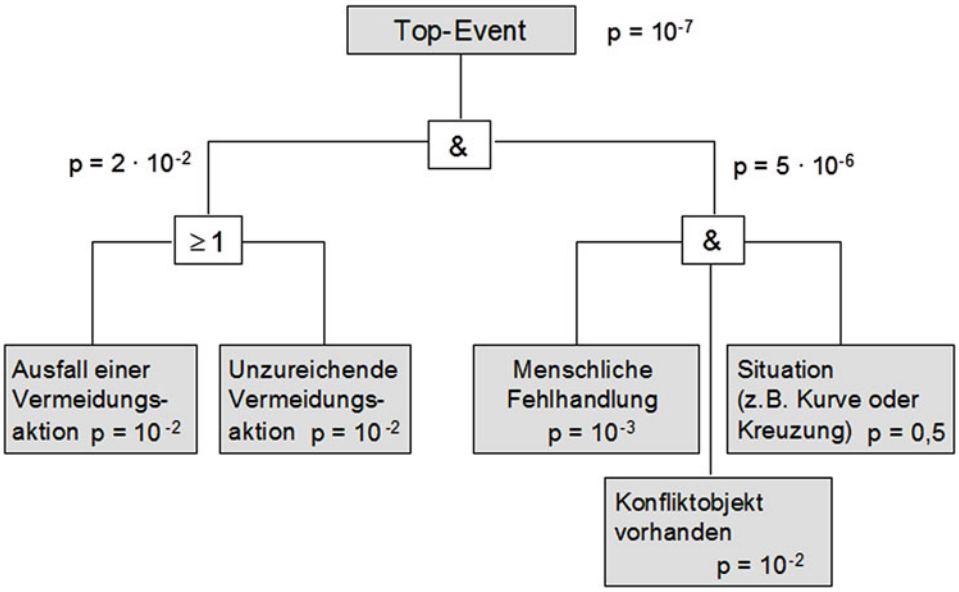


Abb. 2.28 Generisches Fehlerbaummodell der Unfallentstehung im Straßenverkehr

scheinlichkeit zu bekommen, ist es sinnvoll, die mittlere Zeit zwischen den Fehlern (MTBF) zu berechnen. Dafür ist es notwendig die oben erwähnte Prozessintensität zu kennen. Mit dem Wert der Zykluszeit des Menschen von 3 Sekunden und indem man unterstellt, dass im Durchschnitt ca. 1 Stunde pro Tag gefahren wird, ergibt sich mit der Berechnung des TOP-Event von Abb. 2.28 zu 10^{-7} eine mittlere Zeit zwischen Unfällen (ohne Aussage über die Schwere des Unfalls!) von ca. 23 Jahren. Für den einzelnen Fahrer ist also der Unfall ein eher seltenes Ereignis, was bedeutet, dass die subjektive Erfahrung in grobem Widerspruch zu der durch Zeitungsberichte wahrgenommenen Häufigkeit steht. Das mag unter anderen das subjektive Gefühl „mir kann nichts passieren" unterstützen.

2.6.4 Ableitung von Maßnahmen aus den Fehlerbaumanalysen

An Hand des Fehlerbaummodelles kann man den möglichen Nutzen von Verbesserungsmaßnahmen, die am Fahrzeug oder in der Infrastruktur eingreifen, bewerten. Dabei wird ermittelt, welche Fehlerereignisse allein oder welche minimalen Schnittmengen zum TOP-Ereignis führen können. Es handelt sich dabei um die Mengen von Fehlerereignissen, die mindestens vorliegen müssen, damit das TOP-Ereignis eintritt.

Die quantitative Auswertung der Fehlerbäume wird sowohl von Modellierungsfehlern wie auch von eventueller Unsicherheit der Eingangsdaten beeinflusst. Die Unvollständigkeit von Modellen oder die Unsicherheit von Eingangsdaten bleibt für die Beurteilung relativer Einflüsse von Fehlerarten auf das TOP-Ereignis oder die relative Wirkung von Verbesserungsmaßnahmen allerdings meist von geringer Bedeutung. Die anhand der Fehlerbaumrechnung ermittelten Absolutwerte spielen für den Anwendungszweck des Verfahrens dabei keine entscheidende Rolle, sie sollten allerdings im Sinne einer Plausibilitätsprüfung wenigstens grob die aus der Unfallstatistik gewonnenen Abschätzungen annähern.

Mittels der Fehlerbaumanalyse kann der relative Gewinn einer Verbesserungsmaßnahmen im Verhältnis zum Urzustand bewertet werden und damit eine differenzierte Auswahl der Maßnahmen erfolgen, die den größten relativen Gewinn versprechen (dabei wird zunächst vereinfachend 100 % Wirk-

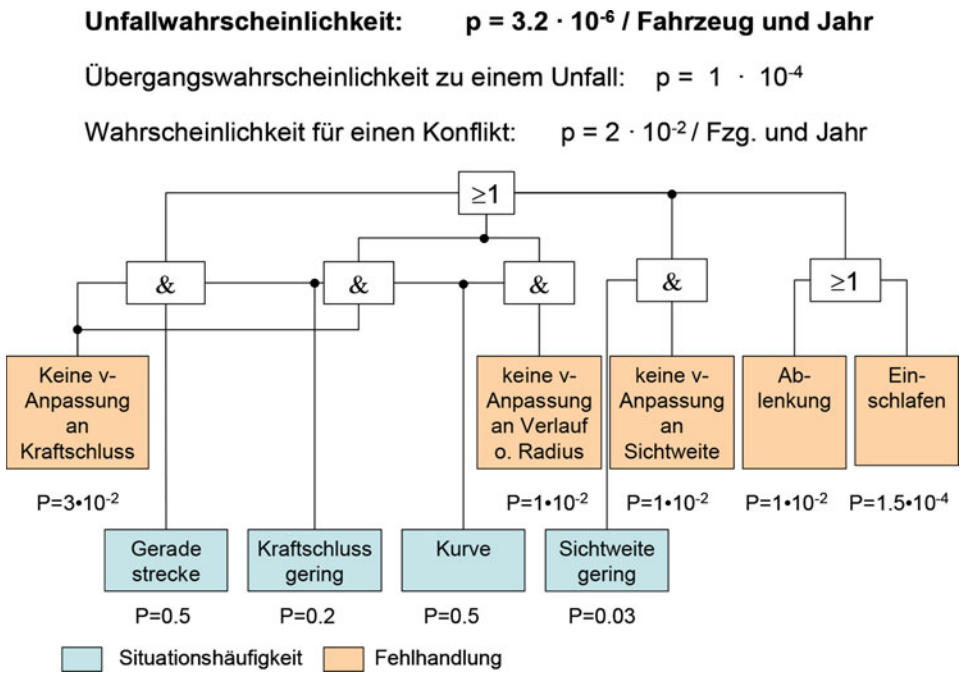


Abb. 2.29 Fehlerbaum zum Verkehrskonflikt „Fahrunfall unter Einfluss der Linienführung oder Witterung"

samkeit und 100 % Zuverlässigkeit/Verfügbarkeit der Maßnahme angenommen). Da aber auch technische Ausfälle der Verbesserungsmaßnahme oder deren Nichtnutzung durch den Menschen modelliert werden können, kommt man zu wesentlich realistischeren Aussagen über tatsächlich erreichbare Verbesserungspotentiale als in den üblichen pauschalen Annahmen über Unfallvermeidungspotentiale von Systemen.

Am Beispiel „Fahrunfall unter Einfluss der Linienführung oder Witterung" wird im Folgenden der Argumentation von Reichart (2001) folgend die Nutzung der Fehlerbaumethodik für die Auswahl von Verbesserungsmaßnahmen der aktiven Sicherheit gezeigt. An dem Fehlerbaummodell der Abb. 2.29, ist zusammengestellt, welche Einzelereignisse zum TOP-Ereignis des Fehlerbaumes führen. In der unteren Reihe sind die entsprechenden Situationen aufgeführt. Die zweite Reihe kennzeichnet die möglichen Fehlhandlungen des Fahrers. Mit den Zahlenangaben in Abb. 2.28 sowie Abschätzungen, die von Reichart vorgenommen wurden, ergibt sich damit für die Wahrscheinlichkeit eines Konflikts ein Wert von $p = 2 \cdot 10^{-2}$/Fahrzeug und Jahr. Mit der Übergangswahrscheinlichkeit zu einem Unfall von $p = 1 \cdot 10^{-4}$ wird die unbekannte Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von Konfliktobjekten und für das Fehlschlagen fahrerischer Vermeidungsaktionen aufgefangen. Wie Reichart feststellt, gilt diese Übergangswahrscheinlichkeit für eine überraschend große Zahl von Unfallarten. Damit errechnet sich schließlich eine Unfallwahrscheinlichkeit von $p = 3{,}2 \cdot 10^{-4}$ pro Fahrzeug und Jahr, was mit der amtlichen Unfallstatistik von 1994, anhand derer sich eine Wahrscheinlichkeit von $p = 9{,}2 \cdot 10^{-4}$ (ohne Fahrunfälle beim Abbiegen) berechnen lässt, hinreichend gut übereinstimmt.

Auf der Grundlage dieses Fehlerbaums kann nun eine Importanzrechnung durchgeführt werden, welche die Beiträge von Situationswahrscheinlichkeiten und Fehlerkombinationen errechnet, die wesentlich zum TOP-Ereignis beitragen. Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Tab. 2.1 zusammengefasst. Damit resultieren dominante Beiträge zur Eintrittswahrscheinlichkeit aus der Unterlassung der Fahrspurkontrolle wegen Ablenkung und Abwendung sowie aus

Tab. 2.1 Importanz des Beitrags zum TOP „Fahrunfall unter Einfluss der Linienführung oder Witterung" (Reichart 2001)

Situation/Fehlerart (Minimalschnitt)	Importanz (Beitrag zum TOP)
Unterlassen der Fahrspurkontrolle wegen Ablenkung	46,6 %
Keine Anpassung der Geschwindigkeit an Radius oder Verlauf und Befahren einer Kurve	23,3 %
Keine Anpassung der Geschwindigkeit an Kraftschluss und Kraftschluss gering und Befahren einer Kurve	14 %
Keine Anpassung der Geschwindigkeit an Kraftschluss und Kraftschluss gering und Befahren einer geraden Strecke	14 %
Geringe Sichtweite	1,4 %

dem Einfluss der fehlenden Anpassung der Geschwindigkeit an die Linienführung beziehungsweise an die Kraftschlussverhältnisse. Die Situationen „geringe Sichtweite" sind in ihrer Häufigkeit pro Jahr sehr gering, folglich ist das Verbesserungspotential bezüglich der Verkehrssicherheit durch technische Maßnahmen hier als eher niedrig einzuschätzen. Situationen mit „geringem Kraftschluss" weisen demgegenüber eine größere Häufigkeit auf und spielen in vielen weiteren Fehlerbaummodellen von Unfalltypen eine wichtige Rolle. Eine Information über die Kraftschlussverhältnisse kann also eine wirksame Verbesserungsmaßnahme darstellen (z. B. Bubb 1975; Assmann 1985; Bachmann 1998). Leider gibt es aber derzeit keine Ansätze, wie eine verlässliche, vorausschauende Kraftschlussinformation realisiert werden könnte. Eine Möglichkeit der Car-to-Car-Kommunikation (Car2Car) bestünde u. U. darin, dass ein vorausfahrenden Fahrzeug, das einen verminderten Reibbeiwert – beispielsweise über die Information des ABS oder ESP – feststellt, dies funktechnisch an nachfolgende Fahrzeuge weitergibt.

Da fast so viele Fahrunfälle auf gerader Strecke sowie in Kurven auftreten, sind Maßnahmen, die eine Voraussicht auf den Kurvenverlauf bieten oder vor dem Abkommen von der Fahrspur warnen, als wirksamer einzuschätzen als die Information über die zweckmäßige Kurvengeschwindigkeit. Letztere wäre aber mit einer Einbeziehung der Kraftschlussinformation sehr wirksam gegen das Abkommen von der Fahrspur in Kurven. Dieser Schluss kann unmittelbar durch die quantitative Auswertung der Fehlerbaummodelle mit und ohne diese Maßnahme gezogen werden.

Tab. 2.2 Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen für Fehlerbaum der Abb. 2.29

Fehlerart	Einfluss auf TOP-Ereignis	Verbesserungsmaßnahmen
Unterlassung der Fahrspurkontrolle	direkt	ergonomische Cockpitgestaltung (Instrumentierung vor dem Fahrer oder HUD), Spurhalteunterstützung (Heading Control), Warnung bei drohendem Abkommen von der Fahrbahn
Keine Anpassung der Geschwindigkeit an Kurvenradius/-verlauf	nur für Durchfahrt von Kurven	Dynamische Stabilitätsregelung, Kurvenverlauf aus digitaler Straßenkarte, Anzeige oder automatische Anpassung der Sollgeschwindigkeit
Keine Anpassung der Geschwindigkeit an Kraftschlussverhältnisse	nur bei niedrigem Kraftschluss	Kraftschlussmessung, Anzeige oder Warnung
Keine Anpassung der Geschwindigkeit an Sichtverhältnisse	nur bei geringer Sicht	Sichtweitenmessung mit Anzeige oder Warnung

Tabelle 2.2 gibt eine Zusammenstellung von potentiellen Verbesserungsmaßnahmen für die im Fehlerbaummodell der Abb. 2.29 berücksichtig-

ten Fehlerarten. Für die Fehlerart „Unterlassung der Fahrspurkontrolle“ kann durch eine ergonomische Cockpitgestaltung (z. B.: „alle wichtigen Instrument im direkten Blickfeld, z. B. durch Nutzung der HUD-Technologie“) zwar die Wahrscheinlichkeit längerer Ablenkungen oder Abwendungen von der Fahrspurkontrolle reduziert werden (siehe u. a. Gengenbach 1997). Ein wirksamerer Schutz ließe sich aber erst durch TLC-Warnung oder Spurführungsassistenten (z. B. Naab 1998; Penka 2000) erreichen, wobei diese auch gegen die Fehlerart „Einschlafen“ wirksam würden. Eine vertiefte Analyse der Fehlerart „Keine Anpassung der Geschwindigkeit an den Kurvenverlauf“ zeigt, dass diese eher ein Problem mangelnder vorausschauender Informationsaufnahme als ein Problem der Fahrzeugstabilisierung ist. Daraus folgt unmittelbar, dass unter dem Aspekt der Verkehrssicherheit eine Geschwindigkeitsempfehlung anhand der Kenntnis des Kurvenverlaufs aus einer digitalen Straßenkarte dem Einsatz eines Stabilisierungssystems vorzuziehen wäre. Liegt die Problematik jedoch eher in einer Überschätzung der Kraftschlussreserve ist dagegen das Stabilisierungssystem die bessere Maßnahme. Das bedeutet, dass letztlich nur die Kombination aus beiden Maßnahmen zu einem spürbaren Erfolg führen würde.

Die quantitative Auswertung des Fehlerbaumes mit allen verfügbaren Verbesserungsmaßnahmen unter Berücksichtigung ihres potentiellen Ausfalles oder ihrer Nichtnutzung durch die Fahrer liefert schließlich eine Eintrittswahrscheinlichkeit des TOP-Ereignisses von $p = 7 \cdot 10^{-6}$. Dies bedeutet eine Reduktion der Eintrittswahrscheinlichkeit um einen Faktor von rund 2800 gegenüber der ursprünglichen Fehlerbaumrechnung ohne Verbesserungsmaßnahmen. Damit kann selbst bei einer vergleichsweise großen Datenunsicherheit von einem hohen Verbesserungseffekt der Maßnahmen ausgegangen werden.

Die hier wiedergegebene Argumentation ist als Beispiel dafür zu sehen, dass man durch eine Zuverlässigkeitsbetrachtung normalerweise in Verbindung mit der Analyse von Unfallstatistiken zu interessanten Schlussfolgerungen gelangen kann. Zur Weiterführung in diesem Zusammenhang wird auf die Dissertationen von Reichart (2001) und Gründl (2005) verwiesen.

Literatur

Verwendete Literatur

Assmann, E.: Untersuchung über den Einfluss einer Bremswegganzeige auf das Fahrverhalten. Dissertation an der Technischen Universität München (1985)

Bachmann, T.: Wechselwirkungen im Prozess der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn. VDI Fortschrittsberichte, Reihe 12, VDI-Verlag, Düsseldorf (1998)

Bergmeier, U.: Kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem - Entwicklung und experimentelle Absicherung. Dissertation an der TU-München (2009)

Bolte, U.: Das aktive Stellteil – ein ergonomisches Bedienkonzept Fortschrittsberichte VDI-Reihe 17, Bd. 75. VDI-Verlag, Düsseldorf (1991)

Bubb, H.: Untersuchung über die Anzeige des Bremsweges im Kraftfahrzeug. Dissertation, Technischen Universität München (1975)

Bubb, H.: Systemergonomie. Teil 5. In: Schmidtke, H. (Hrsg.) Ergonomie. Hanser Verlag, München, Wien (1993)

Crossmann, E.R.F.W.; Szostak, H.: Man-Machine-Models for Car-Steering. Fourth Annual NASA-University Conference on Manual Control. National Aeronautics and Space Administration, Washington (1969)

Daenzer, W.F., Huber, F. (Hrsg.): Systems engineering: Methodik und Praxis. Industrielle Organisation, Zürich (1992)

Donges, E.: Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug. Zeitschrift für Verkehrssicherheit 24, S. 98–112 (1978)

Durth, W., Bald, S.: Risikoanalysen im Straßenverkehr. Forschungsauftrag FE 02.111 R86A des Bundesministers für Verkehr, Schlussbericht, TH Darmstadt (1987)

Eckstein, L.: Entwicklung und Überprüfung eines Bedienkonzepts und von Algorithmen zum Fahren eines Kraftfahrzeugs mit aktiven Sidesticks Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 12, Bd. 471. VDI-Verlag, Düsseldorf (2001)

Fastenmeier, W., Hinderer, J., Lehnig, U., Gstalter, H.: Analyse von Spurwechselvorgängen im Verkehr. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft **1**(55), 15–23 (2001)

Fiala, E.: Lenken von Fahrzeugen als kybernetische Aufgabe. Automobiltechnische Zeitschrift **68**(5), 156 (1966)

Fleck, R.: "Aktivlenkung " – ein wichtiger erster Schritt zum Steer-by-Wire. Tagung "PKW-Lenksysteme - Vorbereitung auf die Technik von morgen", Haus der Technik e. V., Essen, 02.-03.April. (2003)

Gengenbach, R.: Fahrerverhalten im Pkw mit Head-Up-Display. Gewöhnung und visuelle Aufmerksamkeit. VDI Fortschrittsberichte Reihe 12: Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik. Nr. 330 (1997)

Gillet, G.: Ergonomische Optimierung eines Aktiven Stellteils. Dissertation, an der Technischen Universität München (1999)

Godthelp, H.: Studies on Human Vehicle Control. TNO, Institute for Perception, Soesterberg (1984)

Gründl, M.: Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspo-

tenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen. Inauguraldissertation an der Universität Regensburg (2005)

Guan, H., Gao, Z., Guo, K., et al.: An Optimal Preview Acceleration Model for Velocity Control in DriverVehicle-Environment System. In: Proceeding of AVEC 2000, S. 525–530. Taylor & Francis, Ann Arbor (2000)

Herrin, G.D., Neuhardt, J.B.: An Empirical Model for Automobile Driver Horicontal Curve Negotiation. Human Factors, Vol. 16, No 2, April (1974)

Honda Motor Co. 2000: Fact Book, S2000 TypeV. http://www.honda.co.jp/factbook/auto/s2000/ 200007/index.html (auf Japanisch).

Horst, van der, R., Hogema, J.: Time-to-Collision and Collision Avoidance Systems. Proceedings of the 6th ICTCT Workshop: Safety Evaluation of Traffic Systems, Salzburg, S. 109–121 (1994)

Huang, P.: Regelkonzepte zur Fahrzeugführung unter Einbeziehung der Bedienelementeigenschaften, Dissertation an der Technischen Universität München (2004)

Jürgensohn, T.: Bedienermodellierung. In: Timpe, K.-P., Jürgensohn, T., Kolrep, H. (Hrsg.) Mensch-Maschine-Systemtechnik – Konzepte, Modellierung, Gestaltung, Evaluation. Symposion Publishing, Düsseldorf (2000)

Kondo, M.: Richtungsstabilität (wenn Steuerbewegungen hinzukommen). Journal of the Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 7, No. 5, 6, 1953. (auf Japanisch), 1953

Lange, C.: Wirkung von Fahrerassistenz auf der Führungsebene in Abhängigkeit der Modalität und des Automatisierungsgrades. Dissertation an der Technischen Universität München (2008)

Lindsay, P. H., Norman, D. A. (1972): Human Information Processing. An Introduction to Psychology. New York, London

Merz, L.: Grundkurs der Regelungstechnik. Einführung in die praktischen und theoretischen Methoden. BI Hochschultaschenbücher, München, Wien (1973)

Meyers Großes Universallexikon, Bibliographisches Institut, Mannheim, 1985 Naab, K.: Heading Control - Ein System zur Fahrerunterstützung bei der Spurhaltung, Vortragsmanuskript, Seminar „ Fahrerassistenzsystem“ Haus der Technik, Essen, 1998

Meyers Großes Universallexikon, Bibliographisches Institut, Mannheim, 1985

Naab, K.: Heading Control - Ein System zur Fahrerunterstützung bei der Spurhaltung, Vortragsmanuskript, Seminar „Fahrerassistenzsystem“ Haus der Technik, Essen, 1998

Ohno, T.: Steering Control on a Curved Course. Japan SAE Review **20**(5), (1966)

Penka, A.: Vergleichende Untersuchung zu Fahrerassistenzsystemen mit unterschiedlichen aktiven Bedienelementen. Dissertation. Technische Universität München (2000)

Popiv, D., Rakic, M., Bengler, K., Bubb, H.: Bewertung der Antizipationsleistung des Fahrers bei Annäherungs- und Spurwechselvorgängen auf der Autobahn. Proc. 1. Automobiltechnisches Kolloquium, München-Garching, Deutschland, April 2009 (2009)

Poulton, EC.: Tracking Skill and Manual Control. Academic Press, New York, San Francisco, London (1974)

Pöppel, : Grenzen des Bewusstseins - Wie kommen wir zur Zeit und wie entsteht Wirklichkeit? Insel Taschenbuch, Frankfurt a.M. und Leipzig, 2000

Pressler, G.: Regelungstechnik, Grundelemente. Bibliographisches Institut Mannheim, Hochschultaschenbücher, Mannheim (1967)

Reichart, G.: Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 22 Mensch-Maschine-Systeme. VDI-Verlag, Düsseldorf (2001)

Schmidtke, H.: Der Leistungsbegriff in der Ergonomie. In: Schmidtke, H. (Hrsg.) Ergonomie, 3. Aufl. Carl Hanser-Verlag, München-Wien (1993)

Schulze, B.G.: The Application of Ergonomic Principles in the Design of Operating Controls. In Oborne, D. J., Jevis, J. A. (Eds.): Human Factors in Transport Research, Vol. 1, S.337-344, (1981)

Schweigert, M.: Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben. Dissertation an der Technischen Universität München (2003)

Sheridan, T.B., Ferrel, W.R.: Man-Machine-Systems: Information, Control, and Decision Models of Human Performance. The MIT Press, Cambridge, MA (1974)

Steward, J. D.: Human perception of Angular Acceleration and Implications in Motion Simulator. Vol. 8, Mo.4, J. Aircraft, (1971)

Swain, A.D., Guttmann, H.E: Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications. Sandia National Laboratories, Nureg/Cr-1278. Washington DC, (1983)

Tustin, A.: An Investigation of the Operators Response in Manual Control of a Power Driven Gun. C. S. Memorandum, Bd. 169. Metropolitan Vickers Electrical Co., Sheffield, England, S. 172–186 (1944)

Unbehauen, R.: Systemtheorie, Grundlage für Ingenieure. Oldenbourg, München Wien (1993)

Unselt, T., Breuer, J., Eckstein, L., Frank, P.: Avoidance of „Loss of Control Accidents“ Trough the benefit of ESP: FISITA 2004 Congress Proceedings (2004)

Wickens, C.D.: Engineering psychology and human performance. Charles E. Merrill publishing company, Columbus, Ohio (1984)

Wunsch, G.: Geschichte der Systemtheorie, Dynamische Systeme und Prozesse. Oldenbourg, München Wien (1985)

Yuhara, N., Tajima, L., Sano, S. et al.: Steer-by-Wire-Oriented Steeling System Design: Concept and Examination. Vehicle System Dynamics Supplement 33, S. 692–703, (1999)

Zimolong, B.: Verkehrskonflikttechnik, Grundlagen und Anwendungsbeispiele, Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr, Heft 35, Bergisch Gladbach, (1982)

Weiterführende Literatur

Bubb, H.: Systemtheoretische Ansätze. In: Luczak, H., Volpert, W. (Hrsg.) Handbuch der Arbeitswissenschaft, S. 77–82. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart (1997)

Der Mensch als Fahrer

Heiner Bubb, unter Mitwirkung von Mark Vollrath, Klaus Reinprecht, Erhard Mayer, Moritz Körber

3.1 Der Mensch als Information verarbeitendes System – 68
3.1.1 Systemtechnisches Modell des Fahrers – 68
3.1.2 Anatomisch-funktionales Modell – 68
3.1.3 Funktionell-neurophysiologisches Modell – 73

3.2 Elemente des Information verarbeitenden Menschen – 81
3.2.1 Informationsaufnahme – 81
3.2.2 Informationsverarbeitung – 105
3.2.3 Informationsumsetzung – 122

3.3 Informationsverarbeitung beim Autofahren – 126
3.3.1 Das Gefühl für die Zeit – 126
3.3.2 Blickverhalten des Menschen beim Führen eines PKWs – 126
3.3.3 Blickverhalten und innere Modelle – 144
3.3.4 Komfort und Diskomfort – 146
3.3.5 Belastung und Beanspruchung – 149

3.4 Fahrfehler – 151
3.4.1 Menschliche Zuverlässigkeit und Fahrfehler – 151
3.4.2 Ursachen menschlicher Fehler – 153

Literatur – 158

H. Bubb et al., *Automobilergonomie,* ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-8348-2297-0_3, © Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

3.1 Der Mensch als Information verarbeitendes System

3.1.1 Systemtechnisches Modell des Fahrers

Beim Führen eines Pkws muss der Mensch sehr viele Informationen aufnehmen, diese bewerten, Entscheidungen treffen und passende Handlungen einleiten. Aus informationstechnischer Sicht wird das Systemelement Mensch üblicherweise grafisch als Rechteck mit einer Eingangs- und einer Ausgangsseite dargestellt (◘ Abb. 3.1). Diese setzt sich dann aus den Blöcken Informationsaufnahme, Informationsverarbeitung und Informationsumsetzung zusammen. Die Eingangsseite des Menschen, die *Informationsaufnahme* ist durch die „fünf Sinne" charakterisiert[1], wobei den einzelnen Wahrnehmungsarten auch gleich die entsprechenden Sinnesorgane zuzuordnen sind. Für das Zurechtkommen im Straßenverkehr spielt die optische Wahrnehmung (Auge) die dominante Rolle, aber auch die akustische Wahrnehmung (Ohren), die kinästhetische (Bewegungs-)Wahrnehmung (Vestibularorgan) und die haptische (Berührungs-) Wahrnehmung (Mechanorezeptoren für Druck, Berührung und Vibration sowie die Stellungsrezeptoren des Skeletts). Dazu kommt das Empfinden für Geruch, Wärme bzw. Kälte.

Aus der kombinierten Verarbeitung dieser einzelnen Sinneskanäle bildet sich unser Organismus ein für die normalen Lebensumstände ausreichendes „objektives" Bild der Umwelt und des eigenen und fremden Handelns in dieser Welt und leitet daraus in der *Informationsverarbeitung* bestimmte beabsichtigte Handlungen ab, die durch die *Informationsumsetzung* in reales Geschehen verwandelt werden. Für diese Informationsumsetzung steht unserem menschlichen Organismus nur die mechanische Bewegung zur Verfügung, die durch Muskelkraft initiiert wird. Die Innervation der Muskulatur kann u. a. dazu verwendet werden, durch die Bewegung von Armen, Händen und Füßen Information auf das Fahrzeug zu übertragen und durch Bewegung des Sprechapparates den Luftschwingungen Information aufzumodulieren, um so nachrichtlichen Kontakt zu Mitmenschen oder bei entsprechender Ausstattung auch zum Fahrzeug herzustellen.

Für das Verständnis, wie der Mensch beim Autofahren Information aus der Umwelt aufnimmt, verarbeitet und zu entsprechenden Handlungen kommt, sind zwei Betrachtungsweisen hilfreich, die sich gegenseitig ergänzen und für das richtige Verständnis gleichzeitig zu betrachten sind.

- Einerseits ist zu betrachten, auf welchem Wege die Information in das Gehirn gelangt, an welchen Stellen sie dort verarbeitet wird und wie sie von dort zur Muskulatur gelangt, sodass die erdachten Handlungen in äußerlich sichtbare Reaktionen umgesetzt werden. Diese Betrachtungsweise geschieht mittels des „*Anatomisch-funktionalen Modells*".
- Anderseits ist der inhaltliche Aspekt von Interesse, der Aufschluss darüber gibt, was von der Umwelt und in welcher Weise diese von den Sinnesorganen erfasst wird, zu welchen Vorstellungen dies führt und wie sich daraus Handlungsentwürfe ergeben. Diese Betrachtungsweise erfolgt auf der Grundlage eines „*Funktionell-neurophysiologischen Modells*" des Menschen.

Im Folgenden werden zuerst diese beiden Modelle kurz vorgestellt. Dann werden die einzelnen Sinnesorgane soweit beschrieben, wie es für das Verständnis der Erfassung von autofahrrelevanter Information notwendig ist. Dem schließt sich dann eine genauere Betrachtung der Informationsverarbeitung im Kontext mit dem Autofahren an. Aus der Betrachtung und Kenntnis all dieser Eigenschaften lassen sich dann auch Fehlerquellen finden, die zu falschen und letztendlich auch gefährlichen Handlungen des Fahrers im Straßenverkehr führen.

3.1.2 Anatomisch-funktionales Modell

Information, die von den Sinnesorganen in elektrochemische Impulse umgesetzt wird, wird über

1 bei der klassischen Aufzählung der „fünf Sinne" wird üblicherweise der kinästhetische Sinn für Bewegung nicht erwähnt, offensichtlich weil das dafür notwendige Sinnesorgan äußerlich nicht unmittelbar sichtbar ist.

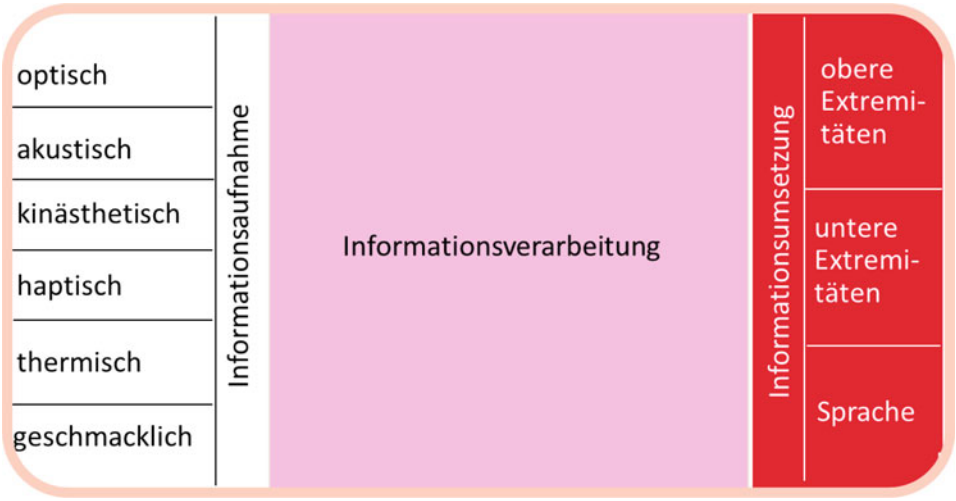


Abb. 3.1 Systemergonomisch orientiertes Bild des menschlichen Informationsbearbeiters

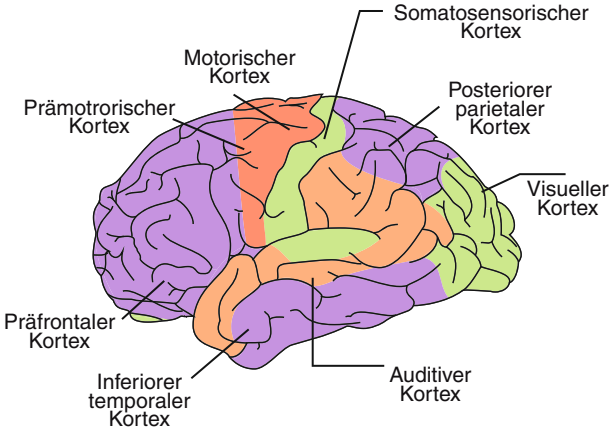


Abb. 3.2 Lage und Funktion verschiedener Gehirnareale (Augen und Gesicht sind links zu denken)

diverse Umschaltstellen mittels der nachgeschalteten und miteinander verschalteten Neuronenzellen zu den verschiedenen Gehirnarealen geleitet. Man unterscheidet dabei die direkten, zu den spezifischen Arealen zielenden Bahnen, die u. a. auch der kognitiv bewussten Wahrnehmung dienen und die indirekten, unspezifischen Bahnen, die viele Querverbindungen zu allen möglichen Gehirnarealen zeigen und die wesentlich der so genannten protopathischen Wahrnehmung dienen. Aus vielen neurophysiologischen Experimenten kennt man heute die den Sinnesorganen und die der Körperperipherie zugeordneten Cortices sowie die spezifische Funktion der verschiedenen Gehirnareale (siehe hierzu Abb. 3.2). Das Gehirn besteht – schon aus anatomischer Sicht – aus zwei symmetrischen Hälften, die miteinander durch den sog. Balken (Corpus callosum) verbunden sind. Die beiden Gehirnhälften verarbeiten Information weitgehend unabhängig voneinander, vermitteln diese aber gegenseitig durch den Balken. Viele Experimente zeigen, dass es etwa 5 bis 40 ms Sekunde benötigt, bis Information von einer Gehirnhälfte zur anderen gelangt. Da die ebenfalls jeweils zweifach vorhandenen Sinnesorgane und Körperseiten jeweils über Kreuz mit den Gehirnhälften verschaltet sind (d. h. z. B. das linke Auge ist wesentlich mit dem rechten visuellen Cortex verbunden) ergeben sich daraus durchaus praktische Konsequenzen. So argumentiert bei-

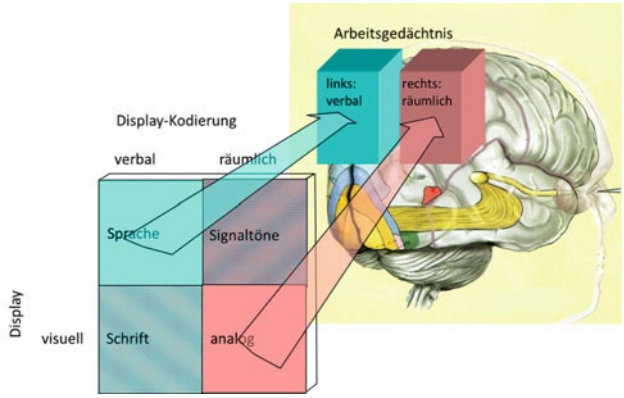


Abb. 3.3 Simultan auf die beiden Gehirnhälften übertragbare Information (nach Wickens 1992)

spielsweise Wittling (1992), dass ein von rechts in die Fahrbahn tretender Fußgänger eine geringfügig größere Chance der rechtzeitigen Reaktion des Autofahrers hätte, da er zuerst vom rechten Auge erfasst würde, dessen Information in die linke Gehirnhälfte gespielt würde; die dort realisierte Reaktion würde den rechten Fuß schneller erreichen, als wenn das Bild des Fußgängers zuerst in die rechte Gehirnhälfte projiziert worden wäre.

Erfahrungen von Patienten mit Gehirnverletzungen, grundlegende Untersuchen mit sog. Split-brain-Patienten[2] und die heute möglichen Untersuchungen mit funktionaler Magnetresonanztomographie zeigen eindeutig, dass die beiden Gehirnhälften zudem ganz unterschiedliche Funktionen bezüglich unserer Fähigkeiten und unseres Erlebens haben. In der linken Gehirnhälfte ist wesentlich die Fähigkeit des logischen, rationalen Denkens, des Problemlösens und der Sprache verankert. In ihr erfolgt das Denken sequentiell, analytisch mit der Tendenz zu einer objektiven Sicht, aber auch mit einer starken Fokussierung auf Einzelheiten. Die rechte Gehirnhälfte ist dem gegenüber wesentlich intuitiv, ganzheitlich und synthetisierend, in ihr ist das räumlich-mathematische Denken sowie musikalische Fähigkeiten verankert, ihr Denken ist stark subjektiv und emotional und durch einen Blick auf das Ganze geprägt. Diese Spezialisierung hat für die technische Gestaltung von Information Konsequenzen. Wie im Folgenden noch gezeigt werden wird, ist die Verarbeitungskapazität des Arbeitsgedächtnisses unseres Gehirns limitiert. Wie Wickens (1992) argumentiert, kann das zum Teil kompensiert werden, wenn man beispielsweise simultan unterschiedliche Informationsinhalte einerseits sprachlich auditiv und anderseits visuell grafisch (analog, s. u.) darstellt (siehe Abb. 3.3). Deshalb ist es in Grenzen möglich, quasi unabhängig voneinander die räumlich-analoge Aufgabe des Autofahrens und die sprachlich-digitale, auditive Aufgabe des Gesprächs mit einem Passagier durchzuführen.

Wegen seiner Bedeutung für das Autofahren ist noch kurz auf den motosensorischen (Gyrus präcentralis) bzw. sensomotorischen (Gyrus postcentralis) Cortex einzugehen, auf denen die Körperperipherie, also wesentlich sowohl das Fühlen der Körperhaltung und das taktile Gefühl der Berührung mit anderen Gegenständen (siehe hierzu ▶ Abschn. 3.1.3) abgebildet ist, als auch die Bewegungsmuster für die Aktivierung der jeweiligen Muskeln realisiert werden.[3] Abbildung 3.4 zeigt die räumliche Verteilung der Sensorik des Körpers und der motorischen Ansteuerung der Muskeln. Von besonderem Interesse hierbei ist die überproportionale Repräsentation des Gesichts- und Handbereichs, die mehr als 2/3 der gesamten Oberfläche der beiden Cortices ausma-

2 Ende der 50er Jahre behandelte man schwere Fälle der Epilepsie dadurch, dass man den Balken operativ durchtrennte (Sperry 1969).

3 Der „Doppelname" motosensorisch und sensomotorisch wird benutzt, weil eine genaue Trennung in einen rezeptiven und aktuatorischen Teil nicht möglich ist.

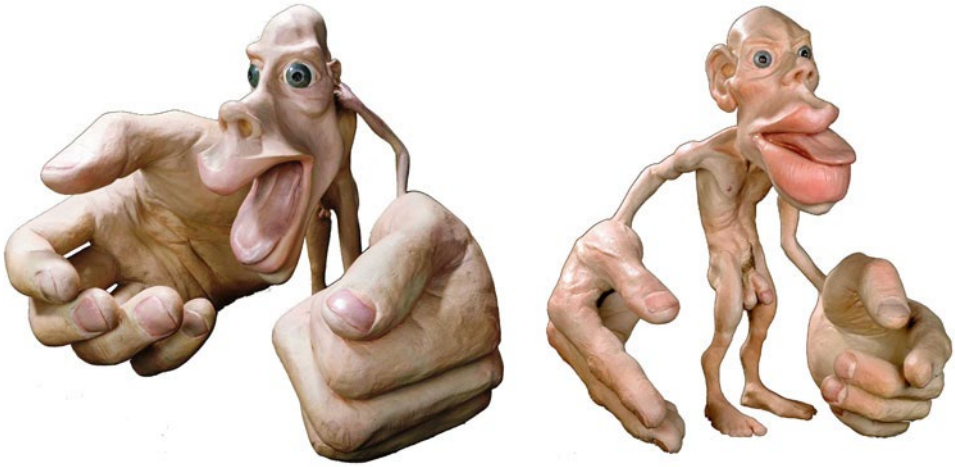


Abb. 3.4 Somatotopische Organisation des motorischen und sensomotorischen Cortex, veranschaulicht durch den "motorischen (links) und sensorischen (rechts) Homukulus" © The Natural History Museum, London (Image Ids: 001915 und 001914)

chen, sodass für den übrigen Körper nur ein Drittel übrig bleibt (siehe hierzu auch ▶ Abschn. 3.1.3). So gesehen ist es ergonomisch fragwürdig, ausgerechnet das von der Aufgabe her ggf. notwendigerweise feinfühlige Bremsen dem Fuß zu überlassen, eine Auslegung, die primär aus der technisch-historischen Entwicklung so entstanden ist.

Im folgenden wird kurz der prinzipielle Verlauf des Weges der Nervenverbindung von der Körperperipherie zum Gehirn und von dort zu den Effektoren (Muskeln) in der Körperperipherie geschildert. Abbildung 3.5 zeigt eine stark vereinfachte Darstellung der anatomischen Verschaltung des Nervensystems – ohne Berücksichtigung der oben beschriebenen Lateralität des Gehirns – ausgehend von der Informationsaufnahme durch die Sinnesorgane auf der linken Seite über die verschiedenen Gehirnstrukturen (insbesondere Thalamus) zu den Effektoren auf der rechten Seite. Entsprechend den Regeln der Systemtechnik sind die einzelnen Elemente dieser Darstellung als Rechtecke gezeichnet, mit der Informationseingangsseite links und der Informationsausgangsseite rechts. Die Information selbst wird über die Ganglien weiter geleitet, nach den Regeln der Systemtechnik dargestellt durch Pfeile. Da Information immer nur vom Sender zum Empfänger fließen kann, sind diese Pfeile einseitig gerichtet. In der Abbildung sind links, auf der Eingangsseite, die jeweils relevanten Sinnesorgane dargestellt und rechts die Effektoren. Der im Rückenmark (eine Ausnahme stellt der Kopfbereich dar) realisierte Unterregelkreis des sog. „Eigenreflexbogens“ (siehe ▶ Abschn. 3.2.3) sorgt dafür, dass die im Gehirn im Wesentlichen im Bereich der Basalganglien, des Kleinhirns und des motorsensorischen und sensomotorischen Cortex gebildete Sollbewegung (bzw. Sollkraft), vermittelt durch die α-Innervation, in Realität umgesetzt wird. Dabei wird dieser Prozess durch die Information aus dem Vestibularorgan und aus den Mechanorezeptoren über die γ-Innervation moduliert, sodass immer die Aufrechterhaltung des Gleichgewichts garantiert ist (näheres zu dem Prozess der Muskelinnervation siehe ▶ Abschn. 3.2.3). Da über die γ-Innervation auch eine Anpassung der Sensorik (speziell Muskelspindeln) in der Muskulatur erfolgt, wodurch zwischen Fein- und Grobmotorik variiert werden kann, ist die Feinmotorik beim Durchfahren von schwerem Gelände oder bei unzureichender Federung nicht nur aus Gründen der physikalischen Trägheitsreaktion, sondern auch aus Gründen der nervösen Verschaltung beeinträchtigt. Das hat erhebliche Auswirkung auf die Nutzung von Touchscreens während der Fahrt.

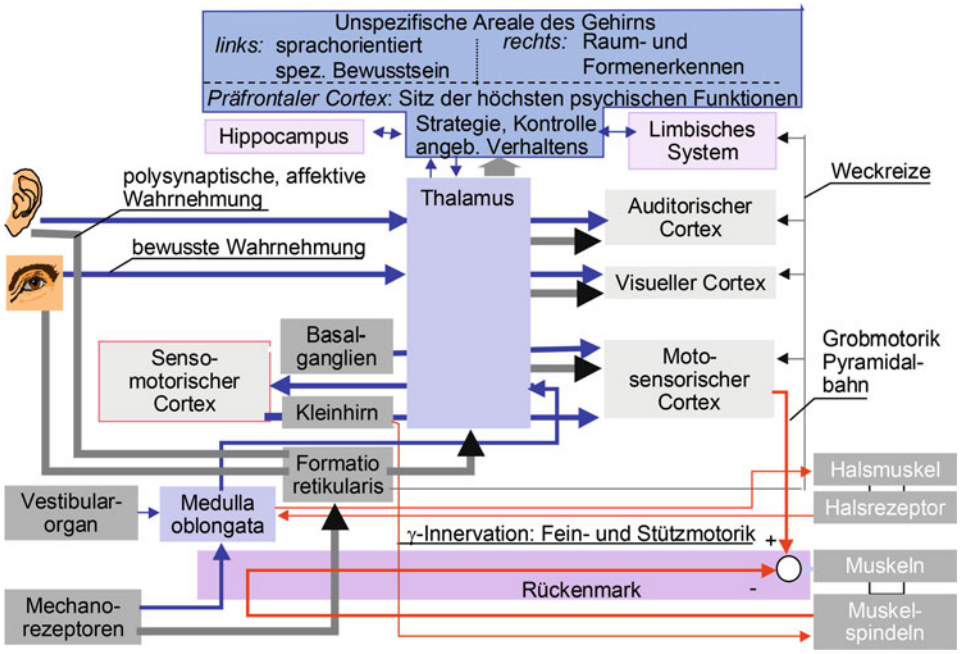


Abb. 3.5 Anatomisch-funktionelles Modell der Verschaltung von Sinnesorganen und Effektoren über die verschiedenen Gehirnregionen.

Die Information über die Muskelspannung, vermittelt durch die verschiedenen Mechanorezeptoren, wird u. a. über die Medulla oblongata zu dem Senso-motorischen bzw. Moto-sensorischen Cortex geleitet. Von der Medulla oblongata wird auch die Herzschlagfrequenz reguliert, sodass vermittelt durch diese Information die Anpassung der Energieversorgung der Muskulatur bei körperlicher Anstrengung gewährleistet ist.[4]

Das eigentliche bewusste Verhalten und Denken erfolgt nach aller bisherigen Erkenntnis im hinter der Stirn gelagerten präfrontalen Cortex im Zusammenspiel mit den anderen spezifischen Cortices. Wesentlich wird das Verhalten dabei durch das limbische System beeinflusst, durch das jede Handlung und jeder Entschluss immer mit einer emotionalen Färbung behaftet ist. Der Hippocampus spielt für den Übergang vom Kurzzeitgedächtnis in das Langzeitgedächtnis (siehe hierzu ▶ Abschn. 3.1.3 und 3.2.2.3) eine herausragende Rolle, wobei hierfür die emotionale Gestimmtheit eine stark modulierende Rolle spielt.

Im Zusammenhang mit den hier angestellten Überlegungen kommt es nicht auf alle Einzelheiten der Darstellung in Abb. 3.5 an. Besonders sei aber der Unterschied zwischen der direkten rationalen Wahrnehmung, gekennzeichnet durch die dünneren blauen Pfeile und der indirekten sog. protopathischen Wahrnehmung, dargestellt durch die breiten grauen Pfeile, erwähnt. Erste sorgt für direkte sozusagen analoge Abbilder der Außenwelt auf den jeweiligen, den Sinnesorganen zugeordneten Gehirnregionen. Sie dient der rationalen Erfassung und Weiterverarbeitung der Information, was beides bewusst z. T. aber auch unbewusst erfolgen kann (siehe hierzu ▶ Abschn. 3.2.2). Letztere bewirkt eine emotionale Wahrnehmung, der man sich in keiner Situation entziehen kann. Diese emotionale Wahr-

4 Durch Messung der Pulsfrequenz kann man sehr gut den Grad der körperlichen Anstrengung (Beanspruchung) feststellen. Da der Organismus bereits im Vorfeld einer zu erwartenden körperlichen Anstrengung die Herzschlagfrequenz anzupassen versucht, bewirken auch psychische Belastungen eine entsprechende Reaktion. Deshalb ist bei psychischer Belastung die Pulsfrequenz (und alle damit verbundenen Parameter) zwar ein guter, allerdings etwas träger Indikator, liefert allerdings keine objektive Messgröße für die Höhe der Beanspruchung.

nehmung bezieht sich sowohl auf das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer als auch auf die Situation der Passagiere im Fahrzeug. Sie beeinflusst auch die Wahrnehmung des Fahrzeugs als Ganzes. Dies ist ein Aspekt, der im Zusammenhang mit der Wahrnehmung von Komfort steht, der in ► Abschn. 3.3.4 eigens behandelt wird.

Information muss codiert werden. Grundsätzlich sind hierfür die analoge und die digitale Codierung denkbar. Dies hat vor allem auf der Ausgangsseite Bedeutung: zunächst können wir Information nur analog codiert abgeben: mittels des erwähnten Unterregelkreises des Rückenmarks bringen wir unsere Muskulatur in (nahezu) beliebig feiner Abstufung in Stellung bzw. können beliebig dosiert Kraft aufwenden. Dies ist die Art, wie wir beim Fahren eines Fahrzeugs Information auf die Maschine übertragen. Auf diese Art steuern wir auch unsere Mimik und jeder weiß, dass diese unabhängig von der jeweiligen Sprache international verständlich ist. Das „analoge" Verhalten eines Autofahrers ist weitgehend kulturübergreifend verständlich! Deshalb ist es einem erfahrenen Fahrer möglich, das Verhalten von anderen Verkehrsteilnehmern „zu lesen" und daraus Schlüsse über deren Reaktion in den nächsten Sekunden zu ziehen. Das ist auch in Ländern möglich, deren Sprache der jeweilige Fahrer gar nicht versteht. Allerdings können sich im Laufe der geschichtlichen Entwicklung nationale Besonderheiten herausgebildet haben, deren Verständnis sich für „Ausländer" erst nach einer gewissen Zeit der Erfahrung erschließt.

Auf digitale Weise codieren wir Information in der Sprache. Wir sind dort in der Lage, sehr differenzierte insbesondere auch abstrakte Inhalte zum Ausdruck zu bringen und rational zu verstehen. Wir sind allerdings an eine Codierungsübereinkunft, nämlich die jeweilige Sprache gebunden. Bei der Übertragung von Information auf die Schalter des Fahrzeugs, auf die Taster des Bordcomputers bzw. des Navigationsrechner handelt es sich auch um eine digitale Codierung. Hier muss eine Übereinkunft bestehen zwischen dem Codiersystem des Fahrzeugdesigners und dem des Nutzers. Aus diesem Grund muss die „Sprache", in der Information auf das Fahrzeug übertragen wird bzw. in der das Fahrzeug Information über bestimmte Betriebszustände vermittelt, grundsätzlich gelernt werden. Eine ergonomische Forderung ist, dieses Codiersystem so einfach erlernbar zu machen wie möglich, was die oft gewünschte „Selbsterklärungsfähigkeit" fordert.

3.1.3 Funktionell-neurophysiologisches Modell

Das funktionell-neurophysiologische Modell des Menschen soll das Verständnis für die inhaltliche Verarbeitung von Information bereitstellen. Für die systemanalytische Beschreibung ist es dabei nicht notwendig, auf die anatomischen und physiologischen Besonderheiten der einzelnen Rezeptorkanäle einzugehen (siehe dazu ► Abschn. 3.2). Wesentlich ist zunächst eine Beschreibung der Informationswandlung im Organismus und der prinzipiellen Verschaltungstypen in den einzelnen Subsystemen menschlicher Informationsverarbeitung. Die Rezeptoren wandeln äußere physikalische Reize in physiologische Reize in der Weise um, dass der jeweiligen Reizstärke (Intensität) eine entsprechende Folge (Frequenz) unterschiedlicher elektrischer Potentiale zugeordnet wird (sog. Impulsrate). Der Rezeptor reagiert auf den adäquaten Reiz, d. h. auf die physikalische Reizart, für die er empfindlich ist. Auch eine nicht adäquate Reizung führt zu einer Empfindung, die dem jeweiligen Rezeptorkanal entspricht. Bewusstes oder unbewusstes Erkennen der von den Rezeptoren gelieferten Information geschieht durch Zumessung von Bedeutung. Zahlreiche Versuche an Tier und Mensch zeigen, dass diese Bedeutung vom Ort der Ankunft der Information in den corticalen Projektionsfeldern abhängt. Eine Reizung im optischen Projektionsfeld führt also immer zu einer optischen Empfindung (Foerster 1936; Iggo 1973)[5]. Der adäquate Reiz für ein Sinnesorgan wird also nicht allein durch die Spezifität des Rezeptors bestimmt, sondern auch durch die zentrale Verarbeitung der von den Rezeptoren kommenden Impulsmuster (Dudel 1976).

Die grundlegenden Mechanismen der Informationsaufbereitung sind in allen Sinneskanälen sehr ähnlich: Die von den Rezeptoren in Form von Impulsraten entlang der Axone (Verbindung zwischen

5 So führt der mechanische Schlag auf das Auge beispielsweise zu einer optischen Empfindung.

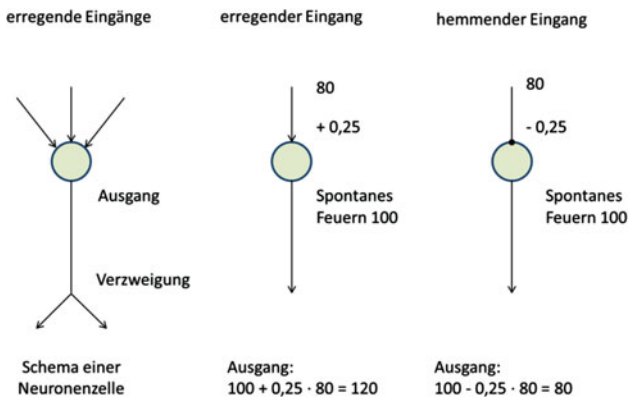


Abb. 3.6 Neuronenzellen in schematischer Darstellung (nach Lindsay and Norman 1972)

den Neuronenzellen) übertragene Information wird in den Neuronenzellen mit der Information anderer benachbarter Rezeptorzellen über sog. Synapsen verknüpft.

Damit aber Information überhaupt zur Verarbeitung kommen kann, muss ihre Intensität „überschwellig" sein:

- Mit „Absolutschwelle" bezeichnet man den qualitativen Übergang von „nicht wahrgenommen" zu „wahrnehmbar". Diese Absolutschwellen wurden prinzipiell für die verschiedenen Sinne bestimmt. Dabei zeigte sich, dass diese von Reizeigenschaften vom Kontext und von der Person abhängig sind.
- Für die Praxis des Autofahrens von wohl größerer Bedeutung ist die „Unterschiedsschwelle". Sie ist die kleinste Differenz zwischen zwei Reizen, die eine Person geraden noch wahrnehmen kann. Sie hängt zusätzlich zu den Abhängigkeiten, die für die Absolutschwelle gelten, auch noch vom Reizniveau ab.[6]

Im Folgenden wird eine kurze Betrachtung der grundsätzlichen Verschaltungsformen zwischen Neuronen angestellt. Da Neuronenzellen auch dann feuern, wenn sie durch keine Impulse am Eingang innerviert werden, haben Lindsay und Norman (1972) vorgeschlagen, zur Vereinfachung der Darstellung anzunehmen, dass eine Neuronenzelle mit einer willkürlich angenommenen Frequenz von 100 [1/s] feuert. Jede Neuronenzelle kann mehrere Eingänge besitzen. Sie hat einen Ausgang, der sich wiederum in mehrere Äste verzweigen kann (siehe Abb. 3.6 links). Ein erregender Eingang erhöht die Frequenz am Axon der erregten Neuronenzelle proportional zu seiner eigenen Frequenz und einem sog. Erregungsfaktor, der die an der Synapse gegebene Übertragungsgüte beschreibt (siehe Abb. 3.6 Mitte). In entsprechender Weise vermindert ein hemmender Eingang die Frequenz am Ausgang der Neuronenzelle proportional zur Frequenz am Eingang und einem Faktor, der wiederum die Güte der synaptischen Übertragung an der Neuronenzelle beschreibt (siehe Abb. 3.6 rechts). Erregende Eingänge werden in dieser Darstellungsform mit einem Pfeil gekennzeichnet, während hemmende Eingänge durch einen Punkt symbolisiert werden.

Die wesentlichen Rückmeldungsarten sind die laterale Hemmung, die negative Rückkopplung und die positive Rückkopplung. Abbildung 3.7 zeigt die Kalkulation der Ausgänge von Neuronenzellen, die von Rezeptoren erregt werden und von jeweils seitlich (lateral) liegenden Rezeptoren hemmend erregt werden. Für einen örtlich begrenzten Reiz, dessen Reizintensität willkürlich als 100 angenommen sei, ist in der Darstellung ebenso willkürlich angenommen, dass die Reizintensität 0 an den Rezeptoren die Ausgangsfrequenz 0 erzeugt und dass die Reizintensität 100 an den Ausgängen der Rezeptoren die Frequenz 100 erzeugt. Das Bild der an den Ausgängen der Neuronenzellen gemessenen Frequenzen zeigt, dass die laterale Verschaltung eine

6 Diese Abhängigkeit lässt sich mathematisch beschreiben und ist als Webersches Gesetz bekannt: $\frac{\Delta R}{R} = k$. Das Ausmaß ΔR, um das man einen Reiz R verändern muss, damit er im Vergleich zu dem ursprünglichen Reiz als größer oder kleiner erlebt wird, hängt von der Größe des Ausgangsreizes ab. Siehe auch Abschn. 3.2.1.2 und 11.3.1.1.

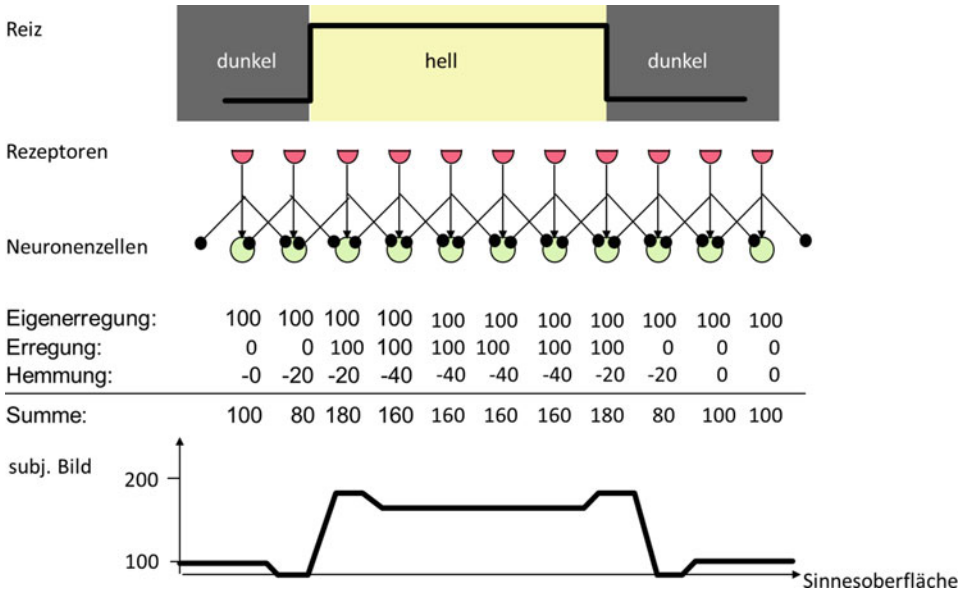


Abb. 3.7 Lateral hemmende Verschaltung

Überhöhung der Kantenintensität bewirkt. Im optischen Bereich ist diese Erscheinung als Machscher Ring bekannt[7]. Dieses System der lateralen hemmenden Verschaltung ist in allen afferenten Systemen zu finden. Das bedeutet, dass jede Erregung von einer Zone der Hemmung umgeben ist.

Für das Verständnis der negativen Rückkopplung ist zu berücksichtigen, dass in jeder Nervenzelle eine gewisse Zeit zwischen der Erregung am Eingang und dem Erscheinen des Aktionspotentials am Ausgang vergeht. Bei der negativen Rückkopplung läuft die vom Rezeptor kommende Information über eine oder mehrere Nervenzellen und wird dann direkt über eine oder mehrere Nervenzellen auf eine in der Kette weiter vorne liegende Nervenzelle hemmend zurückgeführt. In Abb. 3.8 ist am Beispiel von zwei Nervenzellen (A und B) im Vorwärtszweig und einer Nervenzelle (C) im Rückwärtszweig die am Ausgang des Systems erscheinende Impulsrate unter der Voraussetzung kalkuliert, dass am Eingang des Systems ein sich sprungförmig ändernder Reiz erscheint. Unmittelbar zu Beginn des Vorgangs läuft die ankommende Impulsrate ungehindert durch das System; die hemmende Wirkung baut sich durch die zeitliche Verzögerung erst langsam auf, sodass die Impulsrate am Ausgang mit der Zeit wieder zurückgeht. Die Übertragungscharakteristik entspricht der eines Proportional-Differential-Gliedes (PD-Charakteristik). Diese PD-Charakteristik ist eine generelle Eigenschaft menschlicher Informationsverarbeitung nicht nur auf dem Niveau der Informationsaufnahme, sondern auch auf dem weiteren Weg der Verarbeitung. Ein charakteristisches Beispiel ist: wenn ein bei der Fahrt unerwartetes Ereignis auftritt.

Vergleicht man diese negative Rückkopplung mit dem Verschaltungstyp der lateralen Hemmung, so zeigt sich, dass erstere eine *Verschärfung der zeitlichen*, letztere eine *Verschärfung der örtlichen* Konturen eines Reizes bewirkt.

Auf die bereits erwähnte Verschaltungsform der positiven Rückkopplung, die als Grundlage des Gedächtnisses angesehen werden kann, wird bei der Behandlung der Informationsverarbeitung in ► Abschn. 3.2.2 eingegangen.

Die Verschaltungstypen der lateralen Hemmung und der negativen Rückkopplung sind schon auf der untersten Ebene der Wahrnehmung unmittelbar in Verbindung mit den Rezeptorzellen verwirklicht.

7 Das bewirkt beispielsweise, dass man bei einer entsprechend ungünstigen Konstellation das schwache Licht eines Fahrradfahrers neben dem hellen Licht eines Pkw-Scheinwerfers nicht erkennen kann, wenn dieses zufällig in den überproportional aufgehellten Bereich des Pkw-Scheinwerfers gerät.

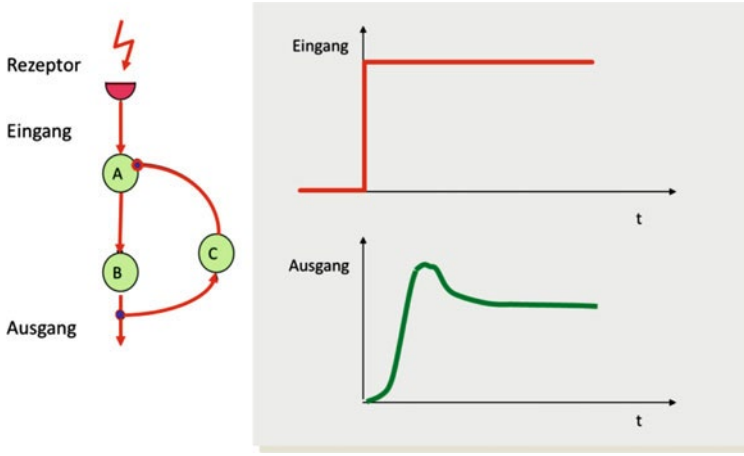


Abb. 3.8 Negative Rückkopplung von Neuronenzellen

Durch Zusammenschaltung mehrerer Neuronen auf eine Neuronenzelle entstehen Zellen, die nur dann eine erhöhte Impulsrate abgeben, wenn eine bestimmte Reizkonfiguration auf der Sinnesoberfläche vorhanden ist. Man spricht von komplexen Zellen. Diese komplexen Zellen sind weiter zu hyperkomplexen Zellen zusammengeschaltet, die erst bei einer noch mehr im Detail festgelegten Reizkonfiguration eine erhöhte Impulsrate aufweisen.

Man kann sich vorstellen, dass auf die hier gezeigte Weise eine ganze Reihe von spezifischen Detektoren gebildet werden kann. Experimentell sind auf der Ebene der komplexen Zellen Kantendetektoren und Bewegungsdetektoren, auf der Ebene der hyperkomplexen Zellen Winkeldetektoren und Detektoren für spezifische Längen entdeckt worden (siehe hierzu ▶ Abschn. 3.2.2.1).

Eine Analyse der besprochenen neuronalen Verarbeitung über einfache, komplexe und hyperkomplexe Zellen zeigt, dass aus der Vielfalt der ankommenden Informationen mit zunehmendem Komplexitätsgrad der Zellen immer spezifischere Eigenschaften extrahiert werden, wobei andere Eigenschaften unbeachtet bleiben. Diese führen dann zur Erregung einer anderen dafür spezifischen Zelle. Auf ein gegebenes Signal antworten im Laufe der Analyse immer weniger Ganglien. Die hohe spontane Aktivitätsrate auf dem niedrigen Niveau der neuronalen Verarbeitung wird zu den höheren Ebenen hin laufend geringer. Der Cortex befindet sich – abgesehen von einem permanenten „Hintergrundrauschen" – in relativer Ruhe, die nur sporadisch von kurzen „Schauern" der Aktivierung unterbrochen wird, wenn relevante externe Signale erscheinen.[8] Dabei scheint es eine Grundregel des Nervensystems zu sein, Änderungen und Differenzen ausfindig zu machen, konstant Bleibendes eher zu unterdrücken. Letzteres kann man als einen Adaptationsmechanismus auf einer höheren Stufe ansehen.

Man kann sich den weiteren Verlauf des Erkennens so vorstellen: Die Zellen, die in der besprochenen Weise die einfachen Eigenschaften extrahieren, sind auf noch höhere Zellen so geschaltet, dass diese erst dann optimal reagieren, wenn ein bestimmtes, durch die Verschaltung gegebenes Muster auf der Sinnesoberfläche abgebildet ist. Dabei können

8 U.a. versucht man, Reaktionen des Gehirns mittels der Methode der Elektroenzephalografie (EEG) zu messen. Man bringt zu diesem Zweck Elektroden an der Kopfhaut an, die wie Antennen die mit der Nervenaktivität verbundene elektrische Aktivität erfassen. Dies ist immer unspezifisch und das gewonnene Signal hängt zudem erheblich von der genauen Position der Elektroden und dem elektrische Widerstand zwischen Elektrode und Kopfhaut ab. Man kann mittels EEG sehr gut den Zustand des Schlafes vom wachen Zustand unterscheiden, allerdings kaum unterschiedliche Stufen von Wachsamkeit. Die EEG-Methode eignet sich mit Einschränkung als Mittel für bestimmte experimentelle Vorhaben (siehe hierzu Abschn. 11.2.6.3), ist aber für den praktischen Einsatz mit dem Ziel der Überwachung des Fahrers vollkommen ungeeignet. Es gibt viele Versuche, über das EEG Maschinen (oder auch Prothesen) „mit Gedanken" zu steuern. Dies ist durchaus möglich, allerdings muss dabei bedacht werden, dass der Operateur dafür ganz spezifische Denkmuster sehr mühsam erlernen muss, die erheblich von den Denkmustern, die für die Innervation der Muskulatur notwendig sind, abweichen.

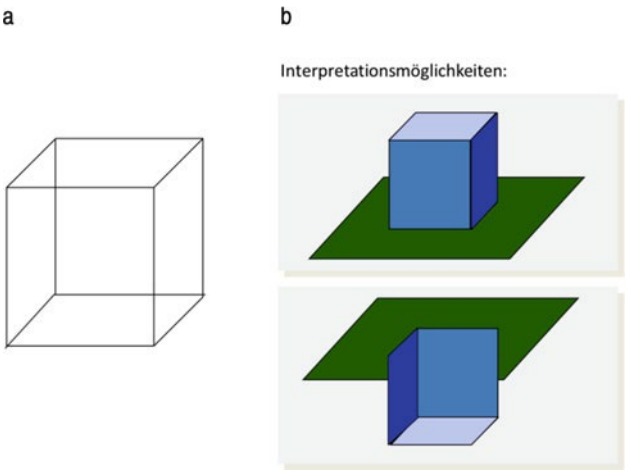


Abb. 3.9 Springbild am Beispiel des Würfels (**a**) sowie die beiden möglichen Interpretationen (**b**)

durch die gleiche Reizkonfiguration mehrere Zellen gleichzeitig angeregt werden. Es wird dann für den weiteren Erkennungsprozess diejenige ausgewählt, die eine in sich geschlossene, mit gedächtnismäßigen Inhalten übereinstimmende Interpretation erlaubt. Dabei muss man sich immer für nur eine Interpretation entscheiden. Das wird am Beispiel der bekannten Springbilder deutlich. In Abb. 3.9 ist auf der linken Seite eine Linienkonfiguration dargestellt, die wir unwillkürlich räumlich als einen Würfel erkennen. Tatsächlich lässt sich die Lage des Würfels auf zweierlei Arten interpretieren, wie es auf der rechten Seite der Abb. 3.9 dargestellt ist. Die Darstellungen dort sind eindeutig, weil durch Redundanz (ein Mehr an Information als unbedingt notwendig ist; hier: Löschen der „unsichtbaren" Linien, Schattierung der Flächen, Darstellung einer Bezugsfläche) die Wahrnehmung in eine eindeutige Richtung gedrängt wird. Redundanz stellt u. a. eine wichtige Hilfe bei kurzem Aufmerksamkeitsabfall dar, indem sie Ergänzungen aus dem Kontext mit Hilfe von abgespeicherten Gedächtnisinhalten zulässt. Eine Nachricht, die nur Neuigkeit bietet, kann nicht verfolgt werden. In einer ambivalenten Situation zieht die Wahrnehmung dabei immer eine bestimmte Entscheidung der Unbestimmtheit vor, selbst dann, wenn sie zu 50 % falsch ist (Sachse 1971). Wir erwarten mehr Gesetzlichkeit im Ablauf von Prozessen, als sie oftmals in der Realität vorhanden ist. Redundanz ist also für die ergonomische Informationsdarstellung ein wichtiges Gestaltungsmittel (Siehe hierzu vor allem ▶ Kap. 6).

Die hier am Beispiel der optischen Informationsaufnahme nachvollziehbar gemachten Prinzipien gelten in gleicher Weise auch bei allen anderen Sinnesorganen. Es kann daraus ein Modell der Wahrnehmung abgeleitet werden, wie es in Abb. 3.10 dargestellt ist. Danach werden die Reizkonfigurationen der Außenwelt (Reizenergie) einer Eigenschaftsanalyse durch einfache, komplexe und hyperkomplexe Zellen unterzogen (sensorische Prozesse). Bestimmte Kombinationen von erregten hyperkomplexen Zellen führen zur Anregung von Musterzellen. Der Organismus fällt nun unter Verwendung des Kontextes eine mehr oder weniger aktive Entscheidung für bestimmte Musterzellen in Abhängigkeit von bereits erworbenen Gedächtnisinhalten. Unter bestimmten Umständen können insbesondere bei häufiger Wiederholung Reizkonfigurationen im Gedächtnis abgespeichert werden (siehe auch ▶ Abschn. 3.2.2.4).

Dieses Modell der Wahrnehmung ist noch durch die integrierende Verarbeitung der von verschiedenen Sinneskanälen ausgehenden Information zu ergänzen. Das Prinzip dieser Verarbeitung kann an dem Phänomen der Vertikalkonstanz dargelegt werden: Wenn man den Kopf zur Seite legt, sieht man die Welt immer noch aufrecht stehen, obwohl das Bild auf der Retina verdreht ist[9]. Diese Leistung

9 zum Teil wird diese Verdrehung auch dadurch kompensiert, dass das Auge durch die Innervation der Augenmuskeln entsprechend gegengedreht wird.

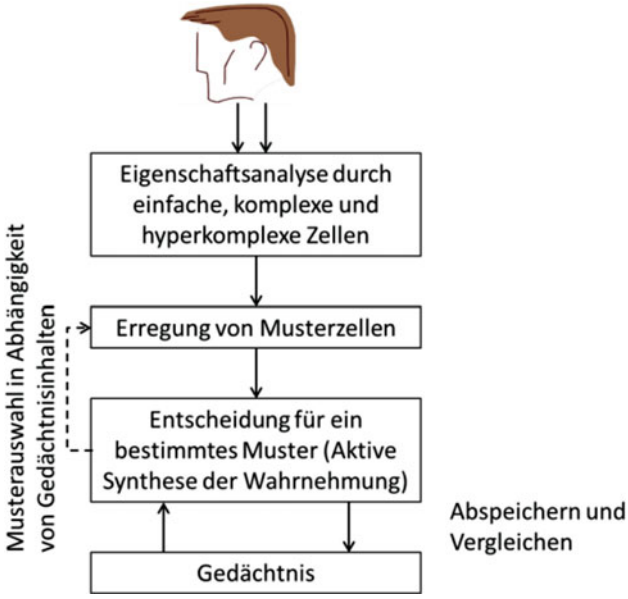


Abb. 3.10 Modell der Wahrnehmung der Umwelt durch den menschlichen Organismus (nach Lindsay und Norman 1972)

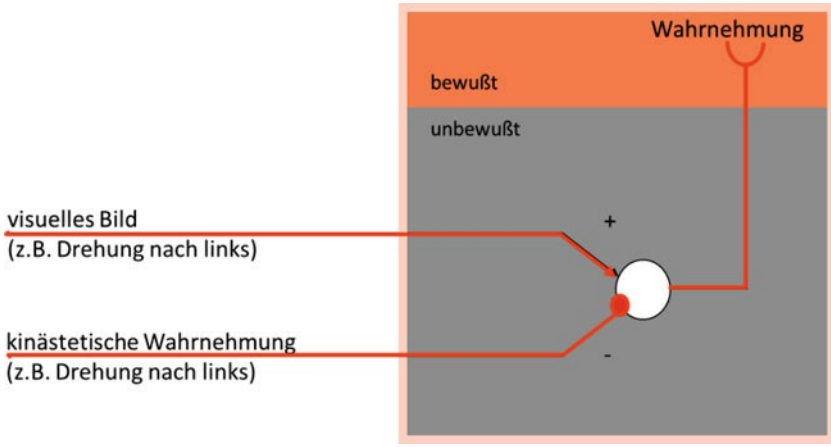


Abb. 3.11 Neuronale Verschaltung für die Leistung der Vertikalkonstanz (Sachse 1971)

wird verständlich, wenn man berücksichtigt, dass die gleiche Information der Verdrehung auch vom Maculaorgan (siehe ▶ Abschn. 3.2.1.3) geliefert wird. Nimmt man nun die optische Information als erregend, und die kinästhetische als hemmend miteinander verschaltet an (siehe Abb. 3.11), so ist verständlich, dass die daraus resultierende Information einer feststehenden Umwelt ist. Durch länger dauernde Rotation um die Körperachse und plötzliches Abstoppen kann man beispielsweise die beiden Informationen trennen. Aufgrund der durch Reibung bewirkten Rotation der Flüssigkeit in den Bogengängen des Vestibularorgans wird dann vom kinästhetischen Kanal die Information einer Drehung geliefert, vom visuellen Kanal aber keine gleichsinnige Drehung vermittelt. Die wahrgenommene Information ist also ein Wegdrehen der Welt in die Richtung der ursprünglichen Drehung[10].

10 Dies erklärt auch das bekannte Phänomen der Wahrnehmung einer scheinbaren Eigenbewegung, wenn man im ruhenden Eisenbahnwagon sitzend das langsame Anfahren eines Zuges auf dem Nebengleis beobachtet. Der Effekt tritt nur auf, wenn sich der Zug auf dem Nebengleis sehr langsam bewegt, sodass über die kinästhetische Wahrnehmung kein Reiz erwartet werden kann.

Eine ungewohnte Beziehung zwischen kinästhetischer und optischer Wahrnehmung bewirkt bei allen Menschen eine allerdings individuell unterschiedlich starke vegetative Wirkung. Dieser Effekt wird als „Seekrankheit" oder korrekt als „Kinetose" benannt. Viele Personen vertragen es aus diesem Grund nicht, als Beifahrer im Auto zu lesen oder auf dem Rücksitz mit zu fahren, wo die Sicht auf die Straße behindert ist. Alle Personen, die das Autofahren als Beifahrer nicht vertragen, zeigen keine Kinetoseerscheinungen, wenn sie selbst fahren, weil dann der aufgrund der eigenen Aktivität erwartete optische und kinästhetische Reiz mit dem tatsächlichen übereinstimmt (sonst wäre das Fahren nicht möglich; siehe hierzu ▶ Abschn. 3.2.2.4). Interessant ist, dass es auch in sog. statischen Fahrsimulatoren, die überhaupt keine Bewegung durchführen, bei vielen Personen zu massiven Kinethoseeffekten kommt[11].

Neben der soeben beschriebenen Vertikalkonstanz zeigt unsere Wahrnehmung noch eine weitere Anzahl von Konstanzleistungen (erwähnt sei hier die Farbkonstanzleistung, die es uns ermöglicht, nahezu unabhängig von der Lichtfarbe die Farbe von Gegenständen zu erkennen; siehe ▶ Abschn. 3.2.1.1). Es gehört ganz allgemein zu der besonderen Fähigkeit der sog. „Konstanzleistung" unseres Organismus, Informationen aus verschiedenen Sinnesorganen so zu interpretieren, dass Objekteigenschaften unabhängig von sonstigen Einfluss nehmenden Größen wahrgenommen werden.

Der Mensch baut also nach dem beschriebenen Prinzip die Information aus allen Sinneskanälen zu einer einzigen Wahrnehmung der eigenen Lage und Bewegung im Raum in Relation zu ortsfesten und beweglichen Gegenständen auf. Der Sinn dieser Art der Verarbeitung liegt darin, ein möglichst objektives Bild von der umgebenden Außenwelt im Inneren des Organismus zu erhalten. Allein aus dieser Überlegung wird schon offensichtlich, dass häufig anzutreffende Empfehlungen wie z. B. „wenn der optische Kanal durch Information überlastet ist, so kann zusätzliche Information über den akustischen Kanal übertragen werden" falsch sind (siehe hierzu ◘ Abb. 3.3). Die Informationen aus den verschiedenen Sinneskanälen müssen viel mehr zu einem in sich geschlossenen Bild der Situation „zusammenpassen".[12] Dabei ist es durchaus förderlich, wenn die gleiche Bedeutung über mehrere Informationskanäle simultan übermittelt wird (z. B. taktiles Fühlen des Einrastens eines Schalters und hörbares „Klicken"). Die hier getroffene Feststellung, dass sich der Mensch durch kombinatorische Verarbeitung der Information der verschiedenen Sinneskanäle ein Bild seiner (eventuell vermeintlichen) objektiven Lage im Raum verschafft, kann über den engeren Bereich der Umgebungswahrnehmung hinaus verallgemeinert werden. Wir versuchen bei allen realen Handlungen und gedanklichen Abläufen uns immer ein Bild unserer Lage (auch im Verhältnis zum Mitmenschen, unserer Kenntnisse usw.) zu verschaffen, das die „objektive Situation" wiedergibt. Diese subjektive Einschätzung der „objektiven Situation" muss dabei allerdings nicht mit der in der Realität objektiven Situation übereinstimmen.[13]

Eine weitere wesentliche Eigenschaft der menschlichen Wahrnehmung, welche die soeben gemachte Feststellung ergänzt, ist die Konstruktivität. Positiv gesehen wird damit die erstaunliche Fähigkeit beschrieben, auch unter widrigen Umständen auf Basis sehr geringer sensorischer Informationen zu einem Verständnis der Umwelt zu gelangen, also Objekte zu erkennen oder Worte zu verstehen. Für das Sehen lässt sich diese Eigenschaft an ◘ Abb. 3.12 verdeutlichen. Dargestellt sind 8 schwarze Kreise, in denen jeweils Teile eines weißen Gitters zu erkennen sind. Man erkennt aber fast sofort das Gitternetz eines Würfels und

11 Oft kommt es in dynamischen Fahrsimulatoren sogar zu noch heftigeren Kinetose-Erscheinungen. Das ist wohl auf kleine zeitliche Abweichungen zwischen der schneller zu berechnenden optischen Information und der aufgrund der mechanischen Trägheit langsameren Bewegung der Fahrkabine des Simulators zurückzuführen. Unser Organismus reagiert auf solche von der täglichen Erfahrung abweichende Eindrücke offensichtlich extrem feinfühlig.

12 Durch Virtuelle Realität (VR), zu der auch das breite Gebiet der Simulatortechnologie gezählt werden kann, versucht man durch technische Mittel den Sinnesorganen den Eindruck einer nur im Rechner erzeugten Wirklichkeit zu vermitteln. Um ein besonders gutes Präsenzempfinden („the sense of being there") zu erzeugen, ist es notwendig, möglichst viele Immersionsfaktoren bereitzustellen, was umso besser gelingt, je mehr Sinnesorgane mit zueinander passender, realitätsnaher Information versorgt werden (Hofmann 2002).

13 Dieser Effekt führt u. a. dazu, dass Zeugenaussagen z. B. vor dem Verkehrsgericht mit Vorsicht zu behandeln sind, da sie nicht unbedingt den tatsächliche Sachverhalt wiedergeben, sondern den Sachverhalt, den sich der Zeuge als den logisch „richtigen" (unbewusst!) zusammengestellt hat.

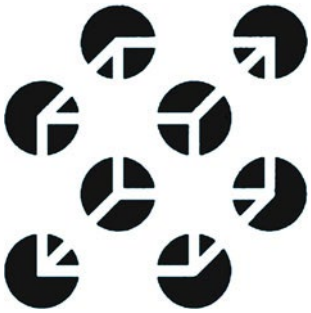


Abb. 3.12 Beispiel für die Konstruktivität der visuellen Wahrnehmung. Der Würfel kann im Vordergrund oder hinter einer löchrigen Fläche gesehen werden

ergänzt dabei unwillkürlich die Kanten in den weißen Flächen. Diese Ergänzung ist ein wesentlicher Teil der Konstruktivität (oder auch des Gestaltgesetzes der Linienfortsetzung; s. u.). Sie ermöglicht es, Objekte auch dann zu erkennen, wenn nur Teile davon sichtbar sind, was in der Umwelt in der Regel der Fall ist. An der Abbildung ist weiter interessant, dass man diese in mehrfacher Weise sehen kann und man willkürlich zwischen den verschiedenen Sichtweisen wechseln kann. Der Würfel kann unterschiedlich im Raum interpretiert werden, man kann also entweder die linke Fläche im Vordergrund sehen oder die rechte Fläche. Man kann auch den Würfel vor dem Hintergrund einer weißen Fläche mit schwarzen Flecken sehen oder umgekehrt den Würfel durch eine weiße Blende mit schwarzen Löchern sehen, also hinter der Lochblende. Sowohl die Ergänzung fehlender Teile als auch die Möglichkeit, das Gesehene unterschiedlich zu interpretieren, belegen, dass das Vorwissen und die Erfahrungen die Wahrnehmung maßgeblich beeinflussen. Auf die Bedeutung der Redundanz für die eindeutige Interpretation aufgenommener Information wurde bereits hingewiesen.

Die Konstruktivität ist ein Bestandteil der bekannten *Gestaltgesetze* der Psychologie, welche durch eine ökonomische Informationsverschlüsselung „uns erlauben, ein Höchstmaß an Information mittels eines relativen Minimums an Mitteln und Mühen zu erfassen" (Kreitler und Kreitler 1980). Die Gestaltgesetze (Knoll 2007; zitiert nach Goldstein 2002), umfassen

1. das *Prägnanzgesetz* oder Gesetz der guten Gestalt, welches besagt, dass jedes Reizmuster so gesehen wird, dass die resultierende Struktur so einfach wie möglich ist,
2. das Gesetz der *Ähnlichkeit*, wodurch ähnliche Elemente als gruppiert wahrgenommen werden,
3. das Gesetz der *Linienfortsetzung*,
4. das Gesetz der Nähe („Dinge, die sich nahe beieinander befinden, erscheinen als zusammengehörig", Palmer 1992),
5. Das Gesetz des *gemeinsamen Schicksals* („Dinge, die sich in die gleiche Richtung bewegen, erscheinen als zusammengehörig") und
6. das Gesetz der *Vertrautheit* oder Gesetz der *Bedeutung* („Dinge bilden mit größerer Wahrscheinlichkeit Gruppen, wenn die Gruppen vertraut erscheinen oder etwas bedeuten").

   Jüngere Untersuchungen fügen drei weitere hinzu, die die „gemeinsame Nähe", den Faktor der „Verbundenheit" und den der „Synchronität" umfassen (Palmer 1992).

Obwohl sich diese Gestaltgesetze besonders für den optischen Bereich veranschaulichen lassen, haben sie als Prinzipien, nach denen wir die wahrgenommene Welt ordnen, auch in dem Zusammenspiel der aus verschiedenen Sinnesbereichen gewonnenen Information ihre herausragende Bedeutung. Knoll (2007) fasst unter diesem Aspekt die Gesetze zu folgenden vier Prinzipien unserer Wahrnehmung zusammen, welche die obengenannten Gestaltgesetze umfassen und die er als Grundlage für ein ästhetisches Empfinden heranzieht (siehe auch ▶ Abschn. 3.3.4):

1. Maximaler Effekt mit minimalem Aufwand (Prinzip der Einfachheit und Zweckmäßigkeit),
2. Einheit in der Vielfalt (Prinzip des Kontrastes, der Harmonie der Proportionen, der Symmetrie und der Organisation),
3. Most Advanced Yet Acceptable (Prinzip der Vertrautheit, der Neugier, der Neuartigkeit, der Komplexität),
4. Redundanz und Widerspruchfreiheit (Prinzip der Redundanz und der Konsistenz hinsichtlich Erwartung und Realität).

Die wesentlichen Prinzipien der menschlichen Wahrnehmung sind in Tab. 3.1 zusammenfassend dargestellt. Diese gelten für alle Sinne des Menschen, sind dort aber unterschiedlich ausgeprägt. Im Folgenden werden deshalb die relevanten Eigenschaften der einzelnen Sinne genauer dargestellt.

Tab. 3.1 Wesentliche Prinzipien der menschlichen Wahrnehmung und ihre ergonomischen Konsequenzen

Prinzip	Beispiel	Wesentliche Konsequenzen
Begrenztheit	Sehen: Elektromagnetische Wellen zwischen 400–700 nm Hören: Mechanische Schwingungen zwischen 20 Hz und ca. 20.000 Hz	Überprüfung der Wahrnehmbarkeit von Systemzuständen Anpassung von Signalintensitäten an Schwellwerte
Psychische Dimensionalität	Größenunterschied von 1 cm wird bei großen und kleinen Menschen unterschiedlich erlebt	Überprüfung der Wahrnehmung von physikalischen Unterschieden in Signalintensitäten Wahl von Signalintensitäten entsprechend den erlebten Unterschieden
Konstruktivität	Objektwahrnehmung trotz nur teilweiser Sichtbarkeit	Vorwissen, Erfahrung und Erwartungen von Nutzern berücksichtigen
Selektivität	Irrelevante Informationen werden ignoriert Nebenaufgaben lenken beim Fahren ab	Informationsausgaben an Ressourcen des Fahrers anpassen Aufmerksamkeitsstrategien des Fahrers unterstützen
Konstanzleistung	Vertikalkonstanz	Sicht auf die Straße für alle Passagiere gewährleisten. Darstellungen von Information auf dem HUD müssen entweder exakt fahrzeugfest oder (beim sog. kontaktanalogen HUD) exakt straßenfest sein.

3.2 Elemente des Information verarbeitenden Menschen

3.2.1 Informationsaufnahme

Tomaske und Fortmüller (2001) hat die in Tab. 3.2 wiedergegebene Zuordnung von Sinneskanälen zu den benötigten Fahrerinformationen zusammengestellt. Allein daraus geht die Dominanz der visuellen Wahrnehmung für das Fahren hervor. Auch von Rockwell (1971) und Lachenmayer et al. (1996) wird präzisiert, dass mehr als 90 % der für das Fahren wichtigen Information über den optischen Sinn gewonnen wird.

Die Eigenschaften der menschlichen Informationsaufnahme sind recht gut verstanden. So sind die Reizschwellen und ihre Abhängigkeit von den beeinflussenden physikalischen Parametern im Allgemeinen für die verschiedenen Sinnesorgane bekannt. Fehler in der Informationsaufnahme können – allgemein gesagt – vorkommen, wenn die Reize unter der Reizschwelle bzw. unter der Reizunterschiedsschwelle bleiben. Fehler können aber auch vorkommen, wenn überschwellige Reize in der weiteren Verarbeitung, die nicht der Informationsaufnahme im engeren Sinne zugerechnet werden kann, nicht wahrgenommen, übersehen bzw. verwechselt werden.

Im Folgenden wird auf die einzelnen Sinne eingegangen und – soweit das möglich ist – deren Eigenschaften und Grenzen in Verbindung mit der Fahraufgabe dargestellt. Aufgrund der in ▶ Abschn. 3.1.3 gefundenen Zusammenhänge wird dezidiert von den Sinnen, nicht primär von den Sinnesorganen gesprochen, denn ein bestimmter Sinn kommt oftmals erst durch das kombinierte Zusammenspiel von verschiedenen Sinnesorganen zustande. Das gilt in besonderer Weise für den Sinn für Bewegung (Kinästhetik), den Tastsinn und den Wärmesinn. Es wird dort auf dieses Phänomen besonders eingegangen. Aber auch beispielsweise bei dem akustischen Sinn, der zweifellos primär durch die Eindrücke des Ohrs bestimmt ist, kommt das ganze akustische Empfinden zusätzlich durch Vibrationswahrnehmungen auf der Hautoberfläche zustande, die primär dem haptischen Sinn zuzuordnen wären.

3.2.1.1 Optischer Sinn

Die von der Umgebung reflektierten Lichtwellen treten durch die ca. 1 mm dicke Hornhaut, die wie ein Fenster in der ansonsten mit Blutgefäßen durchzogenen Lederhaut agiert, in das Auge ein (siehe Abb. 3.13), werden durch die Lichtbrechungseigenschaften der Linse und des die Form des Auges bildenden sog. Glas-

Tab. 3.2 Sinneskanalzuordnung der Fahrerinformationen (Tomaske et al. 2001)

Information	visuell	vestibulär	haptisch	akustisch
Spurabweichung	x			
Quergeschwindigkeit	x			
Fahrgeschwindigkeit	x			x
Längs-und Querbeschleunigung		x	x	
Winkel Fahrzeuglängsachse-Sollkurs	x			
Giergeschwindigkeit	x			
Gierbeschleunigung		x		
Neigungswinkel	x	x		
Lenkwinkel	x		x	
Kräfte in Stellgliedern			x	
Fahrgeräusch				x

körpers gebündelt und entwerfen nach den Gesetzen der geometrischen Optik am Augenhintergrund auf die Netzhaut (Retina) ein auf dem Kopf stehendes verkleinertes reelles Bild des Gesehenen. Unmittelbar vor der Linse befindet sich ein ringförmiger Muskel, die Iris, der eine freie Öffnung, die sog. Pupille bildet. Durch Innervation dieses Muskels, die u. a. von der Intensität des Lichteinfalls bestimmt wird, kann sich der Durchmesser der Pupille im Bereich zwischen 1 und 4 mm verändern.[14] Jeder schlechte Fotoapparat würde das dort entworfene Bild in den Schatten stellen, wobei nur im Bereich der sog. zentralen Sehgrube, der Fovea Centralis, die sich auf der optischen Achse direkt gegenüber der Linse befindet, ein einigermaßen akzeptables Bild entsteht (siehe Abb. 3.14). Die Linse selbst ist über Bänder mit dem Ziliarmuskel verbunden, der diese im entspannten (!) Zustand „glatt" zieht. Bei auf die Länge des Glaskörpers abgestimmter Brechkraft der Linse entsteht dann für weit entfernte Gegenstände auf dem Augenhintergrund im Rahmen der Gegebenheiten ein scharfes Bild[15]. Um einen in der Nähe befindlichen Gegenstand (< 5 m) scharf abzubilden, muss die Brechkraft der Linse verstärkt werden. Durch Anspannung des Ziliarmuskels verdickt sich dieser und damit lässt die Bänderspannung nach. Aufgrund der physikalischen Eigenschaften der Linse, die aus stark flüssigkeitshaltiger gallertartiger Masse aufgebaut ist, nimmt diese nun eine mehr kugelförmige Ge-

14 Deshalb können wir bei hellem Sonnenlicht „schärfer" sehen, weil sich durch die kleine Pupille die Schärfentiefe des Auges wie bei einem Fotoapparat mit kleiner Blende erhöht. Ggf. kann dann sogar auf die sonst notwendige Korrektur der Brechkraft durch eine Linse (Brille) verzichtet werden. Die Iris wird auch durch psychische Einflüsse verändert („schreckensgeweitete Augen"), was u. a. für bestimmte experimentelle Vorhaben in ähnlicher Weise genutzt werden kann wie die bereits erwähnte Pulsfrequenz.

15 Das gilt für sog. Normalsichtigkeit. Es gibt charakteristische Abweichungen davon. Wenn beispielsweise die Brechkraft der entspannten Augenlinse zu groß ist, so entsteht das scharfe Bild vor der Retina. Durch Vorschalten einer Zerstreuungslinse (Konkavlinse) kann dies korrigiert werden. Da ohne diese Linse nur Gegenstände nah vor dem Auge scharf abgebildet werden, spricht man von *Kurzsichtigkeit*. Ist die Brechkraft der Linse zu gering muss dies durch eine fokussierende Linse (Konvexlinse) korrigiert werden. Da bei dieser Form der Fehlsichtigkeit durch Anstrengung des Ziliarmuskels (s. o.) auf weit entfernte Gegenstände akkommodiert werden kann, spricht man von *Weitsichtigkeit* (die oben erwähnte Alterssichtigkeit ist damit nicht zu verwechseln). Neben Formen der Fehlsichtigkeit tritt bei von der Kugeloberfläche stärker abweichenden Linsenformen auch noch der *Astigmatismus* auf. Statt eines Brennpunktes erzeugt dann die Linse bei parallel einfallendem Licht zwei aufeinander senkrecht stehende Brennlinien. Dies kann durch entsprechend orientierte Linsen mit zylinderartiger Oberfläche korrigiert werden. Alle genannten Augenkorrekturen sollen so erfolgen, dass die sog. Normalsichtigkeit erreicht wird. Sie ist durch ein Auflösungsvermögen für parallele Lichtstrahlen von 1′ definiert.

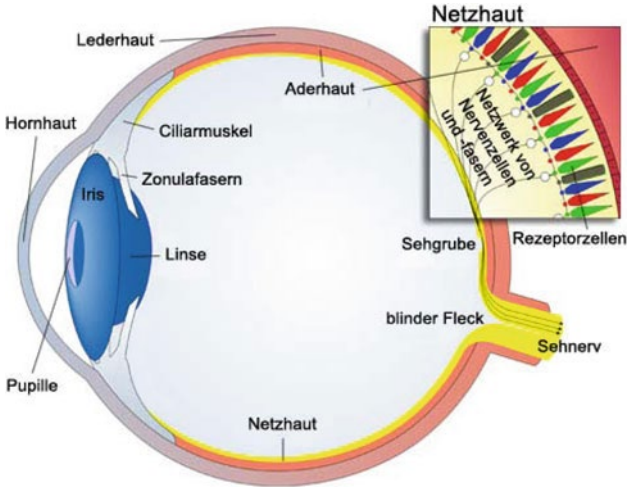


Abb. 3.13 Aufbau des menschlichen Auges (Funk 2008)

stalt an, wodurch deren optische Brennweite verkürzt wird. Man nennt diesen Vorgang Akkommodation. Da im Alter (effektiv wirksam ab ca. dem 50. Lebensjahr) die Elastizität der Linse sehr stark nachlässt, bleibt die Wirkung des durch Akkommodationsanstrengung verdickten Ziliarmuskels unwirksam.[16]

Das optische System besteht aus Linse und Glaskörper. Es hat wie jedes andere optische System die Eigenschaft, Licht unterschiedlicher Wellenlängen unterschiedlich stark zu brechen. Das kurzwellige blaue Licht wird stärker gebrochen als das rote langwellige; d. h. das Auge ist für blaues Licht kurzsichtig und für rotes Licht weitsichtig. Das ist normalerweise ohne große Bedeutung, weil sich das Auge bei der Betrachtung von Gegenständen durch leichte Akkommodationsanstrengung darauf einstellen kann. Allerdings gibt es Einschränkungen: Wenn sich blaue Objekte auf rotem Hintergrund oder umgekehrt befinden, bekommt das Auge Akkommodationsprobleme. Auch monochromatische Beleuchtung von Instrumenten, wie sie durch die Nutzung von LED-Lichtquellen gegeben ist, kann – insbesondere bei der Verwendung blauer Beleuchtung – Ableseschwierigkeiten induzieren.

Wie in Abb. 3.13 dargestellt, ist der lichtempfindliche Teil der auf dem Augenhintergrund befindlichen Rezeptoren nach außen gerichtet[17]. Damit stehen die Blutversorgung der Rezeptorzellen sowie die Nervenstränge, die die Information aus dem Auge tragen, dem Licht sozusagen im Wege. Die Nervenstränge verlassen das Auge an einer gemeinsamen Stelle. An dieser Stelle können sich keine Rezeptorzellen befinden. Er wird „blinder Fleck" genannt. Normalerweise fällt dieser Effekt durch die Augenbewegung (Sakkaden), die Tatsache, dass die blinden Flecke beider Augen unterschiedliche Bereiche der Umgebung abdecken und durch die Ergänzungsleistung des Gehirns jedoch nicht auf.

Abb. 3.14 Qualität des auf dem Augenhintergrund (Retina) entstehenden Bildes bei Tageslicht (Dornhöfer u. Pannasch 2000)

In der Netzhaut gibt es zwei Arten von Rezeptoren, die Zapfen und Stäbchen. Die Zapfen sind konzentriert im Zentrum der Netzhaut in der Fovea

16 Der Vorteil des sog. Head-Up-Displays (HUD), bei dem über die Windschutzscheibe das Bild eines Displays ca. 3 m–4 m vor dem Wagen eingespiegelt wird, ist u. a., dass für ältere Personen die geforderte Akkommodationsleistung deutlich geringer ist oder sogar entfällt.

17 Dies ist eine durch die entwicklungsgeschichtliche Entstehung des Auges bedingte Konzeption (siehe hierzu Lamb 2012).

Centralis, der Stelle des schärfsten Sehens (s. o.), zu finden. Nachdem es drei Typen von Zapfen gibt, die jeweils für rötlich-gelbes, grünliches und bläuliches Licht maximale Empfindlichkeit zeigen (Dreifarbentheorie) können nur in der Fovea Farben optimal gesehen werden. Durch die spezielle Verschaltung dieser Zapfentypen zu antagonistischen Zellen mit den bipolaren Empfindungen rot – grün, blau – gelb und schwarz – weiß kann dieses System aus der Summe des von unterschiedlichen Gegenständen der Umgebung reflektierten Lichts quasi den Farbort der Lichtquelle erschließen und nun alle aufgenommenen Farben mit einer innerlich erzeugten Gegenfarbe so verändern, dass die Summe der wahrgenommenen Farben mit dieser Gegenfarbe die Farbe Weiß ergeben. Mit diesem Mechanismus können die Farben von Gegenständen weitgehend unabhängig von der Farbe der Lichtquelle richtig erkannt werden. Man nennt diese Fähigkeit Farbkonstanzleistung.[18]

Die Stäbchen haben ein hohes Maß an Konvergenz, d. h. viele Stäbchen sind zu komplexen Zellen zusammengefasst. Auf diese Weise wird eine hohe Lichtempfindlichkeit erreicht. Allerdings geht damit ein Verlust an Auflösung und damit an Schärfe einher. Umgekehrt sind die Zapfen wenig konvergent, was zu einer sehr hohen Auflösung und Schärfe führt, allerdings zu einer geringeren Lichtempfindlichkeit. Mit den im peripheren Bereich hoch konzentrierten lichtempfindlichen Stäbchen werden im Wesentlichen Kontrast und Bewegung wahrgenommen.

Wie ◘ Abb. 3.14 zeigt, wird nur im Bereich der Fovea Centralis ein befriedigend scharfes Abbild der Umwelt erreicht. Dies entspricht einem Scharfsehbereich von ca. 2° bis 3°. Um Ziele zu fixieren, die sich außerhalb des fovealen Bereichs befinden, muss das Auge durch sprunghafte Bewegungen, die so genannten Sakkaden, den Zielobjekten zugewandt werden. Dies kann bewusst gesteuert, aber auch unwillkürlich geschehen. Eine weitere Form von Sakkaden ermöglicht ein „Verfolgen" des fixierten Objekts auf der Retina. Dies kommt zustande, wenn sich der eigene Körper oder aber das betrachtete Objekt bewegt („optokinetischer Nystagmus"). Davon zu unterschieden sind Mikrobewegungen des Auges, die verschiedene Ursachen und Ausprägungen haben können und eine Amplitude von maximal 10 Winkelminuten haben (Joos et al. 2003). Ein Beispiel hierfür ist der so genannte Tremor, d. h. Mikrobewegungen des Auges sehr hoher Frequenz, die vermutlich dazu dienen, den Stimulus auf der Netzhaut zu stabilisieren und damit ein „Verblassen" der retinalen Abbildung zu verhindern (Martinez-Conde et al. 2004). Die eigentliche Wahrnehmung findet während der auf eine Sakkade folgenden *Fixation* statt. Für die Dauer der Sakkaden können hingegen keine Informationen aufgenommen, sondern allenfalls bereits registrierte Merkmale verarbeitet werden. Das Erfassen eines Bildes oder einer Szene erfolgt also durch eine Reihe von aufeinanderfolgenden Sakkaden und Fixationen. Das fertige Bild entsteht erst durch den Verarbeitungsprozess im Gehirn (siehe hierzu ▶ Abschn. 3.2.2.1).

Voraussetzung jedoch dafür, dass überhaupt optische Information im Gehirn verarbeitet werden kann ist, dass die Bedingungen für die Erkennbarkeit eines Objektes (z. B. eines anderen Verkehrsteilnehmers) gegeben sind. Unter der Voraussetzung, dass eventuelle Fehlsichtigkeiten des Auges (z. B.

18 Diese Leistung funktioniert nur vollkommen bei kontinuierlichem Spektrum der von der Lichtquelle ausgesendeten Wellenlängen im sichtbaren Bereich, wie es bei thermischen Lichtquellen (z. B. Kerzen, Glühlampen) gegeben ist. Bei Licht aus Entladungslampen mit einzelnen herausragenden Kaminen im Farbspektrum kann es trotz des subjektiven Eindrucks von weißem Licht zu typischen Verfälschungen der gesehen Gegenstandsfarben kommen (Beispiel: Beleuchtung von Straßenkreuzungen durch energetisch günstige Natriumdampflampen). Man kann sich die Wirkung der innerlich erzeugten Gegenfarbe leicht vor Augen führen, wenn man in einem Fahrzeug mit grünem Wärmedämmglas (heute in nahezu allen Fahrzeugen verwendet) die Scheibe nur einen Spaltbreit öffnet. Der durch den Spalt gesehene Bereich, der ja eigentlich unverfälscht sein sollte, sieht violett eingefärbt aus (Gegenfarbe zu der grünlichen Einfärbung der Wärmedämmscheibe; siehe hierzu auch Abb. 3.19). Durch Defekte bei bestimmten Zapfentypen kann – besonders häufig bei männlichen Personen – die erblich bedingte sog. Farbblindheit auftreten. Besonders häufig kommt die Rot-Grün-Blindheit vor, die trotz des Eindrucks einer sonst farbigen Umwelt diese beiden Farben für den Betroffenen nicht unterscheidbar macht. Da aus Tradition für die Ampelregelung unglücklicherweise gerade diese beiden Farben für „Halt" und „Fahrt" gewählt worden sind, können betroffene Personen nur durch die Orts- oder noch besser durch eine Form-Codierung den Anzeigeinhalt einer Ampel erkennen. Da Farbfehlsichtigkeit relativ häufig ist, ist bei der Gestaltung von Displays darauf zu achten, nicht allein auf eine Farbcodierung zu setzen.

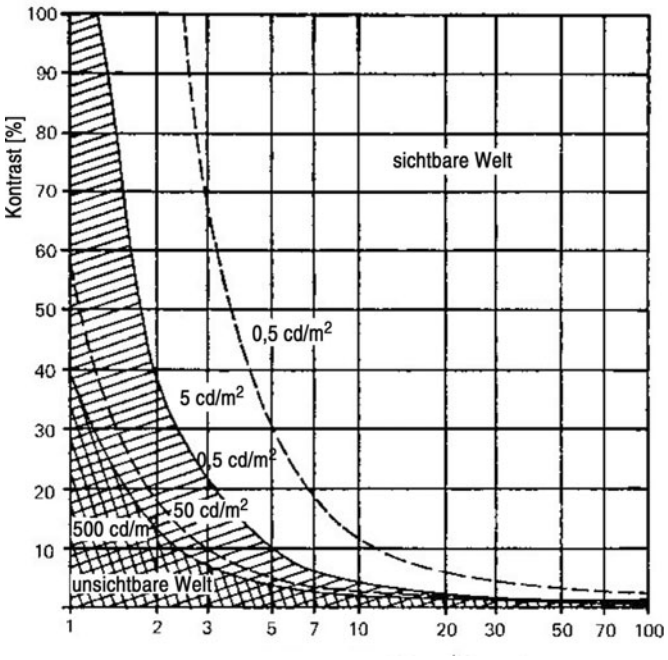


Abb. 3.15 Zusammenhang zwischen Kontrast, Objektgröße und Leuchtfelddichte (nach Hartmann 1970)

Kurzsichtigkeit, Astigmatismus usw.) durch entsprechende Sehhilfen voll kompensiert sind, müssen dafür mindestens fünf Bedingungen erfüllt sein (Hartmann 1970):

1. Der beobachtete Gegenstand muss einen bestimmten Mindestkontrast gegenüber seiner unmittelbaren Umgebung besitzen: dabei kann es sich bei gleicher Farbe um einen reinen Leuchtdichtekontrast oder aber auch bei gleicher Leuchtdichte um einen bestimmten Farbkontrast handeln. Im Allgemeinen werden beide Kontrastformen zugleich auftreten.
2. Das Objekt muss in einer Mindestgröße auf dem Augenhintergrund (Retina) abgebildet werden.
3. Das Objekt bzw. die Umgebung muss eine Mindestleuchtdichte[19] besitzen.
4. Das Auge muss der gerade herrschenden Gesichtsleuchtfelddichte[20] optimal angepasst sein.
5. Objekte müssen eine bestimmte Mindestzeit dargeboten werden, damit sie gesehen werden können.

All diese fünf Bedingungen sind miteinander verknüpft. Die Verkoppelung von drei der Bedingungen veranschaulicht das in Abb. 3.15 dargestellte Diagramm. Auf der Ordinate ist der prozentuale Kontrast K aufgetragen, der gemäß Gl. 3.1 der auf die Umfeldleuchtdichte L_u bezogenen Leuchtdichteunterschied zwischen Objekt (L_{obj}) und Umwelt definiert ist:

$$K = (L_{obj} - L_u)/L_u \cdot 100\,\% \qquad (3.1)$$

Für dunkle Umwelt $(L_u = 0)$ kann sich also ein Kontrast bis zu $+\infty$ ergeben. Für ein total dunkles Objekt $(L_{obj} = 0)$ erhält man einen Kontrast von 100 %. Auf der Abszisse ist die Größe des Sehobjektes in *Winkelminuten* angegeben. Dadurch ist die Tatsache berücksichtigt, dass es nicht auf die tatsächliche Größe bzw. Entfernung des Sehobjektes ankommt, sondern auf die Größe seines Abbildes auf der Retina. Ein Parameter ist die *Umfeldleuchtdichte*, wobei die jeweiligen Kurven die Grenze zwischen Unsichtbarkeit (jeweils links von der Kurve) und Sichtbarkeit darstellen. Bei gegebener Objektgröße und gegebenem Kontrast kann man durch Erhöhung der Adaptationsleuchtdichte, also praktisch durch Erhö-

19 Leuchtdichte L = die von einem Gegenstandspunkt ins Auge reflektierte Lichtenergie, gemessen in cd/m².

20 Gesichtsfeldleuchtdichte = insgesamt in das Auge einfallende Lichtenergie, gemessen in cd/m².

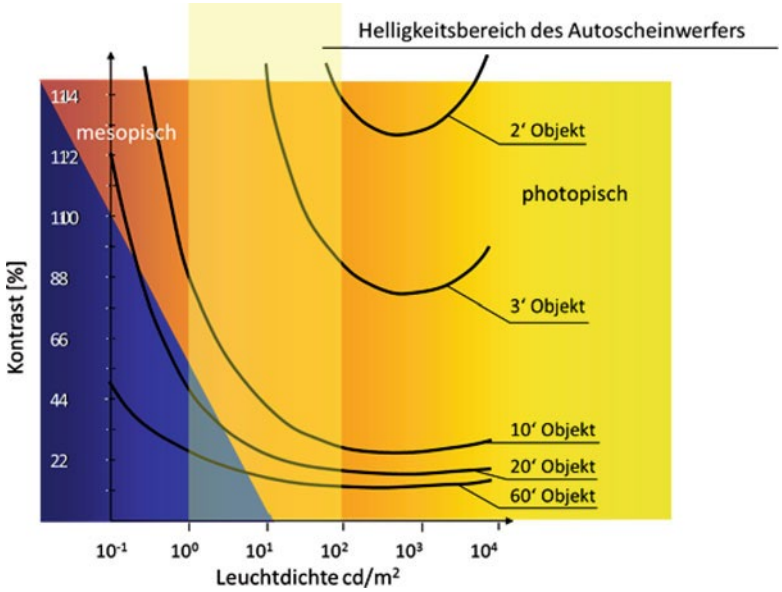


Abb. 3.16 Notwendige Objektgröße in Abhängigkeit von Leuchtdichte und Kontrast. Dargestellt ist der Bereich der Dunkelanpassung (*blau*) und Hellanpassung (*gelb*) in Abhängigkeit von der Leuchtdichte sowie der Helligkeitsbereich eines Autoscheinwerfers.

hung der Beleuchtungsstärke[21], den Übergang vom Unsichtbaren zum Sichtbaren schaffen. Bei einer genaueren Betrachtung stellt man jedoch fest, dass die Sehleistung bei Erhöhung der Adaptationsleuchtdichte über ein bestimmtes Maß hinaus wieder abnimmt. Dies wird in einer anderen Darstellung des Zusammenhangs der Abb. 3.15 in Abb. 3.16 deutlich. Die Ursache dafür ist die nun eintretende *Blendung.* Mit physiologischer Blendung bezeichnet man die Tatsache, dass bei entsprechend hohem Beleuchtungsniveau im Augeninneren (Glaskörper) Streulicht entsteht, das den Kontrast und damit die Sehleistung vermindert. Abbildung 3.17 gibt einen Zusammenhang wieder, wonach bei einem gegebenen Blendwinkel (Winkel zwischen Sehobjekt, Auge und Blendquelle) und gegebener Umfeldleuchtdichte (bzw. Adaptationsleuchtdichte) die von der Blendquelle am Auge hervorgerufene Hornhautbeleuchtungsstärke die in dem Diagramm angegebenen Werte nicht übersteigen darf, um physiologische Blendung zu vermeiden. Demgegenüber versteht man unter psychologischer Blendung eine subjektive Störung, die ebenfalls von der Leuchtdichte der Blendquelle, der Umgebung, dem Raumwinkel, unter dem die Blendquelle gesehen wird, und einem sog. Positionsfaktor abhängt. Sie tritt meist noch vor der eigentlichen physiologischen Blendung auf (Näheres siehe Hartmann 1970) [22]

Dem Diagramm der Abb. 3.15 ist zu entnehmen, dass auch bei besten Beleuchtungsverhältnissen das Auflösungsvermögen des Auges durchschnittlich nicht besser als ein Winkel von 1‘ ist. Das hängt mit dem Abstand der Rezeptoren auf der Retina zusammen. Bei bestimmten Individuen wurde allerdings ein Auflösungsvermögen bis zu 20‘ beobachtet. Dem als „Normalsichtigkeit“ definierten Auflösungsvermögen von 1‘ entspricht in 33 cm Entfernung eine Objektgröße von ungefähr 0,1 mm, in 1 m Entfernung eine von 0,3 mm und in 10 m Entfernung eine von etwa 3 mm. Für die Praxis darf man allerdings nicht davon ausgehen, dass alle Menschen normalsichtig sind. In Tab. 3.3 ist der Prozentanteil einer Stichprobe von 9468 Personen dargestellt, die – bezogen auf das Sehen in der Ferne und der Nähe – ein Auflösungsvermögen vor 1‘ nicht erreichen. Wichtig für die Interpretation der Tabelle ist der Hinweis, dass die Personen, die bei der Arbeit

21 Beleuchtungsstärke = die auf den betrachteten Gegenstand fallende Lichtmenge, gemessen in lux.

22 In den meisten Fällen der vermeintlichen Blendung bei Nachtfahrt handelt es sich um das zuletzt Genannte. Das Problem dabei ist eher, dass die mesopische Dunkeladaptation gestört wird und es nach dem starken Lichteinfall womöglich einige Sekunden dauert, bis die ursprüngliche Adaptation wieder erreicht ist.

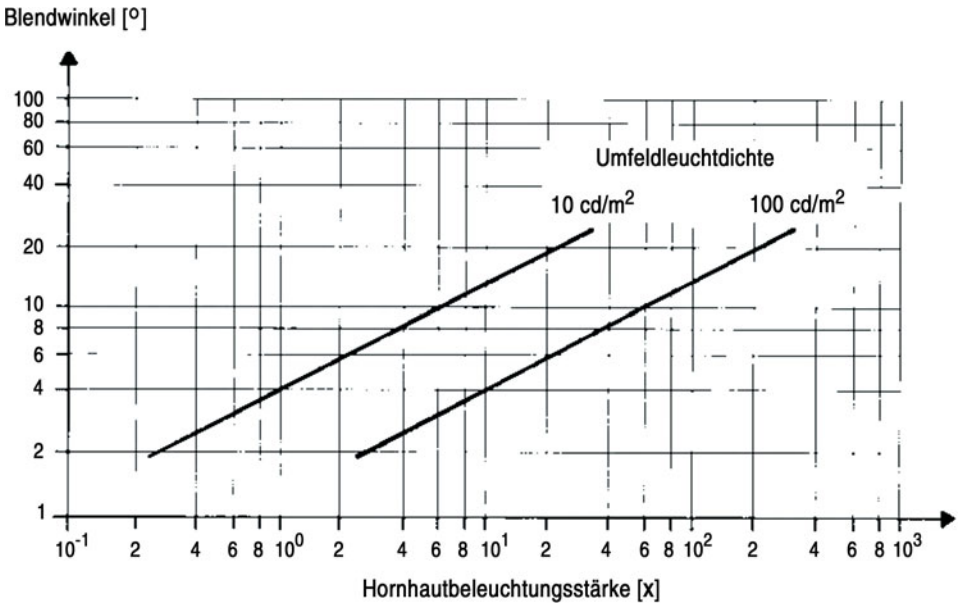


Abb. 3.17 Grenzwert für die von einer Blendquelle hervorgerufene Hornhautbeleuchtungsstärke (lx) in Abhängigkeit vom Blendwinkel [°] und Umfeldleuchtdichte.

eine Brille trugen, in der jeweiligen Sehdistanz auch mit Brille untersucht wurden. Dass das Tragen einer Brille keine Gewähr für optimale Korrektur von Sehmängeln bietet, demonstriert Abb. 3.18. Aus alledem folgt, wie wichtig die augenärztliche Überprüfung der Sehleistung von Autofahrern ist.

Neben dem reinen Helligkeitskontrast ist der *Farbkontrast* zu berücksichtigen. Das menschliche Auge kann etwa 7 Millionen Farbvalenzen unterscheiden, die in zwei große Klassen gegliedert werden können: die bunten und die unbunten Farben. Die unbunten Farben entsprechen in etwa dem bereits angesprochenen Hell-Dunkel-Kontrast. Die bunten Farbvalenzen der Oberflächenfarben von Objekten („Körperfarben-") lassen sich durch Farbton, Sättigung und Dunkel- bzw. Hellstufe charakterisieren. Farbton und Sättigung werden in den bekannten Darstellungen des Farbdreiecks (z. B. Normfarbtafel nach DIN 5033, Abb. 3.19a) metrisch erfasst. Aus diesen Tafeln lassen sich aber keine Rückschlüsse auf gerade noch erkennbare Farbunterschiede ziehen. Eine vollständige analytische Erfassung dieses Problems liegt auch zurzeit noch nicht vor. Gewisse Rückschlüsse auf solche Unterschiedsschwellen sind jedoch auf der Basis eines deformierten Farbdreiecks möglich, wie es von der CIE 1976 als „Tafel gleichabständiger Farbart"

Tab. 3.3 (nach Hartmann, 1970) Prozentanteil der Fehlsichtigkeit in den verschiedenen Altersgruppen; nach Schmidtke und Schober (1967)

Altersgruppe	Prozentanteil der Untersuchten mit einer Sehschärfe schlechter als 1 Bogenminute	
(in Jahren)	Weitsehen (8 m)	Nahsehen (33 cm)
bis 20 (n = 1329)	28 %	**15 %**
21–30 (n = 3193)	V%	**32 %**
31–40 (n = 1857)	39 %	**35 %**
41–50 (n = 1497)	55 %	**53 %**
51–60 (n = 1203)	63 %	**68 %**
über 60 (n = 389)	65 %	56 %

empfohlen wurde (siehe Abb. 3.19b). Der Farbkontrast ist hier in etwa durch den Abstand zwischen den jeweiligen Farborten charakterisiert.

Bis jetzt wurden von den eingangs erwähnten fünf Bedingungen nur die ersten drei angesprochen. Die vierte Bedingung beinhaltet die optimale *Adaptation* des Auges auf das gerade herrschende Beleuchtungsniveau. Hier ist bei

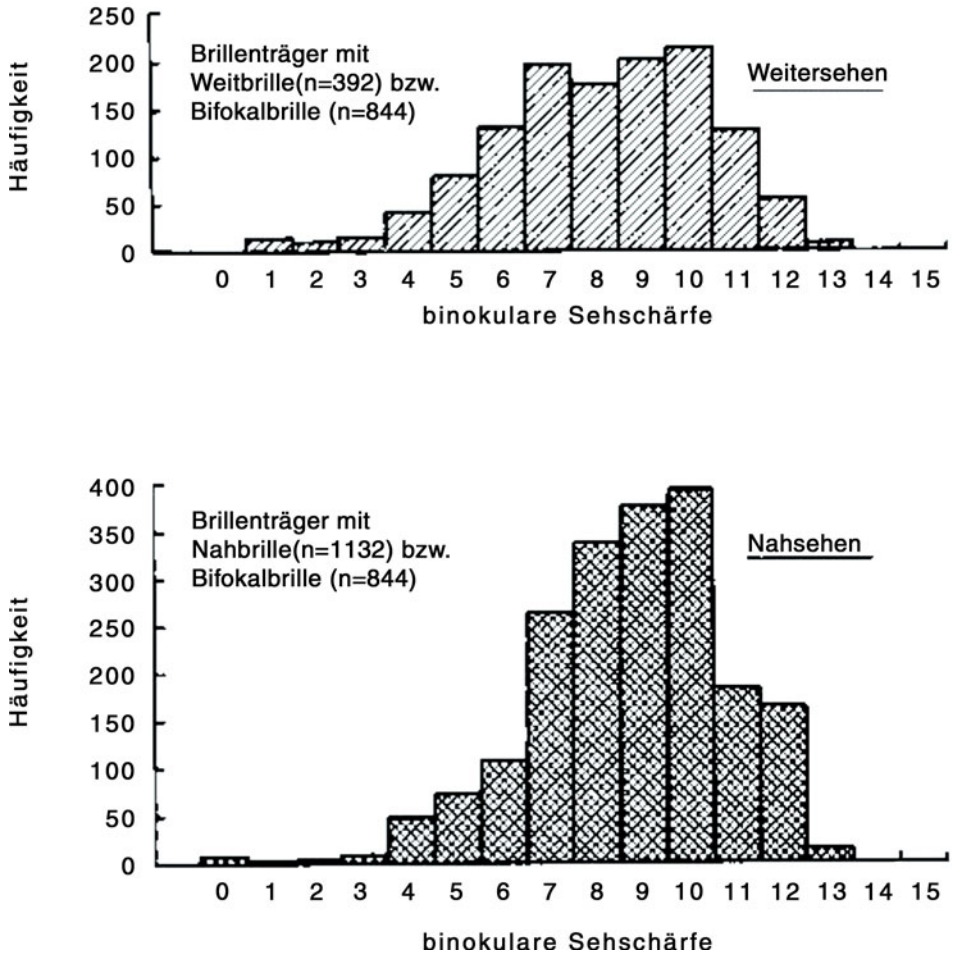


Abb. 3.18 Häufigkeitsverteilung der von Brillenträgern mit Brille erreichten binokularen Sehschärfe (nach Schmidtke und Schober 1967), Skalenwert 0 = 10,0′ 5 = 2,0′ 10 = 1,0′ 15 = 0,67′

der Frage nach den Grenzen menschlichen Leistungsvermögens besonders der Zeitverlauf für die Dunkel- bzw. Helladaptation interessant. Abbildung 3.20 zeigt den Leuchtdichteunterschied ΔL zwischen Sehzeichen und Umgebung, der mindestens vorhanden sein muss, damit in jedem Augenblick nach einem plötzlichen Übergang von einem hohen zu einem niedrigen Beleuchtungsniveau ein Erkennen des Sehzeichens möglich ist. Die erste Adaptation ist dabei weitgehend auf die Zapfen zurückzuführen. Nach etwa 10 Minuten beginnt ein zweiter Anpassungsprozess, der auf die Stäbchen zurückzuführen ist. Diese Adaptation dauert etwas länger und erreicht nach etwa 40 Minuten ein stabiles Niveau. Hier ist dann das Sehen nur mit Stäbchen möglich, während mit den Zapfen entsprechend schwache Reize nicht mehr gesehen werden. In diesem Zustand ist kein Farbensehen mehr möglich.[23] Der Verlauf der Kurve in Abb. 3.20 hängt nicht nur von der Sprunghöhe des Adaptationsbeleuchtungsniveaus ab, sondern auch von der Wellenlänge des Lichts. Im Gegensatz zur Dunkeladaptation verläuft der Adaptati-

23 Die Beobachtung, dass man im Scheinwerferlicht des eigenen Fahrzeugs durchaus die Farbe eine vorausfahrenden Fahrzeugs oder der Kleidung eines Fußgängers erkennen kann, belegt, dass beim Autofahren normalerweise nie vollkommene Dunkeladaptation, sondern nur die Zwischenform der sog. mesopische Adaptation erreicht wird (siehe auch Abb. 3.16).

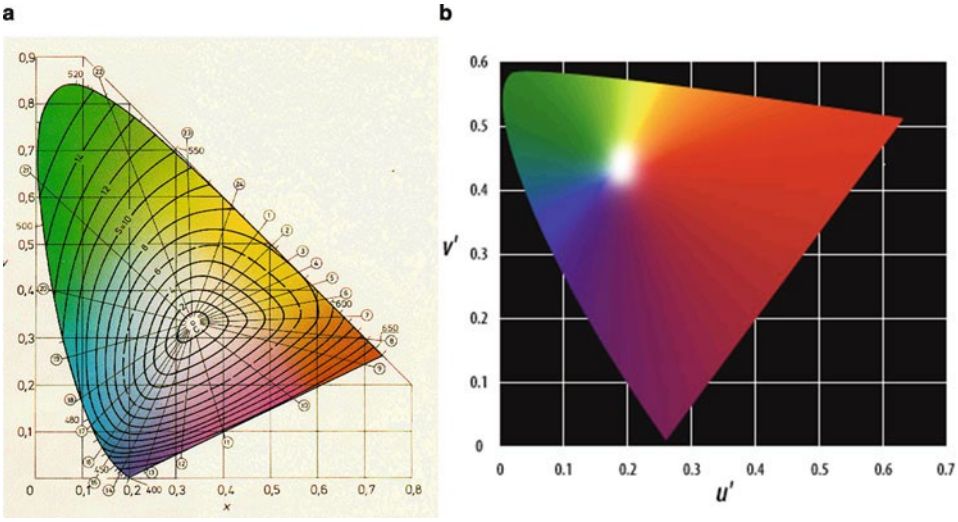


Abb. 3.19 Farbdreieck nach DIN 5033 (**a**) und von der CIE 1976 empfohlene UCS-Farbtafel (UCS = Uniform Chromaticy Scale; **b**)

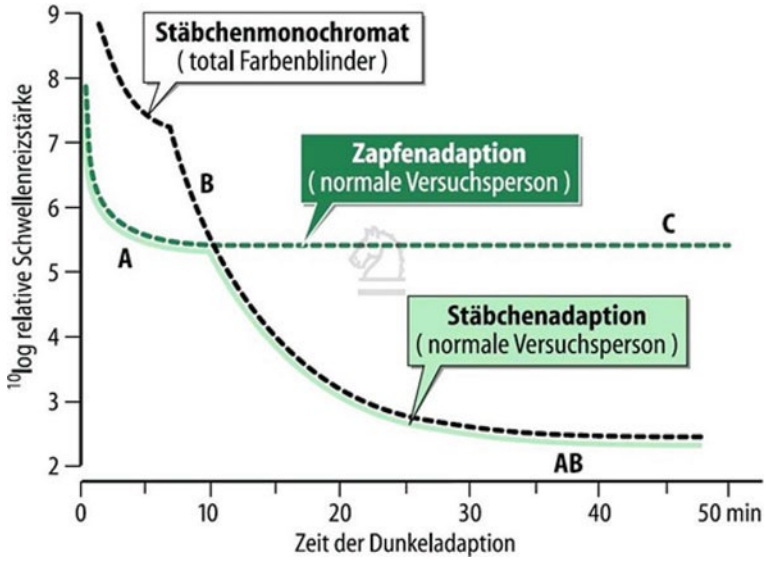


Abb. 3.20 Zeitverlauf der Dunkeladaptation des menschlichen Auges. Dabei sind die unterschiedlichen Verläufe bei Zapfen und Stäbchen zu erkennen.

onsvorgang von dunkel nach hell im Sekundenbereich.[24] Die Helladaptation erfolgt hauptsächlich über die besonders für blaues Licht empfindlichen Stäbchen.[25]

24 Es ist an diesem Sachverhalt das Problem des Einfahrens in dunkle Tunnels zu erkennen. Man versucht dieses Problem heute durch besonders helle Beleuchtung am Tunneleingang zu entschärfen. Ein ähnliches Problem entsteht, wenn der Autofahrer bei Nachtfahrt vom Scheinwerfer eines entgegenkommenden Fahrzeugs geblendet wurde.

25 Man verwendet deshalb für die Instrumentenbeleuchtung gerne rotes oder rötliches Licht (das war auch die früher in U-Booten verwendete Innenbeleuchtung). Inzwischen wurde allerdings festgestellt, das sog. gefiltertes Weißlicht, bei dem durch ein scharfes Farbfilter nur der Blauanteil weggenommen ist, wesentlich bessere Ergebnisse hinsichtlich Ablesbarkeit und verhinderter Helladaptation erbringt.

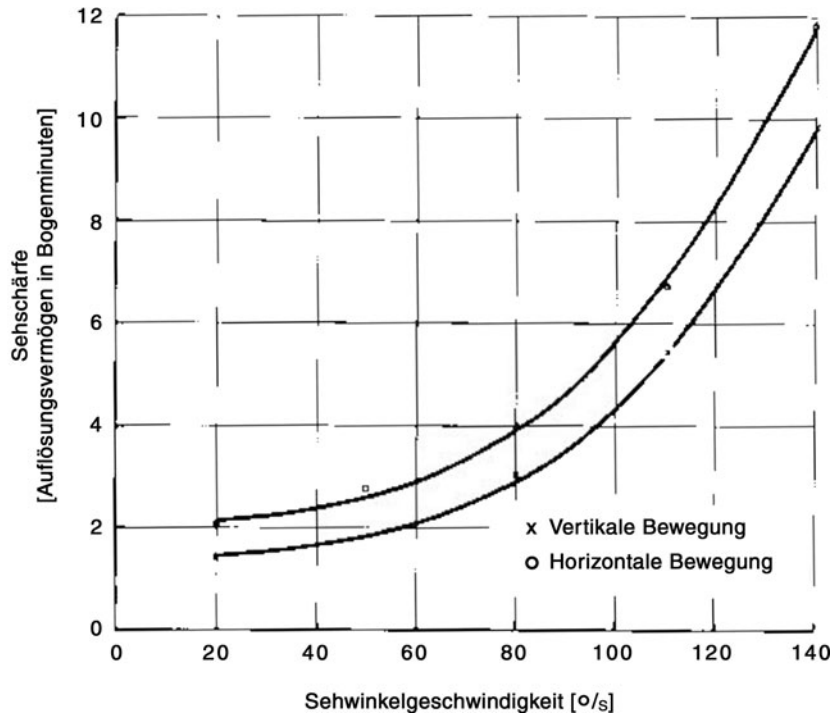


Abb. 3.21 Notwendige Objektgröße in Abhängigkeit von der Sehwinkelgeschwindigkeit bei vertikaler und horizontaler Bewegung

Die Wahrnehmung der Helligkeit ist zudem noch von zeitlichen Faktoren abhängig, d. h. der Frage, wie lange der Fahrer schon in Dunkelheit ist. Beim Autofahren kann sich dies jedoch kurzfristig ändern, wenn der Fahrer z. B. durch andere Fahrzeuge geblendet wird, sich im städtischen Bereich mit heller Beleuchtung aufhält, Licht im Innenraum hat usw. Diese Adaptation bietet für den Fahrer Vorteile, da sie für eine an die jeweiligen Umgebungsbedingungen angepasste Wahrnehmung ermöglicht. Aus ergonomischer Sicht verschiebt sich dadurch allerdings je nach Umgebung das Optimum, was bei der Gestaltung von visuellen Signalen und Displays berücksichtigt werden muss. Adaptationsprozesse finden sich nicht nur in Bezug auf die Helligkeit, sondern auch für die Farb- und die Bewegungswahrnehmung.

Die fünfte aufgeführte Bedingung für das Erkennen von Objekten bezieht sich auf die *Darbietungszeit*. Sowohl durch Versuche über die Flimmerverschmelzungsfrequenz als auch durch Beobachtung des Abfalles der elektrischen Aktivität der Photorezeptoren auf der Retina nach Belichtung kann man schließen, dass eine Mindestdarbietungszeit von 150 bis 250 ms notwendig ist, um bei sonst optimalen Beleuchtungsumständen ein Sehobjekt zu erkennen (Lindsay und Norman 1972). Bringt man diese Feststellung mit der Beobachtung in Einklang, dass das Auge auch bei der Betrachtung bewegter Objekte die Blickrichtung verändert (Sakkaden), resultiert daraus, dass es für das Erkennen von Sehobjekten Grenzgeschwindigkeiten geben muss.

Abbildung 3.21 zeigt den experimentell ermittelten Zusammenhang von Sehwinkelgeschwindigkeit und notwendiger Größe des Sehobjektes. Sowohl für vertikale wie für horizontale Bewegung ist festzustellen, dass mit zunehmender Sehwinkelgeschwindigkeit die notwendige Objektgröße zu- und damit die Sehschärfe abnimmt.

Im Straßenverkehr spielt das *Tiefenauflösungsvermögen* des Gesichtssinnes eine wichtige Rolle, das im Bereich bis ca. 20 m (bei manchen Personen sogar bis 40 m) durch das binokulare Sehen bestimmt ist. Aufgrund des Abstandes zwischen den beiden Augen entstehen zwei unterschiedliche Bilder auf der Retina des linken und des rechten Auges *(Querdisparation)*. Zwei hintereinander liegende Gegenstände werden von den beiden Augen unter verschiedenem Winkel gesehen. Der Grenzwinkel, bis zu dem noch eine Tiefenauflösung möglich ist, liegt bei 10“ bis 5“ (Trendelenburg u. Schütz 1971).

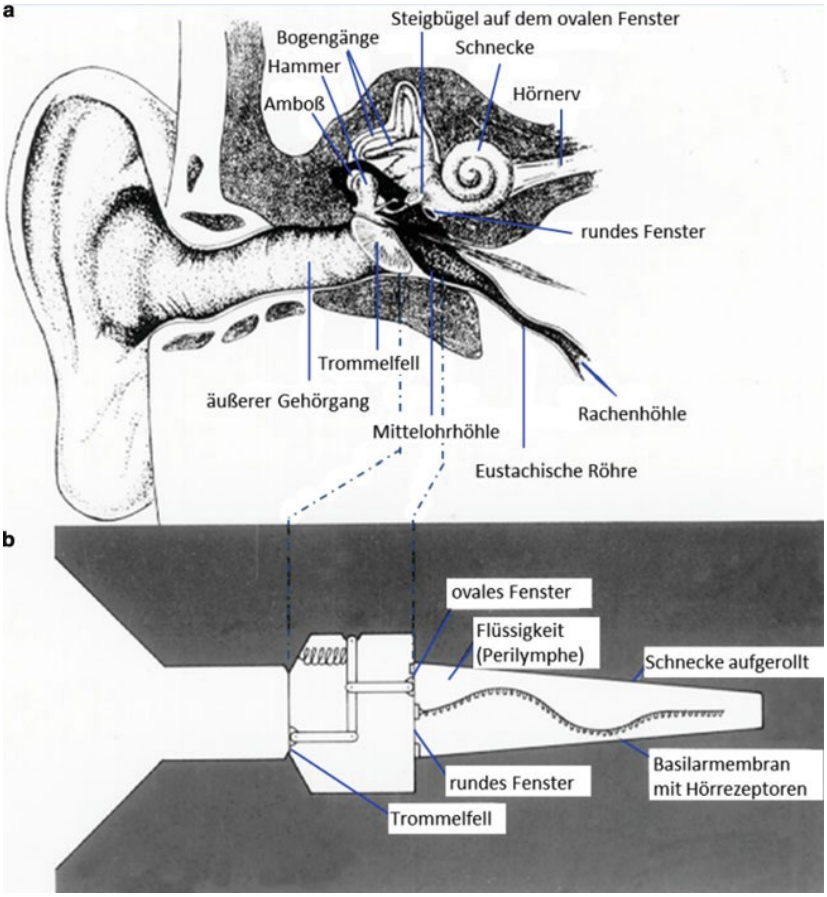


Abb. 3.22 Querschnitt durch das menschliche Ohr (**a**) und mechanisches Modell des Ohres (**b**)

Interessanterweise können derartige Tiefenauflösungen auch dann festgestellt werden, wenn beide Augen optisch annähernd gleich fehlkorrigiert sind. Zu dem Effekt der Querdispation kommt noch der der Bewegungsparallaxe: durch Bewegung des Kopfes verschieben sich die Bilder von Gegenständen unterschiedlicher Entfernung in charakteristischer Weise, was ebenfalls die Tiefenwahrnehmung fördert (siehe hierzu auch ▶ Abschn. 3.2.2.1). Bergmeier u. Bubb (2008; Bergmeier 2009) konnte in Experimenten zur Gestaltung sog. kontaktanaloger HUDs[26] feststellen, dass erst ab einer Entfernung von ca. 50 m die beiden Effekte keine Rolle mehr spielen, sondern nur noch die Größe des dargestellten Objektes in der perspektivischen Relation.

26 Head-Up-Displays (HUDs), die es möglichen, Objekte in einer gewünschten Entfernung sozusagen im Kontakt mit der Straße darzustellen (siehe hierzu Abschn. 6.2.1).

3.2.1.2 Akustischer Sinn

Mit unserem Ohr sind wir in der Lage, Frequenz und Amplitude von Schallschwingungen (im allgemeinen Luftschall – durch Körperkontakt mit schwingenden Flächen kann auch über das Knochensystem unmittelbar Körperschall auf das Innenohr übertragen werden) innerhalb eines bestimmten Bereiches zu empfinden. Abbildung 3.22 zeigt im oberen Teil einen Querschnitt durch das menschliche Ohr. Im unteren Teil des Bildes ist ein mechanisches Ersatzbild des Ohres dargestellt, das es erleichtern soll, dessen Funktionsweise zu verstehen. Die von außen sichtbare Ohrmuschel mündet in den äußeren Gehörgang, der durch das Trommelfell von der Mittelohrhöhle abgetrennt ist. Sie ist über die sog Eustachische Röhre (entdeckt durch Eustachio 1520–1574) mit der Rachenhöhle verbunden. Durch sie erfolgt normalerweis ein Druckausgleich zwischen Mittelohrhöhle und dem Luftdruck außerhalb

des Kopfes[27]. In der Mittelohrhöhle befindet sich die Gehörknöchelchenkette, die aus den wegen ihres Aussehens so genannten Elementen Amboss, Hammer und Steigbügel besteht. Wie das Ersatzbild veranschaulicht, bewirkt die Knochenkonstellation ein mechanisches Übersetzungsverhältnis. Die durch den Luftschall erregte Bewegung des Trommelfells wird auf diese Weise entsprechend reduziert und zugleich um ca. das Verhältnis 1 : 22 kräftemäßig verstärkt. Sie wirkt auf das ovale Fenster der Schnecke (im Ersatzbild ist die Schnecke aufgerollt gezeichnet, was tatsächlich nicht möglich ist, da sie im Felsenbein des knöchernen Schädels eingebettet ist). Das Innere der Schnecke ist durch zwei häutige Membranen dreigeteilt. Die darin befindliche Perilymphe wird durch die Übertragung des Schalls mittels der Gehörknöchelchenkette zu Schwingungen angeregt. Dadurch führt auch der mittlere Gang, das sog. häutige Labyrinth, der ebenfalls mit Flüssigkeit, der sog. Endolymphe gefüllt ist, entsprechende Bewegungen aus. Innerhalb dieses mittleren in sich geschlossenen Gangs sitzt das eigentliche Hörorgan, das Cortische Organ, in dem von Stützzellen umgeben die Rezeptorzellen liegen. Es sind dies Haarzellen, die die Bewegung der Basilarmembran abtasten. Durch einen hier nicht näher beschriebenen physikalischen Ablauf entstehen auf der Basilarmembran sog. Wanderwellen. Die Einhüllende des ein- und auslaufenden Teils davon bildet frequenzabhängig ein lokales Maximum. Das Maximum hoher Frequenzen ist dabei in der Nähe des ovalen Fensters und das tiefer Frequenzen in der Schneckenspitze gelagert. Allerdings ist diese mechanische Frequenzanalyse sehr unscharf. Die in dem Schallreiz enthaltene Information wird auf ihrem Weg bis zur primären Hörrinde mehrfach umkodiert, wobei durch komplexe und hyperkomplexe Zellen unterschiedliche Eigenschaften extrahiert werden.

27 In manchen Fällen kann es vorkommen, dass dieser Ausgleich nicht genügend schnell erfolgen kann, z. B. wenn man mit dem Auto oder der Seilbahn schnell große Höhenunterschiede überwindet oder wenn bei einer Erkältung die Eustachische Röhre durch Schleim verschlossen ist. Dann beult der Luftdruckunterschied das Trommelfell in eine Richtung aus; der Effekt ist, dass wir schlechter hören, sozusagen wie durch einen Watteberg hindurch. Durch Schluckbewegungen kann man in den meisten Fällen den Ausgleich wiederherstellen.

Abbildung 3.23 zeigt die Bewegung auf der Basilarmembran, die durch unterschiedliche Schalleinwirkungen zustande kommt. Man kann nachvollziehen, dass wir mit unserem akustischen Empfinden quasi das örtlich-zeitliche Muster auf der Basilarmembran „sehen“. Das Ohr ermöglicht somit eine andere Differenzierung von Schallereignissen als sie durch die technisch realisierbare Frequenzanalyse möglich ist. U.a. wird verständlich, dass das Ohr die Charakteristik eines Klangs auch dann noch erkennt, wenn der Klang stark verfälscht ist (z. B. unterschiedlich gesprochene Vokale oder auch Wiederkennen eines Musikinstruments aus einem Lautsprecher mit mäßigem Frequenzgang).

Der hörbare Bereich wird in einem Diagramm, das durch Schalldruckamplitude und Frequenz aufgespannt wird, als „*Hörfläche*“ bezeichnet (siehe Abb. 3.24).

Die Schalldruckamplitude wird dabei meist logarithmisch[28] dargestellt, in dB angegeben und als *Lautstärkepegel L* bezeichnet:

$$L = 20\log\Delta p/\Delta p_0[\mathrm{dB}]$$

Δp ist die Schalldruckamplitude, Δp_0 ein einmal festgelegter Bezugsschalldruck:

$$\Delta p_0 = 2 \cdot 10^{-5}\mathrm{N/m^2};$$

er entspricht in etwa der durchschnittlichen Hörschwelle bei 1000 Hz.

Im Bereich niedrigen Schalldrucks wird der Hörbereich durch die *Hörschwelle* begrenzt. Diese Hörschwelle ist frequenzabhängig und besitzt für das gesunde Ohr des Normal-Hörenden bei ca.

28 Dies ist auf die fälschliche Annahme der Gültigkeit des Weber-Fechnerschen Gesetz zurückzuführen. Vor allem die Versuche von Stevenson in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts haben gezeigt, dass im Gegensatz dazu oberhalb von 40 dB eine Zunahme des Lautstärkepegels von 10 dB subjektiv einer Verdoppelung der Empfindung (bezeichnet als „sone“) entspricht. Formelmäßig lässt sich dieser Zusammenhang beschreiben durch: $E = 2^{0,1(L-40)}$. Wenn man in diese Formel die Definition des Lautstärkepegels L einsetzt, erhält man nach einigen Umformungen: $E = \frac{1}{16}(\frac{\Delta p}{\Delta p_0})^{0.6}$. Tatsächlich hat also das Potenzgesetz der Psychophysik Gültigkeit für die Beschreibung des Zusammenhangs von empfundener Lautheit E und physikalischem Reiz Δp.

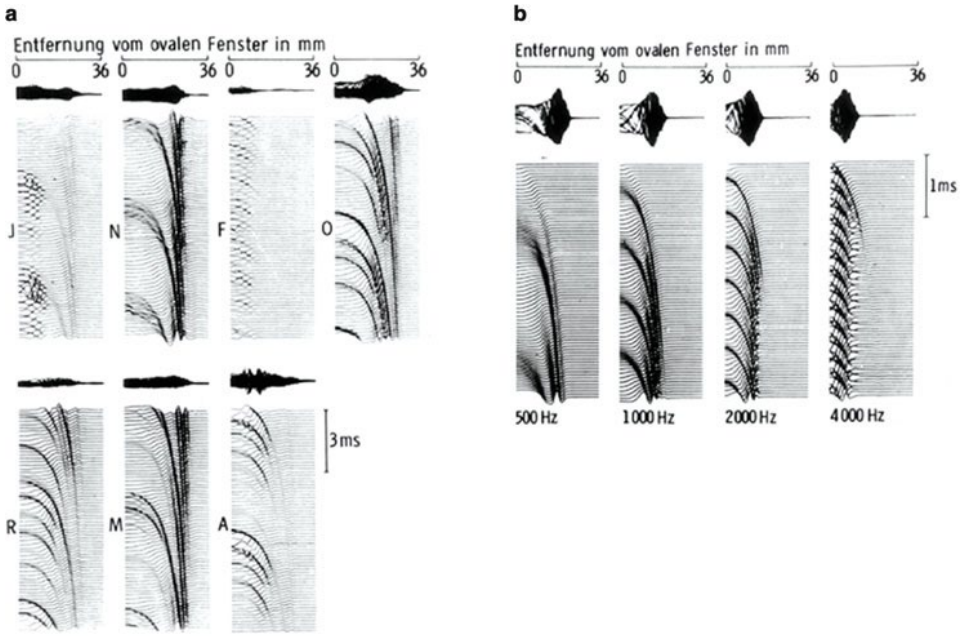


Abb. 3.23 Zeitgang der Basilarmembranauslenkung bei Erregung durch die Laute „J, N, F, O, R, M, A" der menschlichen Sprache (**a**) und die Frequenzen 500 Hz, 100 Hz, 4000 Hz (**b**; nach David 1972)

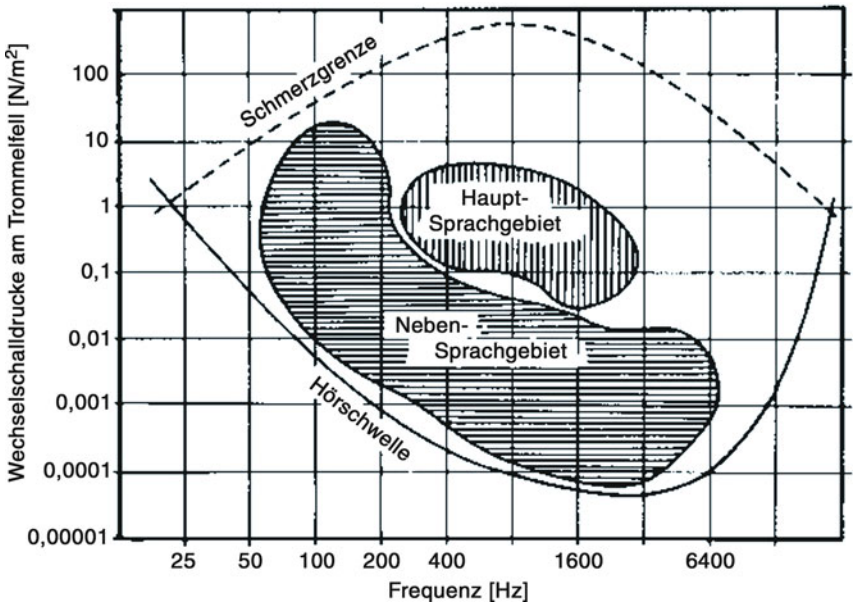


Abb. 3.24 Hörfläche mit der Hörschwellenkurve und der Schmerzgrenze als untere bzw. obere Begrenzung

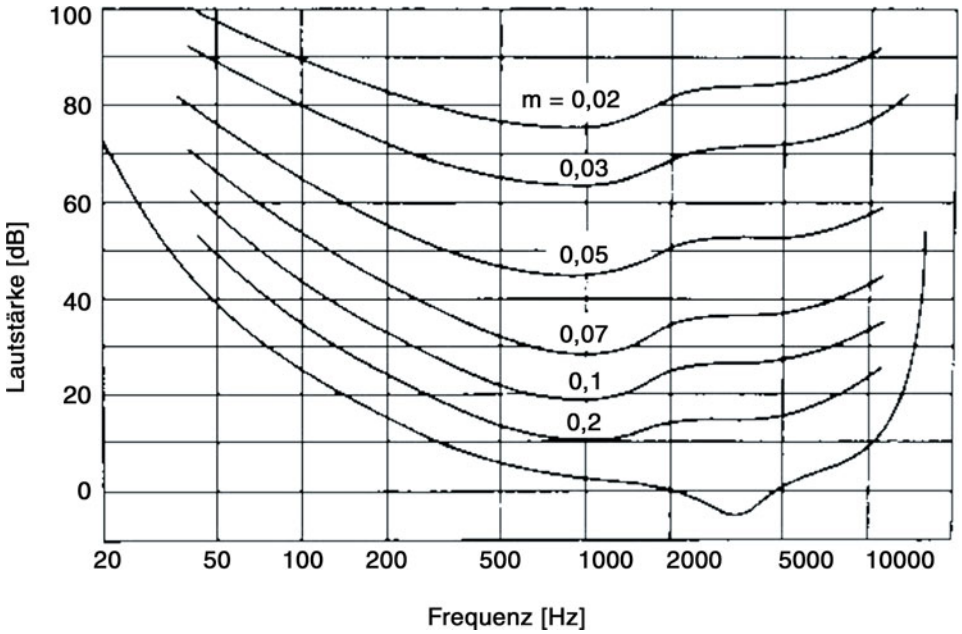


Abb. 3.25 Eben noch wahrnehmbare Lautstärkeänderung m in Abhängigkeit von der Frequenz bei einer Modulationsfrequenz von 4 Hz; nach Zwicker und Feldkeller (1967)

4000 Hz ein Minimum; d. h. das Ohr ist dort am empfindlichsten. Im Bereich großen Schalldrucks wird die Hörfläche durch die Schmerzgrenze abgegrenzt, wo die Gehörempfindung in eine unangenehme Empfindung übergeht. Auch die Schmerzgrenze ist frequenzabhängig. Bei einem Ton von ca. 1000 Hz liegt sie bei etwa 60 N/m^2.

In Abb. 3.25 ist die eben noch wahrnehmbare Lautstärkeänderung in der Hörfläche (für Sinustöne) dargestellt. Dieser Darstellung kann man entnehmen, dass das Lautstärkeauflösungsvermögen bei sehr tiefen und hohen Frequenzen relativ schlechter ist als bei mittleren Frequenzen um 1000 Hz. Um bei der technischen Objektivierung von Lautstärken mittels eines Schallpegelmessgerätes diese Frequenzabhängigkeit wenigstens annähernd zu berücksichtigen, wurden Bewertungsfilter definiert, welche die Geräusche in den verschiedenen Frequenzbändern einer Dämpfung unterziehen, die in etwa dem Kehrwert der Kurven gleicher Lautstärke entsprechen. Die sog. A-Bewertung ist dabei bei niedriger Lautstärke (20–40 dB) zu verwenden, während die C-Bewertung hohe Lautstärken annähert (80–90 dB). Unabhängig von dieser Abhängigkeit ist es heute jedoch üblich, die Lautstärke eines Fahrzeugs (sowohl Innen- wie Außengeräusch) unter Einsatz der A-Bewertungskurve zu messen (Lautstärkeangabe in dB(A)).

Bietet man einer Versuchsperson bei einer bestimmten Lautstärke eines Bezugstons (z. B. 1000 Hz) einen zweiten Ton an und untersucht, welche Lautstärke man gerade benötigt, um diesen zweiten Ton zu hören, so stellt man folgendes fest: Für den Fall, dass der zweite Ton eine niedrigere Frequenz hat als der Bezugston, sind deutlich geringere zusätzliche Lautstärken notwendig, um diesen Ton gerade noch wahrzunehmen als im umgekehrten Fall. Der zweite Ton wird durch den ersten Ton in Abhängigkeit von diesem Frequenzunterschied unterschiedlich „maskiert". Bei systematischer Veränderung der Testtonfrequenz erhält man ein Maskierungsmuster, dass relativ steile Flanken zu niedrigen Frequenzen und relativ flache Flanken zu hohen Frequenzen aufweist. Dieser Verdeckungseffekt spielt bei der Bestimmung der empfundenen Lautstärke von Geräuschen eine wesentliche Rolle und wird in dem von Zwicker entwickelten Verfahren zur Bestimmung der Lautheit berücksichtigt. Im Automobilbereich spielt der Verdeckungseffekt eine erhebliche Rolle, da das relativ niederfre-

quente Fahrgeräusch zahlreiche unerwünschte höherfrequente Störgeräusche (siehe ▶ Abschn. 8.2.2) maskieren kann.

Auf die Darstellung weiterer Abhängigkeiten von der Modulationsfrequenz sei hier verzichtet. Ähnliche Zusammenhänge wie bei der Empfindungsschwelle für Lautstärken findet man für die *Empfindungsschwelle der Tonhöhe* (Einzelheiten zu dem ganzen Komplex der Hörphysiologie und -psychologie siehe Zwicker und Feldkeller 1967).

Auch das *zeitliche Auflösungsvermögen* stellt einen die Leistungsfähigkeit des Gehörs begrenzenden Faktor dar. Um einen Ton oder ein Geräusch voll wahrzunehmen, ist eine Zeit von ca. 180 ms notwendig. Obwohl diese Zeit sich direkt aus den physikalischen Abläufen im Innenohr erklärt, zeigt sich doch eine erstaunliche Übereinstimmung mit der zeitlichen Auflösungsgrenze im visuellen Bereich, was auf die Abstimmung der physikalischen Vorgänge in den Rezeptoren und der Leistungsgrenze nervöser Verarbeitung hindeutet.

Ähnlich wie beim optischen ist auch beim akustischen Informationskanal eine *Richtungsorientierung* möglich. Das Richtungshören basiert auf der Erfassung von Laufzeit- und Intensitätsdifferenzen zwischen den beiden Ohren. Dabei sind Laufzeitunterschiede (ca. 840 µs) von einem Ohr zum anderen im Bereich von Frequenzen < 1300 Hz wirksam. Lautstärkeunterschiede werden im Frequenzbereich zwischen 1000 und 5000 Hz bedeutsam. Durch leichte Kopfdrehungen kann zudem festgestellt werden, ob sich die Schallquelle vor oder hinter dem Beobachter befindet. Alles in allem ist dadurch in einem freien Schallfeld ein räumliches Auflösungsvermögen von ca. 3‘ bis 5‘ möglich[29].

3.2.1.3 Kinästhetischer und haptischer Sinn

Die Bewegung des Körpers wird im Zusammenspiel zwischen dem optischen und dem haptischen Informationskanal durch den bei Bewegung entstehende Reaktionsdruck an den Körperunterstützungsflächen (Fußboden, Sitz) sowie mittels des kinästhetischen Informationskanals wahrgenommen. Das Gleichgewichtsorgan (Vestibularorgan), das hierfür die adäquate Information liefert, ist mit dem Innenohr direkt verbunden. Entwicklungsgeschichtlich hat sich das Ohr und das Gleichgewichtsorgan aus der gleichen Quelle entwickelt, wobei dann aber zwei völlig getrennte Sinnesempfindungen den jeweiligen Teilorganen zuzuordnen sind.

Direkt im Innenohr, am Fuß der Schnecke sind die sog. *Maculaorgane* (Statolithenorgane) lokalisierten (siehe hierzu ◘ Abb. 3.22 und 3.26). Ein Statolithenorgan besteht aus der Otolithenmembran, einer gallertartigen kissenförmigen Masse, in die winzige Calcitkristalle eingelagert sind. An der freien Oberfläche tragen sie submikroskopische Härchen (Zilien), die mit Sinneszellen verbunden sind. Aufgrund der unterschiedlichen Masse von Calcitkristallen und Otolithenmembran wird bei Einwirken von Beschleunigungskräften das Sinnesepithel aus seiner Ruhelage verschoben und verbiegt somit die Härchen der Rezeptoren. Jeweils zwei Statolithenorgane, Utriculus und Sacculus, befinden sich auf jeder Seite des Kopfes im Innenohr, wobei die Macula Utriculi so ausgerichtet ist, dass sie auf horizontale Beschleunigungskräfte reagiert und die Macula Sacculi so, dass sie für vertikale Beschleunigungskräfte empfindlich ist. In ihrem Zusammenspiel ermöglichen sie also die Wahrnehmung von Translationsbeschleunigung in allen drei Raumrichtungen. Bei gerader Kopfhaltung steht die Macula Sacculi somit unter ständiger Einwirkung der Gravitationsbeschleunigung. Der Organismus erfährt also über den Statolithenapparat Information über die Stellung des Kopfes im Raum.

Ebenfalls mit dem Innenohr verbunden sind die Bogengänge (◘ Abb. 3.26). Es handelt sich dabei um drei kreisförmig geschlossene Kanäle, die mit Endolymphe gefüllt sind und die jeweils aufeinander (ungefähr) senkrecht stehen. An einer Stelle ragt die Cupula, die die gleiche Dichte wie die Endolymphe besitzt, in das Innere des Bogengangs. Die Zilien der Rezeptorzellen dringen tief in die Cupula ein. Wegen dieser Anordnung beeinflussen Translationsbeschleunigungen das Organ nicht, jedoch Rotationsbewegungen, da hier die Endolymphe aufgrund ihrer Trägheit gegenüber der äußeren Bewegung zu-

29 In der von der Außenwelt akustisch abgeschirmten Kabine eines Fahrzeugs ist nur eine sehr eingeschränkte akustische Richtungsorientierung möglich, weil durch akustische Signale (z. B. Polizeisirene) die Oberfläche des ganzen Fahrzeugs zu Schwingungen angeregt wird, wodurch eine Richtungsorientierung erheblich erschwert ist.

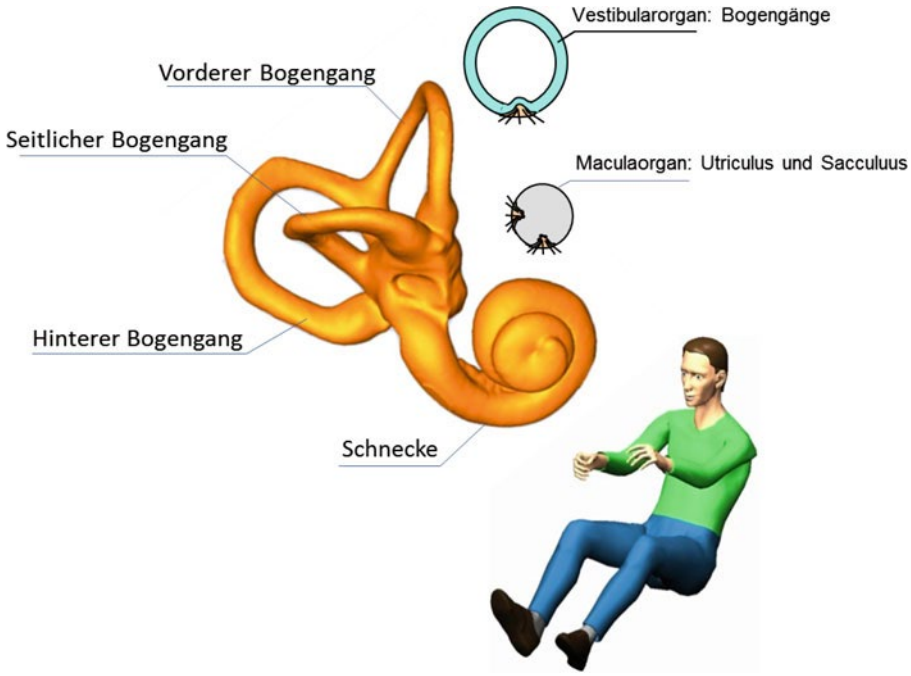


Abb. 3.26 Aufbau des Gleichgewichtssinns bestehend aus Vestibularorgan und Maculaorgan (Computertomographie-aufnahme des menschlichen Innenohrs. Quelle: ▶ http: www.scientifica.ch)

rückbleibt[30]. Messungen haben allerdings ergeben, dass die Cupulaauslenkung nicht der momentanen Winkelbeschleunigung, sondern der Winkelgeschwindigkeit entspricht. Die Endolymphe in dem Bogengang verhält sich in erster Näherung also wie ein Torsionspendel mit hoher Dämpfung (Goldberg und Fernandez 1971). Die Bogengänge nehmen ähnlich drei in ihrer Wirkung aufeinander senkrecht stehenden Rotationsbeschleunigungsaufnehmern – die Rotationsbewegung um die drei Raumachsen auf.

Mit dieser Sinnesorgankombination ist der Mensch in der Lage, Translations- und Rotationsbeschleunigungskräfte (natürlich einschließlich der Schwerkraft) in Größe und Richtung zu erfassen. Die Schwellwerte (die niedrigste Beschleunigung, die gerade wahrgenommen werden kann) für Translationsbeschleunigung sind von der Bewegungsfrequenz und der Bewegungsrichtung abhängig. In Abb. 3.27 ist diese Abhängigkeit für die vertikale und horizontale Beschleunigungsrichtung beim aufrecht sitzenden Menschen dargestellt. Danach besitzt der Mensch offensichtlich bei etwa 3 Hz ein Maximum an Bewegungsempfindung[31].

Allerdings sind die in der Literatur zu findenden Beschleunigungsschwellwerte extrem unterschiedlich. Heißing et al. (2000) stellt aus einer Literaturübersicht die in Tab. 3.4 wiedergegeben Schwellwerte für die drei translatorischen und die drei rotatorischen Bewegungsformen im Raum zusammen.

30 Wenn man sich länger Zeit einer Rotationsbewegung ausgesetzt (z. B. bei einer Fahrt im Karussell oder durch Eigendrehung, wie es bei einem beliebten Kinderspiel der Fall ist), bleibt die Endolymphe aufgrund der Reibung an den Wänden des Bogengangs in Relation zu diesem in Ruhe. Wenn man nun plötzlich die Bewegung abstoppt, bewegt sich die Endolymphe wegen ihrer Trägheit kurzfristig weiter. Man nimmt also eine Drehbewegung wahr, die eigentlich nicht existiert. Wegen der neuronalen Verschaltung für die Leistung der Vertikalkonstanz (Abb. 3.11) muss nun visuell eine Drehbewegung gesehen werden, die die vermeintliche kinästhetisch wahrgenommene kompensieren würde (wegen der nervösen Verschaltung der Information aus dem Vestibularorgan u.a mit. den Augen kommt es zusätzlich noch zu Nystagmusbewegungen der Augen).

31 Bei der Auslegung von Federung und insbesondere der Polsterung von Sitzen versucht man deshalb gerade diesen Frequenzbereich möglichst gut zu dämpfen.

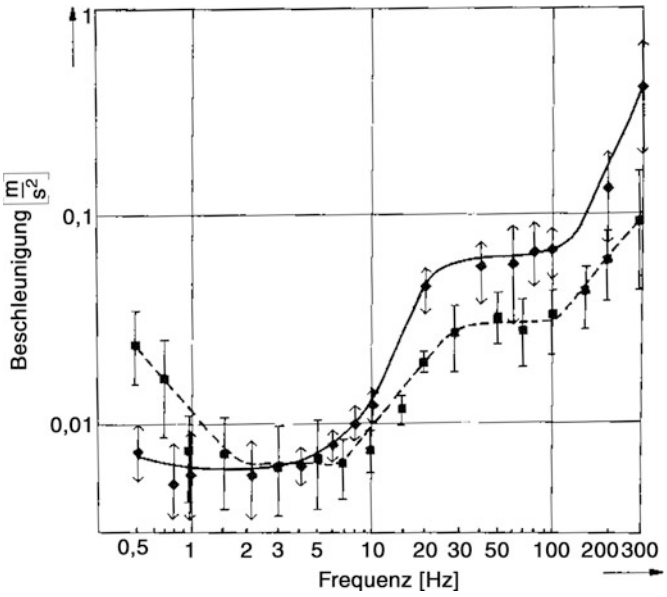
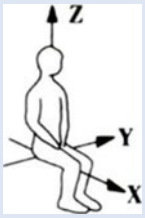


Abb. 3.27 Wahrnehmungsschwelle für horizontale (-) und vertikale (- -) Translationsbeschleunigung für den aufrecht sitzenden Menschen (nach Steward 1971)

Tab. 3.4 kinästhetische Wahrnehmungsschwellen nach Heißing et al. (2000)



Bewegungsform	Schwellenwert
Gieren α_z	0,05 bis 5 [°/s²]
Rollen (Wanken) α_x	0,1 bis 0,2 [°/s²]
Nicken α_y	0,1 bis 0,2 [°/s²]
Logitudinal X	0,02 bis 0,8 [m/s²]
Transversal Y	0,05 bis 0,1 [m/s²]
Vertikal Z	0,02 bis 0,05 [m/s²]

In der Literatur werden für die Rotationsbewegungen als Schwellwerte häufig die Rotationsgeschwindigkeit anstelle der Rotationsbeschleunigung angegeben. Das ist insofern verwunderlich, als aufgrund des physiologischen Aufbaus des Vestibularorgans eigentlich nur Beschleunigungen wahrgenommen werden sollten. Wolf (2009) argumentiert damit, dass dies auf die Trägheit des Ansprechens der Perilymphe auf Beschleunigungsvorgänge zurückzuführen ist, ein Effekt, der bedingt durch die Reibung dieser Flüssigkeit an den Gefäßwänden noch erhöht wird.

Zur Feststellung der Schwellwerte der Gierbeschleunigung (Drehung um die Hochachse z) wurden bereits zu Beginn der Zwanzigerjahre zahlreiche Untersuchungen durchgeführt. Wolf (2009) stellt alle Werte, die bis zum Jahr 1965 gefunden worden sind, zusammen. Das Ergebnis ist höchst unterschiedlich. Die gefundenen Werte fasst er gemäß Tab. 3.5 zusammen. Wegen der unsymmetrischen Verteilungen berechnete er für den Mittelwert sowie

Tab. 3.5 Schwellwerte für die Gierbeschleunigung (nach Wolf 2009)

	minimal	maximal	Mittelwert
50. Perzentil (Median)	0,2 °/s²	1,0 °/s²	0,63 °/s²
95. Perzentil	0,990 °/s²	3,9 °/s²	1,98 °/s²
5. Perzentil	0,035 °/s²	0,132 °/s²	0,086 °/s²

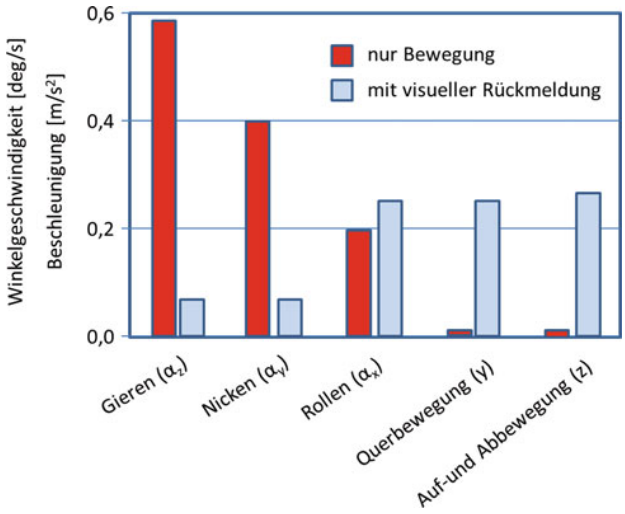


Abb. 3.28 Wahrnehmungsschwellen nur aufgrund der Bewegungsinformation und mit visueller Rückmeldung (nach Muragushi et al. 2006)

den minimalen und maximalen Wert jeweils jeweils den Medianwert und das 5. und 95. Perzentil.

Bezüglich der Schwellwerte für die Wankbeschleunigung (seitliche Drehbewegung) beobachtete Gundry (1978): je größer die Wankbeschleunigungen, desto geringer die Detektierzeit. Bei einer Einwirkungszeit von 100–150 ms ist danach eine Mindestbeschleunigung von 10°/s² notwendig, um den Bewegungsvorgang wahrzunehmen; bei einer Einwirkungszeit von 1 Sekunde sinkt dieser Wert auf 1°/s² ab. Nach Beobachtungen von Muragushi et al. (2006) hängen die Wahrnehmungsschwellen erheblich davon ab, ob die Versuche mit oder ohne visuelle Rückmeldung gemacht worden sind (Abb. 3.28). Die visuelle Rückmeldung erniedrigt danach die Wahrnehmungsschwelle für das Gieren und Nicken deutlich, während sie die Wahrnehmungsschwelle der Quer- und Vertikalbewegung erhöht.

Um Information über die Stellung des Skelettsystems zu vermitteln, spielen speziell die Muskelspindeln, die in den Muskeln der Willkürmotorik als Messelemente für deren Längendehnung dienen, ebenso wie die Gelenkrezeptoren eine wichtige Rolle (siehe hierzu ▶ Abschn. 3.2.3). Auf diese Weise werden auch Kräfte (Trägheitskräfte wie Reaktionskräfte), die auf das Skelettsystem wirken, erfasst. Nachdem diese Kräfte nur durch die Berührung mit der Umgebung übertragen werden können, tragen auch die Mechanorezeptoren der Haut zu der Bewegungsempfindung bei. Nach Schmidt (1995) gibt es vier verschiedene Typen von Mechanosensoren, nämlich die Merkelzellen, die Ruffinikörperchen, die Meissnerkörperchen und die Pacini-Korpuskel. Diese Rezeptoren unterscheiden sich hinsichtlich des sog. rezeptiven Feldes, d. h. der Größe der Fläche auf der Haut, die zu einer dort lokalisierten Empfindung führen und hinsichtlich der Adaptationsgeschwindigkeit. Man unterschiedet grob die langsam adaptierenden Merkel- und Ruffini-Rezeptoren, die konstant auf einen dauerhaften Reiz reagieren (sog. Proportionalverhalten – P-Verhalten) und die schnell adaptierenden Meissnerkörperchen und Pacinikorpuskeln, die nur zu Beginn und zum Ende des Reizes antworten. Dabei zeigen speziell die Meissner-Körper ein einfach differenzierendes Verhalten (sie reagieren nur auf Druckänderung; Differentialverhalten, D-Verhalten) und die Pacini-Zellen ein Differentialverhalten zweiter Ordnung, d. h. sie regieren vornehmlich auf Druckänderungen (Beschleunigung; D^2-Verhalten) und speziell auf Vibration. Beyer und Weiss (2001) ordnen den Sensortypen die in Tab. 3.6 aufgeführten haptischen Qualitäten und Merkmale zu. Das dynamische Verhalten wird nach Schmidt (1995) angegeben (zusammengestellt nach Reisinger 2009).

Die Schwelle für einen punktförmigen Druckreiz liegt bei $3 \cdot 19^{-9}$J (Müller-Limmroth 1981). Dieser Schwellwert ist allerdings von nicht allzu großem praktischem Interesse, da er durch will-

Tab. 3.6 Eigenschaften und Zuordnung haptischer Qualitäten zu den verschiedenen Mechanosensoren und deren typisches Übertragungsverhalten

Mechanosensor	Adaptionsgeschwindigkeit	Haptische Qualitäten	Übertragungsverhalten
Merkelzelle	Langsam adaptierend, kleines rezeptives Feld mit scharfen Grenzen	Sensitiv auf ansteigende und andauernde Reize, besonders jedoch hohe dynamische Sensibilität.	P-Verhalten
Ruffinikörperchen	Langsam adaptierend, großes rezeptives Feld mit unscharfen Grenzen	Sensitiv auf ansteigende und andauernde Reize, besonders jedoch hohe dynamische Sensibilität. Besonders exakte Wiedergabe während der Reizdauer.	P-Verhalten
Meissnerkörperchen	Schnell adaptierend, kleines rezeptives Feld mit scharfen Grenzen	Sensitiv auf Druckanstieg an der Haut.	D-Verhalten
Pacinikorpuskel	Schnell adaptierend, großes rezeptives Feld mit unscharfen Grenzen	Sensitiv auf Beschleunigungen oder höhere Ableitungen wie Vibrationen. Sowohl Auslenkung als auch Rückstellung des Reizes.	D^2-Verhalten

kürliche Kraftaufwendung in den meisten Fällen überschritten werden kann. Demgegenüber ist das taktile räumliche Auflösungsvermögen von größerer Bedeutung, da dadurch festgelegt werden kann, bis zu welcher Auflösung Oberflächenstrukturen über den haptischen Kanal erfasst werden können. Für zwei punktförmige gleichzeitig vermittelte Reize („simultane Raumschwelle“) liegt diese Grenze an der Zungenspitze bei 1 mm, an der Fingerbeere bei 2 mm, an den Lippen bei 4 mm, am Unterarm bei 40 mm und auf dem Rücken bei 70 mm (Müller-Limmroth 1981; siehe auch Abb. 3.4)[32].

In Abb. 3.29 ist der Verlauf der Schwelle für Vibrationsempfinden in Abhängigkeit von der Schwingungsamplitude der Haut und der Frequenz dargestellt. Es zeigt sich eine sehr große Vibrationsempfindlichkeit bei 200 Hz.[33]

Die hier beschriebenen Sinnesorgane ermöglichen in ihrer Kombination ein Empfinden der mechanischen Relation des Körpers zur Umgebung. Diese Relation verursacht unterschiedliche Wahrnehmungsqualitäten (in Analogie beispielsweise zur akustischen Empfindung, wo wir auch nicht in der Lage sind, die Amplituden- und Frequenzzusammensetzung eines Geräusches zu schildern, sondern Wahrnehmungsqualitäten wie „brummig“, „hell“ „dumpf“ usw.). Es ist deshalb sinnvoll die kombinatorische Wirkung dieser Sinnesorgane hinsichtlich der Wahrnehmungsqualität zu verbalisieren.

In der Literatur haben sich unterschiedliche Begriffswelten für den Bereich der sinnlichen Wahr-

32 Die Angaben sind z. B. von Bedeutung für die haptische Unterscheidbarkeit von Bedienelementen. Wenn es allerdings darum geht, die Druckverteilung auf der Sitzoberfläche zu messen (siehe hierzu Abschn. 11.2.3.1), so genügt offensichtlich ein relativ grobes Raster an Messpunkten.

33 Die Übertragung von Frequenzen um 200 Hz auf den menschlichen Körper (z. B. über Berührung an der Bodenfläche oder am Lenkrad) sind folglich gut wegzudämpfen, da sie zu starkem Diskomfortempfinden führen.

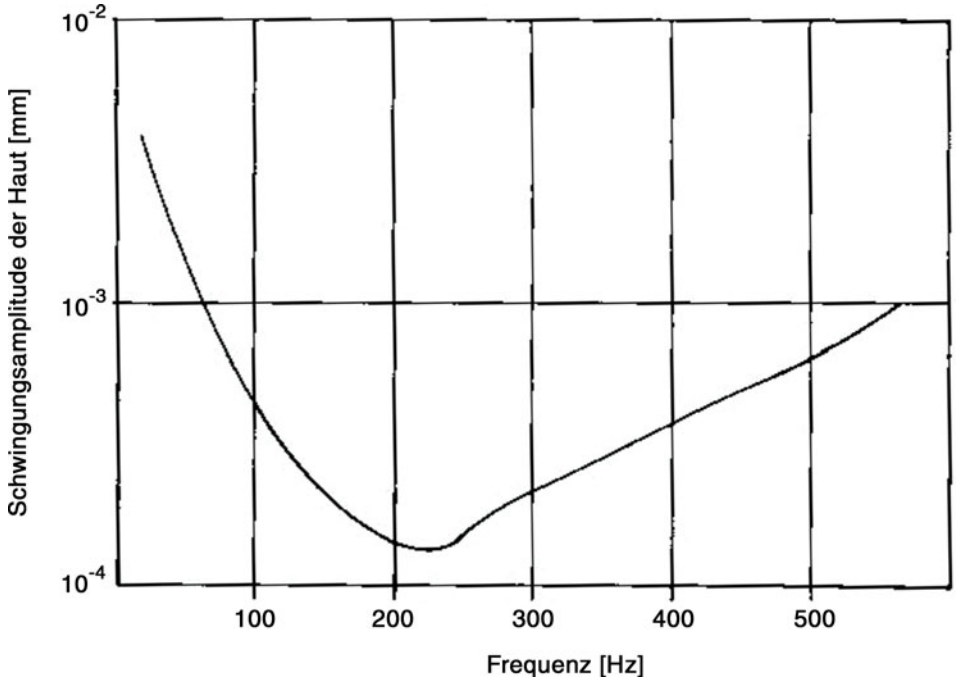


Abb. 3.29 Frequenzabhängigkeit der Vibrationsschwelle, nach Müller-Limmroth 1981.

nehmung von mechanischen Krafteinwirkungen herausgebildet. In der englischsprachig-psychologisch orientierten Literatur wird häufig mit „kinesthetic" das Zusammenspiel aller Stellungs- und Bewegungsrezeptoren des menschlichen Körpers bezeichnet (Handwerker 1993). Sie charakterisiert somit die Wahrnehmung der Bewegung unserer Körperteile. Unter „tactil" versteht man in diesem Kontext die Vermittlung einer Empfindung allein durch die Berührrezeptoren der Haut.

Diese sehr weitverbreitete Terminologie hat den Nachteil, dass sie die Empfindungsqualität, d. h. die Art der subjektiven Wahrnehmung von physikalischen Kraftreizen nur unzureichend berücksichtigt. Vom subjektiven Erleben her können wir nämlich sehr deutlich zwischen Beschleunigungskräften, die auf den *ganzen Körper* wirken und die zu der Empfindung einer Bewegung des Körpers im Raum führen, von solchen unterscheiden, bei denen Kräfte nur auf *einzelne Körperteile* wirken und die zur Empfindung einer Körperhaltung und -bewegung führen. Beim Befahren einer Kurve beispielsweise werden die Beschleunigungskräfte nicht nur durch das Vestibularorgan (Rotationsbeschleunigung) und die Maculaorgane (Querbeschleunigung), sondern auch durch die Mechanorezeptoren im Gesäß als Druck wahrgenommen, was in Kreisen von Fahrwerksspezialisten zu der semiwissenschaftlichen Bezeichnung „Popometer" für die Fähigkeit führt, die Bewegung des Fahrzeugs durch Reize in der Hautoberfläche zu spüren. Betätigen wir nun während dieser Kurvenfahrt den Schalthebel oder Stellhebel der Heizungsanlage, so wird die zugehörige Körperhaltung als vollkommen unabhängig von den Reaktionskräften der Bewegung verspürt. Demgegenüber erfahren wir die Oberflächenqualität von Objekten, die wir berühren, in Kombination mit der erfühlten Form als eine von dem zuvor geschilderten vollkommen getrennte Wahrnehmungsqualität. Die traditionelle Bezeichnung „Tastsinn" bezeichnet diese Art der Wahrnehmung viel besser: wir sind in der Lage, die Form und die Art der Oberfläche von angefassten Gegenständen unabhängig von Bewegungseinflüssen und auch von Körperhaltungen zu erfassen. Auch dies ist eine Art der Konstanzleistung, die von Kühner et al. (2011) auch experimentell nachgewiesen worden ist. Allerdings spielen für diese Wahrnehmungsqualität sowohl die Mechanorezeptoren in der Haut als auch die Stellungsrezeptoren in den

Gelenken und Muskeln sowie die Thermorezeptoren in einer ganz spezifischen Weise zusammen. Mittels der Thermorezeptoren wird beispielsweise Information über das Wärmeleitvermögen der berührten Gegenstände vermittelt. Es erzeugt so den Eindruck, dass sich ein Gegenstand „kalt" (Gegenstand mit hohem Wärmeleitvermögen, wie z. B. Metall bzw. ein mit Flüssigkeit benetzter Gegenstand) oder „warm" (Gegenstand mit geringem Wärmeleitvermögen, wie z. B. Holz oder Styropor) anfühlt. Dieser Tastsinn kommt im Detail auf ganz komplexe Weise zustande: so spielen beispielsweise auch geringe Bewegungen über die Oberfläche („Befühlen") und die dabei erzeugten Frequenzen eine entscheidende Rolle für das Empfinden der Oberflächenqualität.

Für die Belange der Ergonomie ist es deshalb sinnvoll zu definieren:

- Die *kinästhetische Wahrnehmung* erlaubt dem Organismus, Eigenbewegungen des Körpers im Raum zu erfassen. Dafür werden Informationen aus dem Vestibularorgan, den Maculaorganen, den Stellungsrezeptoren in Muskeln und Gelenken und den Mechanorezeptoren in der Haut adäquat verrechnet.

Dem gegenüber ist festzulegen:

- Die *Tiefenwahrnehmung* ermöglicht es dem Organismus, die Körperhaltung und -bewegung unabhängig von äußeren Krafteinwirkungen zu erfassen. Dafür wird in geeigneter Weise die Information aus den Muskelspindeln und den Gelenkrezeptoren mit Information aus dem Vestibularorgan, dem Maculaorgan und den Berührrezeptoren verarbeitet.

Schließlich bleibt noch zu definieren:

- Die *haptische Wahrnehmung* erlaubt es dem Organismus, die Form und Oberflächenkonsistenz von berührten Objekten zu erfassen. Dafür werden die Informationen aus Stellungsrezeptoren in Muskeln und Gelenken (speziell der Finger!), den Mechanorezeptoren in der Haut aber auch der Thermorezeptoren in der Hautoberfläche (im wesentlichen Kaltrezeptoren) in adäquater Weise miteinander verrechnet (siehe dazu: Revesz 1950). Dabei entstehen Komplexempfindungen wie weich, hart, glatt, rau, feucht, trocken und klebrig.

3.2.1.4 Thermischer Sinn

Der Mensch ist von seiner Stammesgeschichte her gesehen ein tropisches Wesen. Entsprechend ist er darauf eingerichtet, in einem warmen oder heißen Klima zu leben. Die Kerntemperatur darf dabei nicht wesentlich von ca. 37 °C abweichen. Die grundlegenden physikalisch-physiologische Messungen der menschlichen Wärmebilanz und Temperaturen an repräsentativen Körperstellen von Benzinger (1979) können in folgender Weise zusammengefasst werden:

- Für die Wahrnehmung des thermischen Zustands existieren keine Wärmestromfühler, sondern ausschließlich Temperaturfühler, sogenannte Thermorezeptoren. Diese geben elektrische Impulse mit unterschiedlicher Impulsrate ab. Hierbei unterscheidet man zwischen Kaltrezeptoren, die unterhalb einer bestimmten Temperaturschwelle verstärkt ansprechen und Warmrezeptoren, die oberhalb einer bestimmten Temperaturschwelle verstärkt ansprechen, jeweils mit einer Erhöhung der Impulsrate. Entsprechend besitzen wir einen *Kältesinn* und einen *Wärmesinn* (Schmidt 1979). Auf der Hautoberfläche besitzen wir weitaus mehr Kälterezeptoren als Warmrezeptoren.
- Thermische Unbehaglichkeit durch Kälte wird über die Kaltrezeptoren in der Körperoberfläche (Haut) wahrgenommen – und zwar dann, wenn die Hauttemperatur einen bestimmten Schwellenwert (ca. 34 °C) unterschreitet. Bei zunehmender Abkühlung setzt eine Erhöhung des Stoffwechsels entsprechend der Impulsrate der Kaltrezeptoren der Haut ein. Bei etwa 17 °C geht das Kältegefühl in ein Schmerzempfinden über. Die Warmrezeptoren auf der Haut signalisieren bei Überschreiten der Temperaturschwelle nur angenehmes Warmempfinden. Schmerzrezeptoren reagieren bei unangenehm hoher Temperatur der Haut. Thermische Unbehaglichkeit durch Wärme, verbunden mit Schwitzen, wird im Wesentlichen über die Warmrezeptoren im Temperaturregelzentrum im Stammhirn wahrgenommen – und zwar dann, wenn dessen Temperatur einen bestimmten Schwellenwert (ca. 37 °C) überschreitet. Die Schweißrate folgt der Impulsrate der Warmrezeptoren im Stammhirn. Anderseits kann die Schweißrate reduziert

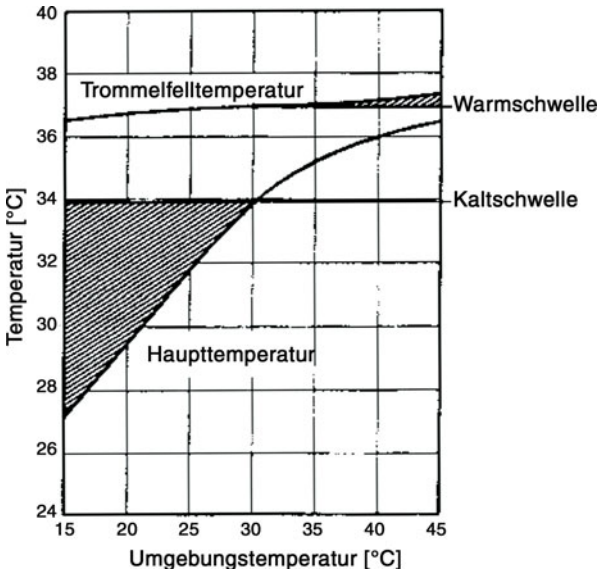


Abb. 3.30 Haut-und Trommelfelltemperatur in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur, aufgenommen an einem ruhenden, unbekleideten jungen Mann (nach Benzinger 1979)

werden, wenn gleichzeitig die „Kaltschwelle" der Haut unterschritten wird, z. B. durch Zugluft.

Nach Benzinger (1979) kann thermische Behaglichkeit definiert werden als: „Abwesenheit von solchen Impulsen der Kaltrezeptoren der Haut und der Warmrezeptoren des Temperaturregelzentrums im Stammhirn, die Anlass geben, die thermische Umgebung verändern zu wollen". Oder vereinfacht ausgedrückt: „Thermische Behaglichkeit ist dann gegeben, wenn weder die Hauttemperaturschwelle von ca. 34 °C unterschritten noch die Stammhirntemperatur von ca. 37 °C überschritten ist".

In Abb. 3.30 sind in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur die Hauttemperatur und die Trommelfelltemperatur (repräsentativ für die Stammhirntemperatur) eines in Ruhe befindlichen, unbekleideten jungen Mannes aufgetragen. Die schraffierten Bereiche geben jeweils die thermisch unbehaglichen Temperaturen an. Die thermische Behaglichkeit ist sowohl hinsichtlich des Zu-kalt-Empfindens (über die Hauttemperatur) als auch des Zu-warm-Empfindens (über die Kerntemperatur) bei derselben Umgebungstemperatur von 30 °C gegeben: dort besteht also „vollständige thermische Behaglichkeit".

Für einen höheren Aktivitätsgrad und sonst gleiche Versuchsbedingungen, wie sie in Abb. 3.30 gegeben waren, wies Benzinger den Zustand der „relativen Behaglichkeit" nach. Hierbei wird gleichzeitiges und gleichstarkes Ansprechen von Kaltrezeptoren der Haut und Warmrezeptoren im Stammhirn als behaglicher empfunden als das Ansprechen von nur einer Themorezeptorart (z. B. Zugluft beim Schwitzen).

Dass die in Abb. 3.30 gemessene ideale Umgebungstemperatur von den im Fahrzeug üblichen Umgebungstemperaturen so weit entfernt ist (Behaglichkeit wird in einem Raum mit nahezu keiner Luftbewegung bei 50 % Luftfeuchtigkeit bei ca. 21 bis 22 °C erreicht), ist wesentlich darauf zurückzuführen, dass die Versuchsperson unbekleidet war. Unser Körper versucht durch verschiedene Klimaregulationsmechanismen, die Hautoberflächentemperatur bei ca. 34 °C zu halten. Im Wesentlichen steht dafür die Produktion von Schweiß zur Verfügung, womit durch Verdunstung der Körperoberfläche Wärmeenergie entzogen werden kann und die Muskelbewegung, wodurch wegen des geringen Wirkungsgrades der Muskulatur von ca. 25 % Wärme erzeugt wird („Kältezittern"!). Die Wärmeabgabe wird dabei wesentlich durch die gegebene Luftfeuchtigkeit (bei 100 % Luftfeuchtigkeit kann keine Verdunstung mehr stattfinden) und die sog. Windgeschwindigkeit (Luftbewegung; mit zunehmender Windgeschwindigkeit nehmen Effekte des Wärmetransportes durch Konvektion und Verdunstung zu) beeinflusst. Zu alledem kommt noch der Effekt der Wärmestrahlung: Ist die Oberflächentemperatur der Umgebung deutlich niedriger als die Hautoberflächentemperatur, wird dadurch Wärme abgegeben,

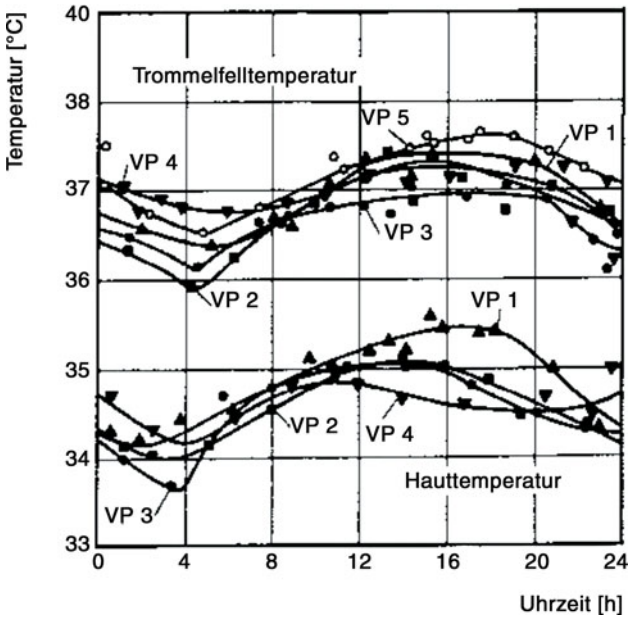


Abb. 3.31 Tagesgang der Temperaturschwellenwerte für Kaltempfinden, wahrgenommen über die Hauttemperatur und für Wärmeempfinden, wahrgenommen über die Kerntemperatur (gemessen am Trommelfell) (Mayer 1986)

während umgekehrt bei Oberflächentemperaturen der Umgebung größer 34 °C (= 307 K) hierdurch Wärme aufgenommen wird. Durch Kleidung versuchen wir die großen Schwankungen der Außentemperatur zu kompensieren und in etwa die genannte Hautoberflächentemperatur von 34 °C zu halten.

Zusammengefasst sind also folgende sechs physikalische Einflussgrößen für die Wärmebilanz des Menschen: körperliche Aktivität, Bekleidung, Lufttemperatur, Umschließungsflächentemperatur, Luftgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit.

Ursache für die oft geringe individuelle Akzeptanz gegebener Raumklimabedingungen ist die Tatsache, dass die genannten Temperaturschwellenwerte sowohl interindividuellen Streuungen als auch tageszeitlichen Schwankungen unterliegen. Dies wurde durch ein Experiment am Fraunhofer-Institut für Bauphysik für vier bzw. fünf Personen gezeigt (Abb. 3.31). Dargestellt sind die Kaltschwellenwerte auf der Haut und die Warmschwellenwerte, gemessen am Trommelfell, im Tagesverlauf (genauer beschrieben in Mayer 1986). Außer den interindividuellen Schwankungen ist ein ausgeprägter Tagesgang für die Temperaturschwellen zu erkennen.

Die Bedeutung der Hauttemperatur für das Behaglichkeitsempfinden ist an rund 50 Versuchspersonen von Mayer und Schwab (1990) überprüft worden. Hierzu wurden diese unterschiedlichen Umgebungstemperaturen ausgesetzt, die Nackentemperaturen gemessen und die Bewertung des Zu-kalt- oder Zu-warm-Empfindens abgefragt. Die in Abb. 3.32 wiedergegebenen Kurven zeigen in Abhängigkeit von der Nackentemperatur die Prozentsätze derjenigen Versuchspersonen, die über Zu-kühl- oder Zu-warm-Empfinden am Nacken (percentage of dissatisfied, PD) klagten. Zu erkennen ist, dass bereits sehr kleine Schwankungsbereiche der Hauttemperatur zu erheblichen PD-Werten führen. Eine Temperaturschwankung von nur +0,5 °C entsprechen bereits PD-Werte von 30 % (durchgezogene Kurve nach Fanger) bzw. 80 % (gestrichelte Kurve nach Mayer et al.).[34]

3.2.1.5 Geschmacks- und Geruchssinn

Die Empfindung für Geruch und Geschmack gehören zu den entwicklungsgeschichtlich ältesten Sinnessystemen. Die Rezeptoren für den Ge-

34 Die hier aufgeführten Befunde belegen die enorme Bedeutung von Klimaanlagen im Fahrzeug für das Komfortempfinden. Sie zeigen einerseits die Notwendigkeit der individuellen Einstellbarkeit, anderseits aber auch den Anspruch an die technische Realisierung, wenn man die angesprochenen Mechanismen des Wärmetransports von und zu dem menschlichen Körper berücksichtigt.

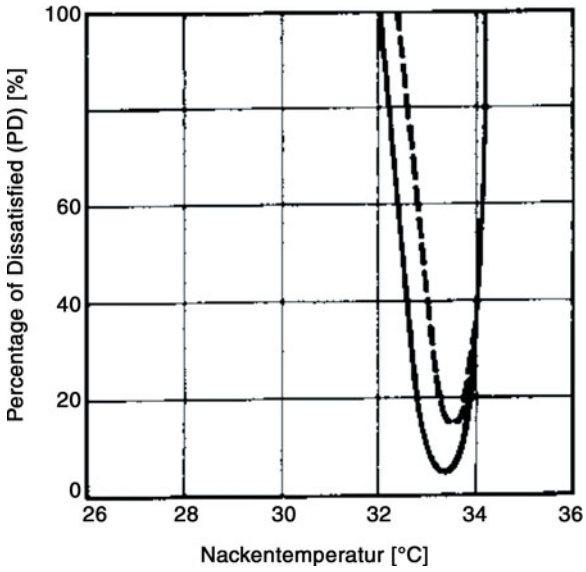


Abb. 3.32 Prozentsatz der Versuchspersonen, die über Zu-kühl- oder Zu-warm-Empfinden am Nacken klagten, in Abhängigkeit von der Nackentemperatur (durchgezogen Kurve nach Fanger 1992; gestrichelte Kurve nach Mayer et al. 1998)

schmackssinn befinden sich im Mund-Rachenbereich. Die Rezeptoren sind Geschmacks-Knospen mit einer deutlichen PD-Charakteristik. Es sind 4 Geschmacksqualitäten zu unterscheiden, deren jeweilige Rezeptoren folgendermaßen lokalisiert sind: An der Zungenspitze wird die Geschmacksqualität „süß", an den seitlichen Zungenrändern „sauer", an der Zungenspitze zu den seitlichen Zungenrändern hin „salzig" und am Zungengrund (Gaumenbereich) „bitter" empfunden. Der Reizquelle muss sich dazu in unmittelbarer Nähe oder im Kontakt mit dem Sinnesorgan befinden. Der differenzierte Geschmack von Nahrungsmittel kommt erst in Verbindung mit den Geruchsrezeptoren zustande.

Der Geruchssinn ist demgegenüber weitaus differenzierter. Er reagiert auf die Berührung mit gasförmigen Molekülen, wobei die Empfindlichkeit sehr hoch ist. Wir verfügen über ca. 10 Millionen Rezeptorzellen, womit wir in der Lage sind, mehrere tausend Gerüche voneinander zu unterscheiden und zu klassifizieren, die grob in 6 Klassen eingeteilt werden können (Keidel 1975)[35]:

1. würzig (Pfeffer, Ingwer),
2. blumig (Jasmin),
3. fruchtig (Apfeläther),
4. harzig (Räucherharz)
5. faulig (Schwefelwasserstoff),
6. brenzlich (Teer).

Auch die Geruchsrezeptoren haben eine ausgeprägte PD-Charakteristik. Da bei normaler Atmung die Luft in der Riechschleimhaut praktisch stehen bleibt, können dorthin nur wenige Duftstoffe gelangen. Durch Belüftung („Schnüffeln") kommt eine bessere Riechleistung zustande. Bei der Beurteilung von Gerüchen muss man zwischen der Wahrnehmungsschwelle, bei der eine unspezifische Geruchsempfindung ausgelöst wird, und der Erkennungsschwelle unterscheiden, bei der die Identifizierung des Geruchs erfolgen kann. Die Schwellenkonzentration schwankt dabei in Abhängigkeit von dem Geruchsstoff und weiteren Faktoren wie Lufttemperatur und -feuchtigkeit zwischen $4 \cdot 10^{-9}$ und $5 \cdot 10^{-14}$ g/Liter Luft.[36] Für manche Gasmoleküle sind wir allerdings überhaupt nicht empfindlich, z. B. für das hochgiftige Kohlenmonoxyd.

Die für den Geruchssinn zuständigen Rezeptoren, die sog. Riechzellen liegen auf der Riechschleimhaut im oberen Nasenbereich (Nasendach). Von ihnen gehen Nervenfasern aus, welche in der

35 Es gibt heute praktisch keine technische Messmethode, mit deren Hilfe Geruchseindrücke objektiv erfasst werden können. Wenn es also darum geht, Gerüche zu erfassen, werden hierzu speziell ausgebildete Prüfer herangezogen.

36 Schlechte Luft in Räumen (also auch im Fahrzeug) beruht fast immer auf hoher Riechstoffkonzentration.

vorderen Schädelgrube die Schädelbasis durchsetzen. Die Axone der Rezeptorzellen leiten die Aktionspotentiale weiter an den *Riechkolben*, eine unmittelbare Ausstülpung des Gehirns. Da sowohl von der Riechschleimhaut als auch vom Riechkolben Verbindungen zum Hypothalamus und zum Limbischen System existieren, ist mit dem Geruch eine genetisch bedingte oftmals stark emotionale, motivierende bzw. Aversion einleitende Reaktion verbunden.[37] Die hier dargelegten physiologischen Befunde sind u. a. die Grundlage für die „Basisstellung" des Geruchs in der Komfortpyramide (siehe ► Abschn. 3.3.4).

3.2.2 Informationsverarbeitung

In der Informationsverarbeitung wird, wie bereits erwähnt, sowohl eine kognitive Gesamtschau der von der Informationsaufnahme vermittelten Umwelteindrücke erreicht als auch eine diesen Umwelteindrücken möglichst optimal angepasste Reaktion vorbereitet, die als detaillierter Bewegungsentwurf an die Mechanismen der Informationsumsetzung abgegeben wird. Wesentliche Voraussetzung für die Informationsverarbeitung ist das Gedächtnis, das einerseits in Form von sog. „inneren Modellen" erworbenes Wissen enthält und anderseits in Form des „Entscheidungsmechanismus" den Entschluss für eine konkrete Handlung ermöglicht. Die wichtigste Frage ist somit: wie stellt das menschliche Gehirn die Verknüpfung zwischen den externen sich ständig ändernden Reizen und dem dazu passenden Handeln her? Im Zusammenhang mit der beim Führen eines Fahrzeugs wesentlichen Bewegung im Raum ergibt sich zudem die Frage: wie nehmen wir diese Bewegung wahr und wie leiten sich daraus adäquate Handlungen ab? Die folgenden Absätze sollen die Grundlage für das Verständnis dafür schaffen.

37 Wie Erfahrungen von verschiedenen Automobilherstellern ausweisen, können ungünstige Gerüche, wie sie beispielsweise beim Austrocknen von Farb- oder Klebstoffen auftreten, zu erheblichen Imageverlusten beitragen. Umgekehrt erhoffen sich einige Hersteller durch die Bereitstellung künstlicher Wohlgerüche ein emotional positiv gefärbtes Gefühl in ihrem Fahrzeug bereitzustellen.

3.2.2.1 Wie kommt die Information in unser Gehirn?

Wenn wir uns in einem Raum befinden, wenn wir uns durch den Raum bewegen, dann haben wir stets den Eindruck, über alles vollkommen im Bilde zu sein, alles sozusagen im Blick zu haben. Ohne sich darüber genauere Gedanken zu machen, haben wir ein „richtiges" Gefühl für die Distanzen und sogar eine mehr oder weniger präzise Vorstellung über den Raum hinter uns, den wir mit dem Blick- und Gesichtsfeld unserer Augen gar nicht erfassen können. Die fotografische Abbildung eines Raumes scheint uns diesen Eindruck – was den Detailreichtum der Darstellung anlangt – hinreichend gut wiederzugeben, wenn auch das Gefühl für die räumliche Distanz und das „Im-Raum-Sein" dort mangelhaft ist bzw. fehlt.

In vollkommenem Widerspruch zu diesem subjektiven Gefühl steht die objektive Erkenntnis auf physikalisch-physiologischer Basis, dass unser Auge nur in der sogenannten zentralen Sehgrube (fovea centralis) in der Lage ist, ein hinreichend scharfes Abbild der Umgebung zu entwerfen. Dies entspricht aber nur einem Blickwinkel von ca. 2°–3°. In diesem Bereich ist auch die Anzahl der Rezeptoren am dichtesten, nur dort verfügen wir über die vollständige Fähigkeit des Farbsehens. Zur sogenannten Peripherie hin nimmt die Anzahl der Farbrezeptoren (Zapfen) stetig ab (siehe ► Abschn. 3.2.1.1). Die Verschaltung der Rezeptorzellen dort weist nachweislich wenige komplexen und hyperkomplexen Neuronenzellen auf, die Kanten oder Winkel zu detektieren vermögen, dafür aber mehrere, die Bewegung erfassen. Das oben gezeichnete Empfinden über das „Sein-in-der-Welt" bauen wir also durch sukzessives Abtasten mit dem bewegten Auge in unserem Gehirn erst subjektiv zusammen. Das hat aber auch zur Folge, dass wir Wichtiges übersehen können. Wir halten es für statthaft, den Blick von einem Geschehen abwenden zu können, wenn wir aufgrund von Erfahrung glauben zu wissen, „wie es weitergeht" (für statische Objekte ist dies in den meisten Fällen ausreichend!).

Während unsere Umwelt, in der wir uns bewegen, drei Dimensionen hat, besitzt das Bild auf unserer Netzhaut (Retina) lediglich zwei. Trotz der Zweidimensionalität der Netzhaut sind wir aber in der Lage, eine dreidimensionale Umwelt wahr-

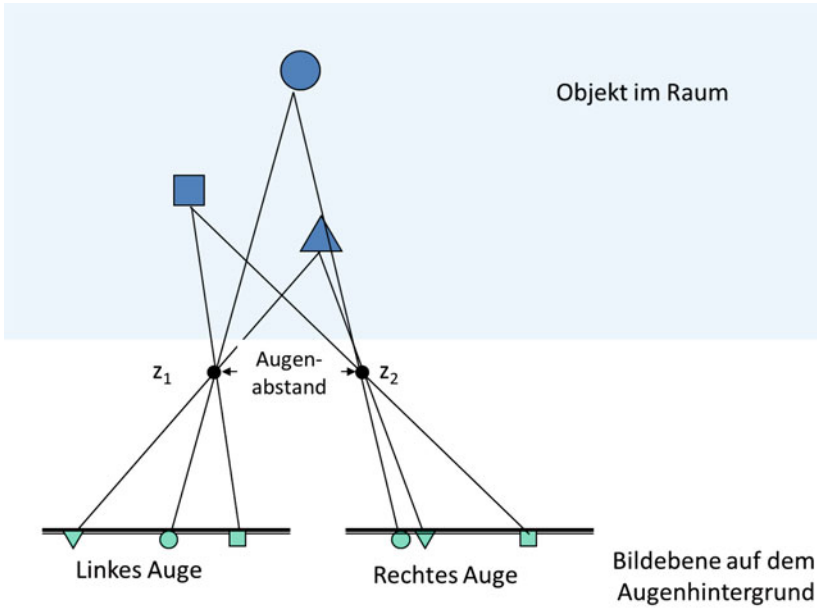


Abb. 3.33 Prinzip der stereoskopischen Abbildung einer räumlichen Konstellation auf zwei Bildebenen

zunehmen. Somit stehen die meisten Fragen der visuellen Wahrnehmung mit der Frage der Tiefenwahrnehmung in direktem Zusammenhang. Die Tiefenwahrnehmung des Menschen erfolgt durch Interpretation der sich überlappenden und wegen des Augenabstandes leicht unterschiedlichen visuellen Felder beider Augen. Abbildung 3.33 gibt die geometrische Konstellation der Abbildung räumlicher Gegebenheiten auf eine zweidimensionale Bildebene wieder. Aus der Kenntnis des Augenabstandes und der Brennweite des Auges lässt sich bei Erkennen des jeweiligen Gegenstandpunktes in jedem der Bilder die entsprechende räumlich Position rückrechnen. Dies ist eine Leistung, zu der unser Gehirn in der Lage ist, eine Leistung die aufgrund der Erfahrung in der Zeit des Heranwachsens im Verlauf der ersten 2–3 Jahre erst erworben wird. Allerdings findet das über Stereoskopie mögliche räumliche Sehen bei einer Entfernung von ca. 40 m seine Grenzen (Bergmeier 2009).

Helmholtz (Helmholtz 1866) legte mit seiner Abhandlung über die Physiologische Optik den Grundstein für die Beschreibung der visuellen Wahrnehmung. Diese sind heutzutage hinlänglich als Gesetze der Optik in der Physik sowie als Beschreibung des Sehvorgangs in der Biologie bekannt. Um den Prozess der visuellen Informationsaufnahme beim Führen eines Fahrzeugs verstehen zu können, sind die Kenntnisse eines vereinfachten Sehvorgangs jedoch nicht ausreichend. Ziel des folgenden Abschnitts ist es nicht, alle Vorgänge der visuellen Wahrnehmung im Detail zu beschreiben, vielmehr sollen einzelne Teile des Prozesses hinreichend detailliert beschrieben werden, sodass die Aufnahme der visuellen Information beim Führen eines Fahrzeugs erklärt werden kann.

Die visuelle Wahrnehmung beginnt bei der Reflexion von Lichtstrahlen einer Lichtquelle (z. B. Sonne, Scheinwerfer) an physikalischen Gegenständen bzw. von Lichtstrahlen, die unmittelbar von einem Objekt emittiert werden (z. B. Scheinwerfer entgegenkommender Fahrzeuge, Rücklichter, Signallampen zur Verkehrssteuerung). Von der Linse gebündeltes Licht wird in der Netzhaut von Sinneszellen aufgefangen, wobei dort gemäß Abb. 3.33 wie bei einer Kamera ein zweidimensionales Bild der Außenwelt gezeichnet wird. Die Energie der eintreffenden Lichtquanten lösen dort in elektrische Signale aus, die über den Sehnerv ins Gehirn gelangen. Das Netzhautbild kann dabei wie ein zweidimensionales Nadelbild behandelt werden (Gibson 1950). Einen gute Vorstellung davon, wie dies geschieht, wurde von Lindsay und Norman (1972) anschaulich gemacht: Der Verschaltungs-

typ der lateralen Hemmung (siehe ◘ Abb. 3.7) ist schon auf der untersten Ebene der Wahrnehmung unmittelbar in Verbindung mit den Rezeptorzellen verwirklicht. Durch Zusammenschaltung mehrerer Neuronen auf eine Neuronenzelle entstehen – wie bereits unter ▶ Abschn. 3.1.3 allgemein für den neurophysiologisch-kybernetischen Prozess der Informationsbehandlung besprochen – komplexe Zellen, die nur dann eine erhöhte Impulsrate abgeben, wenn eine bestimmte Reizkonfiguration auf der Sinnesoberfläche vorhanden ist. Auch diese komplexen Zellen sind wieder zu hyperkomplexen Zellen zusammengeschaltet, die erst bei einer noch mehr im Detail festgelegten Reizkonfiguration eine erhöhte Impulsrate aufweisen. Auf die hier gezeigte Weise ist eine ganze Reihe von spezifischen Detektoren gebildet, so auf der Ebene der komplexen Zellen Kantendetektoren und Bewegungsdetektoren und auf der Ebene der hyperkomplexen Zellen Winkeldetektoren und Detektoren für spezifische Längen.

Werblin u. Roska (2008) stellen fest, dass mit diesen hyperkomplexen Zellen etwa ein Dutzend ganz unterschiedlicher Repräsentationen der visuellen Szene detektiert werden. Jede davon enthält einen anderen Teilaspekt dessen, was sich vor dem Auge abspielt. Die Abstraktionen werden fortlaufend aktualisiert, an das Außengeschehen angepasst und enthalten unter anderem folgende Informationen:

1. Objektumrisse (Vergleichbar einer Strichzeichnung),
2. Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung der Objekte der visuellen Szene,
3. Schattige bzw. helle Bereiche.

Weitere Inhalte sind von der Form her nur schwer wiederzugeben. Jede Information dieser spezialisierten Nervenzellen wird im Sehnerv von einer eigenen Gruppe Nervenfasern, sog. Ganglienzellen, an höhere Hirnregionen weitergeleitet. Ein einzelner Ganglientyp repräsentiert dabei die gefilterte Information eines gesonderten raum-zeitlichen Aspekts verschiedener Charakteristika der visuellen Szene wie Bewegung, Farbe, Tiefe und Form. Die einzelnen Teilinformationen gelangen so getrennt voneinander in verschiedene Hirnregionen, wo sie teils in bewusst ablaufenden, teils in unbewusst ablaufenden Prozessen weiterverarbeitet werden. Das Gehirn erhält für seine Interpretation ausschließlich visuellen Partialinformationen. Wie das Gehirn aus den einzelnen Informationspaketen ein nahtloses, überzeugendes Bild der Wirklichkeit zeichnet, ist u. a. Gegenstand der aktuellen Forschung.

Wie das in etwa geschieht, kann man sich mittels einer Analyse von Guzmán (1969) veranschaulichen, der für die Bilderkennung durch Computer typische Winkelkonfigurationen fand, die eine bestimmte Interpretation eines flächigen Bildes nahelegen. Nach ähnlichen Gesichtspunkten scheint das menschliche Gehirn bereits das monokulare flächige Bild auf der Retina zu interpretieren. ◘ Abbildung 3.34 zeigt einige Beispiele für solche Konfigurationen und ihre bevorzugte Interpretation. Das Beispiel der ◘ Abb. 3.35 demonstriert, wie man diese Interpretation anwendet: Man erkennt zwei Holzscheite, die aufeinander liegen und die sich in der Ecke eines Raumes befinden, in den man hineinsieht. Man kann sich dieser Interpretation auch dann nicht widersetzen, wenn man sich vornimmt, nur ein Gewirr von Linien zu sehen.

Wie kommt diese Interpretation zustande? Die Zellen, die in der besprochenen Weise die einfachen Eigenschaften extrahieren, sind auf noch höhere Zellen so geschaltet, dass diese erst dann optimal reagieren, wenn ein bestimmtes, durch die Verschaltung gegebenes Muster auf der Sinnesoberfläche abgebildet ist. Dabei können durch die gleiche Reizkonfiguration mehrere Zellen gleichzeitig angeregt werden. Es wird dann für den weiteren Wahrnehmungsprozess diejenige ausgewählt, die eine in sich geschlossene, mit gedächtnismäßigen Inhalten übereinstimmende Interpretation erlaubt. Das wird am Beispiel der ◘ Abb. 3.35 deutlich: Die dort mit „T-förmig“ bezeichnete Winkelkonfiguration würde eigentlich nahelegen, dass die Fläche des unten liegenden Holzscheites Teil eines Körpers ist, der mit dem Zimmerboden identisch ist (siehe ◘ Abb. 3.34). Aufgrund des Gewichtes der anderen Eindrücke und zugunsten einer in sich geschlossenen Wahrnehmung der Außenwelt wird diese Interpretation unterdrückt.

Der beschriebene Prozess bezieht sich nicht nur auf die Wahrnehmung einer statischen Umgebung, sondern auch auf die der Bewegung. Dem Bewegungssehen kommt im Zusammenhang mit dem Autofahren große Bedeutung zu; es stellt

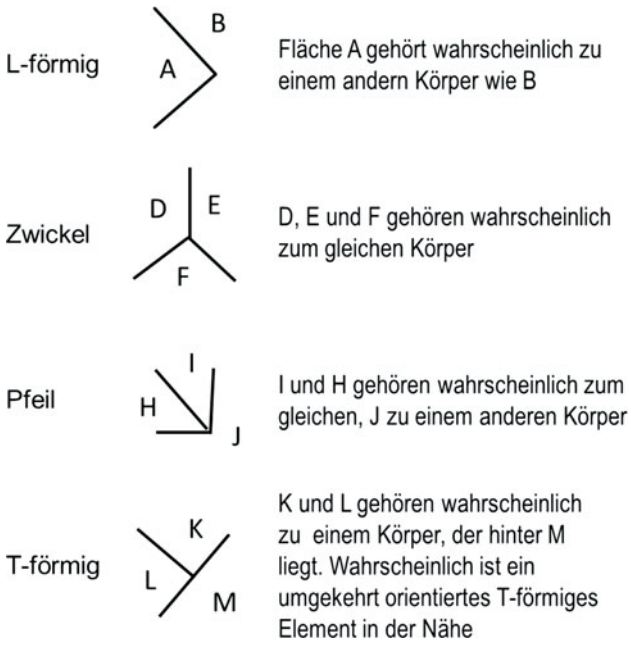


Abb. 3.34 Typische Winkelkonfigurationen und ihre Interpretation

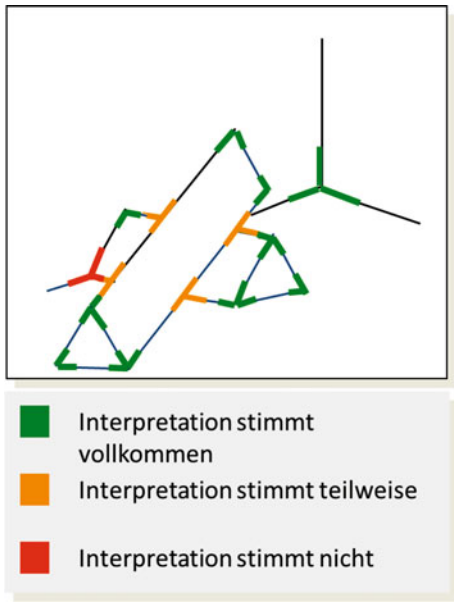


Abb. 3.35 Beispiel für die Anwendung typischer Winkelkonfigurationen

eine eigene Empfindungsqualität der Modalität „Sehen" dar. Die eigentliche Bewegungswahrnehmung erfolgt mit Hilfe „bewegungsspezifischer" Neuronensysteme. Nach Rock (1968) kann man die optische Wahrnehmung von Bewegung gut verstehen, wenn man das Wirken folgender Prinzipien annimmt:

- Die Augen nehmen niemals den individuellen Bewegungsverlauf von Abbildungen auf der Retina wahr, sondern immer mathematische Komponenten davon. Das Prinzip für die Bewegungswahrnehmung ist, dass gleiche Komponenten eine feste Einheit bilden und auf diese Weise von divergierenden Komponenten unterschieden werden.
- Wenn nach dem Aussondern fester Einheiten aus dem Bildfeld auf der Retina Bewegungsvektoren übrig bleiben, werden neue feste Einheiten höherer Ordnung gebildet. Diese neuen Einheiten werden in Relativbewegungen zu den vorher gebildeten Einheiten wahrgenommen.

Helmholz (1866) führte erstmals den Begriff der Bewegungsparallaxe (engl. motion parallax) ein. Sie beschreibt nach seiner Definition die perspektivische Verschiebung entfernter Objekte in unterschiedlicher Tiefe als Folge einer veränderten Beobachterposition. Nach Helmholtz (1910) enthält die Bewegungsparallaxe Informationen über die Entfernung zwischen Beobachter und Objekt. Das gilt sowohl für den Fall, dass sich der Beobachter auf

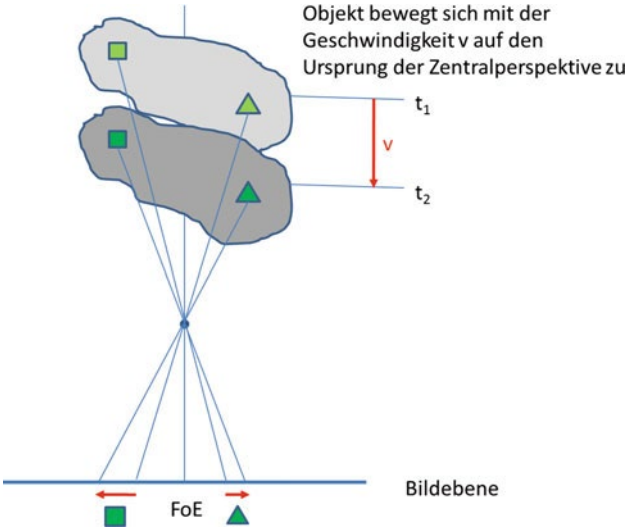


Abb. 3.36 Bewegungsparallaxe: Objektpunkte unterschiedlicher Entfernung zum Beobachter, die sich alle mit gleicher Geschwindigkeit bewegen, erzeugen auf dem Augenhintergrund Bilder mit unterschiedlicher Geschwindigkeit, aus denen Rückschlüsse auf die Entfernung gezogen werden können. Ein singulärer Punkt (Fokus of Expansion, FoE) entsteht an der Stelle der geradlinigen Verbindung zwischen dem Fokus der Zentralperspektive und dem Punkt, auf den zu die Bewegung erfolgt

die Gegenstände zubewegt (siehe Abb. 3.36) als auch für den Fall, dass er sich an den Gegenständen vorbei bewegt (Abb. 3.37).

3.2.2.2 Der optische Fluss

Gibson erweiterte 1958 die Helmholtzsche Definition der Bewegungsparallaxe und stellte seine Theorie der visuellen Kontrolle der Fortbewegung (Lokomotion) mittels des optischen Flusses vor. Optischer Fluss ist das expandierende oder kontrahierende auf die Bildebene projizierte visuelle Feld auf der Retina, das durch die Eigenbewegung des Beobachters hervorgerufen wird (Gibson 1950). Als visuelles Feld wird hier die Darstellung der Geschwindigkeitsvektoren aller sichtbaren Objekte der visuellen Szene verstanden. Anders formuliert ist der optische Fluss die Transformation der Oberflächen der umgebenden optischen Anordnung („optic array“) während der Fortbewegung (Gibson 1966) bzw. der Gradient der Fortbewegung (Goldstein 2002). Optischer Fluss ist damit die auf die Bildebene projizierte Relativbewegung zwischen dem Beobachter und den sichtbaren Raumpunkten (Chatziastros 2003). In der Literatur findet sich eine Vielzahl verschiedener Definitionen des optischen Flusses, die lediglich mit anderen Formulierungen das von Gibson beobachtete Phänomen wiedergeben. Die vorliegende Abhandlung stützt sich auf die Formulierungen von Gibson (Gibson 1950; Gibson 1966) und Goldstein (Goldstein 2002).

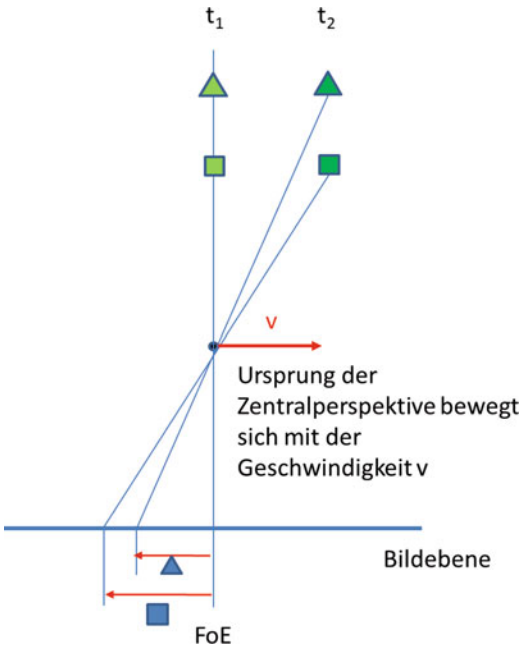


Abb. 3.37 Bewegungsparallaxe: Der Beobachter bewegt sich mit einer Geschwindigkeit v an Gegenständen unterschiedlicher Entfernung vorbei (wie z. B. beim Blick aus dem Fenster eines fahrenden Zuges). Je weiter entfernt die beobachten Gegenstände sind, umso weniger bewegen sie sich. Der Blick auf einen Punkt am Horizont zeigt dort überhaupt keine Bewegung (Fokus of Expansion, FoE)

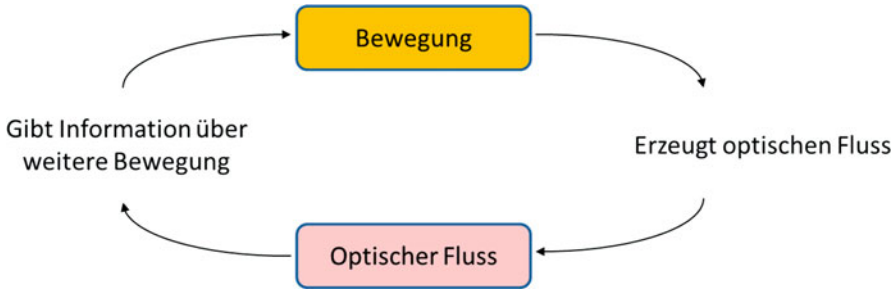


Abb. 3.38 Reziproke Wechselbeziehung zwischen der Fortbewegung und dem optischen Fluss. Die Fortbewegung erzeugt einen optischen Fluss, der wiederum Informationen über die Fortbewegung liefert und so die Bewegung steuert. Dies stellt ein wichtiges Prinzip für unsere Interaktion mit der Umwelt dar (vgl. Goldstein 2002)

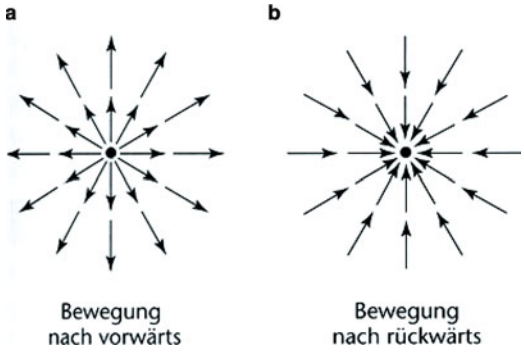


Abb. 3.39 Optischer Fluss (**a**) bei einer Vorwärtsbewegung und (**b**) bei einer Rückwärtsbewegung (vgl. Goldstein 2002)

Der optische Fluss charakterisiert die Gesamtheit der optischen Veränderungen der visuellen Szene (Chatziastros 2003) und stellt die Verallgemeinerung der Bewegungsparallaxe zwischen wenigen Objekten auf alle Objekte des visuellen Felds dar.

Wie bereits oben beschrieben, handelt es sich beim optischen Fluss um eine durch die Bewegung des Beobachters produzierte Information. Zwischen der Fortbewegung eines Beobachters und dem optischen Fluss besteht eine reziproke Wechselbeziehung (Goldstein 2002). Der optische Fluss wird durch die Eigenbewegung des Beobachters erzeugt und liefert dem Beobachter Informationen, die ihm dabei helfen, seine weitere Bewegung zu kontrollieren und zu steuern. Abbildung 3.38 veranschaulicht diese Beziehung: Bewegung ist die Voraussetzung der Wahrnehmung des optischen Flusses und deren Wahrnehmung ist die Grundlage der Erfahrung einer Bewegung. Es wird in diesem Zusammenhang auf die Diskussion in Verbindung mit der Abb. 3.5 und der im Folgenden noch zu besprechenden Abb. 3.47 bzw. 3.48 verwiesen, die die Rückkopplung des internen Informationsflusses von der Informationsaufnahme zur Informationsumsetzung über die Außenwelt zum Gegenstand haben.

Abbildung 3.39 zeigt den bei einer einfachen Bewegungssituation entstehenden optischen Fluss, der sich aus den Helmholtzschen Überlegungen zur Bewegungsparallaxe der Abb. 3.36 ableiten lässt. Die Punkte repräsentieren einzelne Elemente der Umwelt, die Linien beschreiben ihre Bewegungsrichtung und über die Länge auch die Geschwindigkeit der Elemente. Im Zentralpunkt des optischen Flusses ist weder eine Bewegung noch eine Bewegungsparallaxe sichtbar (Warren et al. 2001). Dieser Punkt wird daher als Focus of Expansion (FoE) oder „singulärer Punkt“ des Flussbilds bezeichnet. Wegen der Tatsache, dass Bewegung optisch nur wahrgenommen werden kann, wenn die Geschwindigkeit der Lichtreize auf den Augenhintergrund einen Wert von ca. 2‘/s (Lindsay und Norman 1972) überschreiten, ist der FoE tatsächlich ein Feld, das umso kleiner ist, je schneller man sich bewegt[38]. Weiterhin ist der FoE der Punkt bzw. das Feld, aus dem die Geschwindigkeitsvektoren des Flussbilds radial zu expandieren scheinen, wenn man sich auf den FoE zubewegt, bzw. in dem diese zusammenlaufen, wenn man sich von ihm wegbewegt. Der FoE gibt also bei einer geradlinigen Bewegung die Bewegungsrichtung des Beobachters an (Gibson 1950; Wann u. Wilkie 2004; siehe auch Abb. 3.36)

38 Dieser Aspekt spielt im Zusammenhang mit der Frage, auf welche Weise man Über- und Untersteuersteuern wahrnehmen kann, eine wichtige Rolle (siehe Abschn. 6.4).

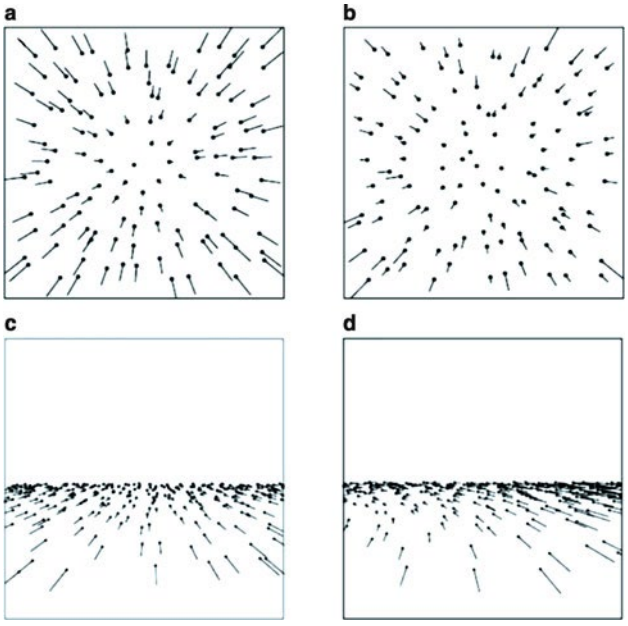


Abb. 3.40 Optischer Fluss in der Bildebene **a** beim Fahren senkrecht auf eine Wand, **b** durch ein Punktevolumen, **c** bei einer Geradeausfahrt, **d** bei einer Kurvenfahrt (nach Chatziastros 2003)

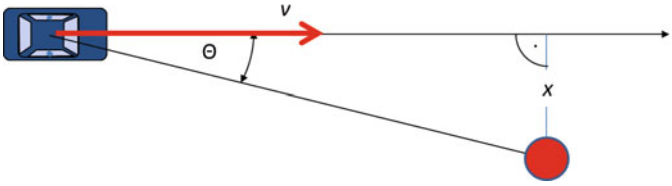


Abb. 3.41 Die Winkelgeschwindigkeit eines Objekts wird bestimmt durch die Vorwärtsgeschwindigkeit v eines Beobachters, dem Passierabstand x und der Exzentrizität Θ des Objekts (vgl. Chatziastros 2003).

Eigenbewegungen eines Beobachters können in eine translatorische und eine rotatorische Komponente zerlegt werden (siehe auch Abb. 3.40).

Die Geschwindigkeit der einzelnen Elemente und damit die Länge der Vektoren des translatorischen Flussbilds hängen vom Abstand der Umweltelemente zum Beobachter ab. Bei einer linearen Translation ist die Winkelgeschwindigkeit der Elemente im optischen Fluss durch folgende Beziehung bestimmt:

$$\frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}t} = (\sin\Theta)^2 \cdot \frac{v}{x}$$

Dabei ist v die Vorwärtsgeschwindigkeit des Beobachters, x der Abstand des Elements senkrecht zur Bewegungsrichtung und Θ der Winkel zwischen der Bewegungsrichtung und der Richtung zum Element der visuellen Szene (siehe Abb. 3.41). Je geringer der Abstand der Elemente vom Beobachter bzw. je größer die Vorwärtsgeschwindigkeit, desto höher ist die Geschwindigkeit im optischen Fluss.

Für die Wahrnehmung dieser Geschwindigkeit gibt es jedoch eine Grenze, die dadurch zustande kommt, dass zwei oder mehrere Vektoren auf dem Augenhintergrund hintereinander in so kurzem Abstand gereizt werden, dass das Objekt verschwommen erscheint (Schierz 2001). Das kann so weit gehen, dass das Objekt gar nicht mehr wahrgenommen wird (z. B. ein fliegendes Projektil oder auch ein Insekt in entsprechender Entfernung).

Abbildung 3.42 zeigt den Verlauf der dynamischen Sehschärfe in Abhängigkeit von der Winkelgeschwindigkeit, mit der sich das Objekt auf dem Augenhintergrund abbildet. Dieser Effekt spielt beim Autofahren hauptsächlich im peripheren Sichtfeld eine Rolle.

Eine weitere Grenze ist dadurch gegeben, dass Objekte, die sich mit einer Winkelgeschwindigkeit niedriger als 2′/s auf den Augenhintergrund abbilden, nicht mehr als bewegt wahrgenommen werden. Bei einer Augenhöhe von 1,2 m über der Fahrbahn liegt bei Geradeausfahrt dieser Wert bei einer Geschwin-

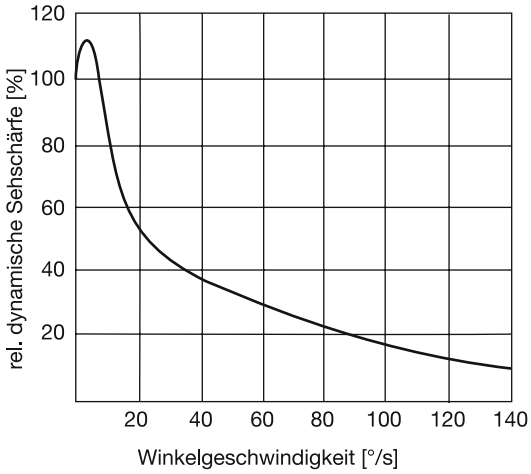


Abb. 3.42 Relative dynamische Sehschärfe in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit (Winkelgeschwindigkeit eines Objektes (Schierz 2001))

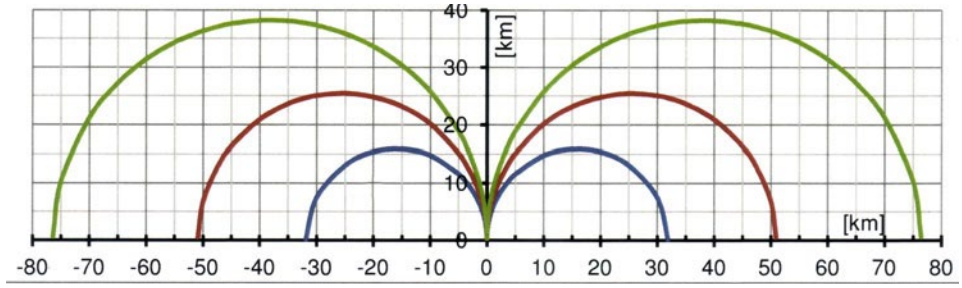


Abb. 3.43 Grenzlinien der zur optischen Ruhe im gesamten Gesichtsfeld des Fahrers für eine Geradeausfahrt mit den Geschwindigkeiten 50 km/h (*blau*), 80 (*rot*) und 120 km/h (*grün*) (nach Remlinger 2013). In dem Bereich außerhalb der jeweiligen Linien würde keine Bewegung wahrgenommen werden (Das ist übrigens der Grund, warum man bei der Zufahrt auf ein weit entferntes Gebirge über eine lange Periode hinweg nicht den Eindruck hat, sich diesem Gebirge zu nähern. Dieser Effekt wird auch bei der Konzeption von Fahrsimulatorbildern genutzt)

digkeit von 50 km/h bei ca. 75 m vor dem Fahrer. Bei 100 km/h ist er bei 150 m und bei 200 km/h ca. 300 m entfernt (die Augenhöhe über der Fahrbahn spielen für diese Werte übrigens eine marginale Rolle). Allerdings gelten diese Werte nur für den unmittelbar in Fahrtrichtung befindlichen Punkt. Wie Remlinger (2013) zeigt, stellen diese Werte die Spitze von kreisförmig Grenzlinien dar, die sich bis in den Kilometerbereich erstrecken (siehe Abb. 3.43). Diese Grenze zur optischen Ruhe ist selbst bei innerstädtischen Geschwindigkeiten so weit entfernt, so dass sie im Straßenverkehr keine Rolle spielt. Allerdings ist sie, wie in ▶ Abschn. 6.4.1.3 gezeigt wird, von Bedeutung für die Wahrnehmung querdynamischer Eigenschaften des Fahrzeugs, insbesondere des Über- bzw. Untersteuern.

Das Flussfeld, das durch eine rotatorische Bewegung – beispielsweise eine rotatorische Kopfbewegung – erzeugt wird, besteht aus parallelen Geschwindigkeitsvektoren, die alle in die gleiche Richtung zeigen. Das rotatorische Flussfeld beinhaltet damit keinen FoE. Die Länge der Flussvektoren beim rotatorischen Flussfeld ist vom Abstand der Elemente zum Beobachter unabhängig. Aus diesem Grund liefert das rotatorische Flussfeld, im Gegensatz zum translatorischen Flussfeld, keine Informationen über die Bewegung des Beobachters. Das darf nicht verwechselt werden mit der Bewegungsparalaxe, die beim Blick unter einem Winkel zur Bewegungsrichtung entsteht (siehe Abb. 3.37).

Eigenbewegungen des Auges, beispielsweise hervorgerufen durch eine Blickfolgebewegung oder eine Kopfbewegung, erzeugen ebenfalls ein rotatorisches Flussfeld (siehe Abb. 3.45b). Dieses

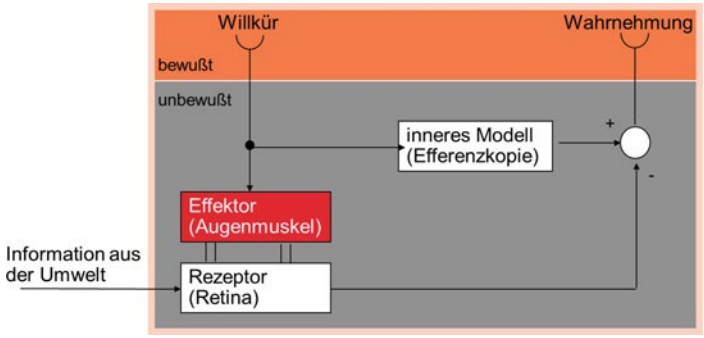


Abb. 3.44 Reafferenzprinzip (nach von Holst 1957)

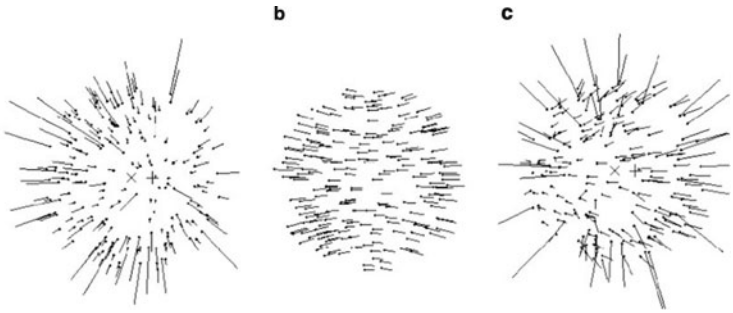


Abb. 3.45 Entstehung von retinalem Fluss (**c**) als Summe des Flussfelds einer translatorischen Vorwärtsbewegung (**a**) und dem Flussfeld einer Eigenbewegung des Auges (**b**) (Lappe 2009)

wird jedoch nach dem im Folgenden beschriebenen Reafferenzprinzip von von Holst (1957), das einige Konstanzleistungen der Wahrnehmung erklärt, von der Bewegung des gesamten Körpers getrennt. Bei der *Richtungskonstanz* ist nämlich zu fragen, wodurch es kommt, dass bei einer Drehung des Augapfels nach rechts keine subjektive Verschiebung der Umwelt festgestellt wird, obwohl sich das Bild auf der Retina durch diese Bewegung nach links verschiebt. Nach dem Reafferenzprinzip wird dieser Effekt dadurch geklärt, dass bei jeder Willkürbewegung ein inneres Modell über den Erfolg dieser Handlung existiert (Efferenzkopie, siehe Abb. 3.44). Bei einer Eigeninitiierung der Augenbewegung nach rechts wird also erwartet, dass sich das Bild nach links verschiebt. Verschiebt es sich wirklich nach links, so heben sich tatsächliche Bewegung und erwartete Bewegung gegenseitig auf, und die Umwelt wird als ruhend angenommen. Verschiebt sich das Bild ohne die adäquate Willkürbewegung, so wird die Verschiebung auch als objektive Tatsache wahrgenommen, wie man sich leicht überzeugen kann, indem man von außen mit der Fingerkuppe den Augapfel leicht verdreht. Der Vergleich zwischen der Afferenz des Sinnesorgans und dem aufgebauten Bild im Gehirn ist ein unbewusster Prozess. Erst nach einer Abweichung wird der Vorgang bewusst.

Das resultierende Flussfeld aus einer translatorischen Bewegung und einer Augenbewegung, aus einer translatorischen und einer rotatorischen Bewegung oder aus der Kombination aller drei Bewegungen unterscheidet sich der Form nach nicht. In allen drei Fällen entsteht ein komplexes Flussfeld (siehe Abb. 3.45c). Da der optische Fluss in diesem Fall aber nur auf der Retina auftritt, spricht man von retinalem Fluss.

Aus einem translatorischen Flussfeld kann der Mensch relativ einfach Informationen ableiten, da er es ohne großen Aufwand verarbeiten kann. Die Addition eines rotatorischen Flussfelds, sei es dass dies das Resultat einer Eigenbewegung des Auges oder einer rotatorischen Bewegung ist, verändert die Struktur und das Aussehen des Flussfelds signifikant. Dadurch erhöht sich ebenfalls der Aufwand, der zur Verarbeitung und zur Informationsaufnahme aus dem Flussfeld nötig ist. Der Mensch lernt im Laufe des Heranwachsens mittels des von Holtschen Reafferenzprinzips die Eigeninitiation von der durch „Fremdeinwirkung“ verursachten

Bewegung zu trennen. Dies bedeutet: er ist in der Lage, die Auswirkungen auf das retinale Flussfeld durch die Bewegung des Auges im Kopf oder einer Gesamtbewegung des Kopfes selbst oder sogar eine eigene initiierte Drehbewegung des gesamten Körpers zu filtern und die nötigen Informationen zu verwenden.

Nachdem die Rezeptorzellen auf dem Augenhintergrund in den verschiedenen Augenregionen in unterschiedlicher Weise zu komplexen und hyperkomplexen Zellen zusammengeschaltet sind (z. B. in der fovea centralis bevorzugt zu Kanten- und Winkeldetektoren, in der Augenperipherie zu Bewegungsdetektoren) ist es daher für die Wahrnehmung entscheidend, auf welchem Teil der Netzhaut Information aus dem optischen Fluss auftrifft und verarbeitet wird.

Das periphere oder indirekte Sehen beschreibt einen Teilbereich der visuellen menschlichen Wahrnehmung. Im Gegensatz zum fovealen Sehen, bei dem das Auge exakt auf einen bestimmten Fixationspunkt gerichtet sein muss, um die maximale Sehschärfe auszunutzen, liefert das periphere Sehen grobe, unscharfe und optisch verzerrte Seheindrücke außerhalb des Fixationspunktes (Goldstein 2002). Das periphere System deckt mehr als 999‰ des Gesichtsfelds ab. Zur Verarbeitung der Informationen stehen dem peripheren System aber lediglich 50 % des Sehnervs und 50 % der Fläche des corticalen Sehzentrums zur Verfügung. Die restlichen 50 % sind für das hoch auflösende, aber sehr langsame foveale System reserviert. Aufgrund des ungleichen Verhältnisses von abgedecktem Gesichtsfeld und zur Verfügung stehenden Ressourcen der Informationsverarbeitung zwischen fovealem und peripherem Sehen unterscheiden sich die Eigenschaften der beiden Arten der Wahrnehmung. Ausgegend von der zentralen Sehgrube nehmen zum peripheren Sichtfeld hin die Sehschärfe, die Farbwahrnehmung, die Empfindlichkeit für Lichtreize und die Wahrnehmung von Kontrasten zunehmend ab, während die dynamische Empfindlichkeit, das zeitliche Auflösungsvermögen, die Wahrnehmung von hell und dunkel sowie die Wahrnehmung von Bewegung und Orientierung im Raum deutlich zunehmen (Goldstein 2002).

3.2.2.3 Menschliches Gedächtnis

Ohne Gedächtnis ist keine Informationsverarbeitung möglich. Es ist deshalb für das Verständnis der Informationsverarbeitung ein genaueres Bild des Arbeitsprinzips des Gedächtnisses notwendig. Es kann grob zwischen dem sensorischen, dem Kurzzeit- und dem Langzeit-Gedächtnis unterschieden werden. Das sensorische Gedächtnis stellt das Nachklingen der Sinneszellen und der mit ihnen verbundenen komplexen und hyperkomplexen Zellen dar. Deshalb entspricht seine Kapazität der der Gesamtheit der Sinnesorgane. Die Behaltenszeit ist nicht mehr als 200 Millisekunden. Die Prozesse des Kurzzeit- und des Langzeit-Gedächtnisse sind sehr komplex und nur teilweise verstanden. Nur ein sehr vereinfachtes Modell davon soll hier besprochen werden. Es ist jedoch ausführlich genug, um die Prinzipien der Informationsverarbeitung zu verstehen, die während des Autofahrens ablaufen. Abbildung 3.46 liefert eine Grundlage zum erleichterten Verständnis dieses Modell. Information, die von den Sinnesorganen aufgenommen wird und die durch die komplexen und hyperkomplexen Zellen vorausselektiert wird („sensorisches Gedächtnis“) stimuliert (in Wirklichkeit eine riesige Anzahl von) Neuron-Zellen, die über verschiedene Bereiche des Gehirns verteilt sein können.

Es kann vorkommen, dass einige von ihnen zu einem Kreis geschlossen sind. Solch ein Kreis stellt das aktive Gedächtnis dar (Palm 1990). So lange eine Zelle die jeweils nächste stimuliert, ist die Information, die durch diesen spezifischen Kreis dargestellt wird, aktiv. Dieser Zustand bleibt zwischen 3 bis zu 15 s erhalten. Er stellt unser aktives Bewusstsein dar. Im Allgemeinen wird er Kurzzeit-, Arbeits- oder primäres Gedächtnis genannt. Durch die wiederholte Anregung von Außeninformation – empfangen durch die Sinnesorgane – oder auch durch innere Anregung werden die Verbindungen auf den Synapsen allmählich verändert. So werden bestimmte Kreise, die diesen wiederholten Inhalt darstellen, gegenüber anderen Neuron-Verbindungen bevorzugt. Ein strukturelles Engramm wird erzeugt. Wenn diese Kreise durch eine entsprechende äußerliche oder innere (z. B. durch aktives Reflektieren) Stimulus-Konfiguration angeregt werden, wird die ehemalige Erfahrung wieder „erinnert“. Man nennt dieses strukturelle Engramm „Langzeit-

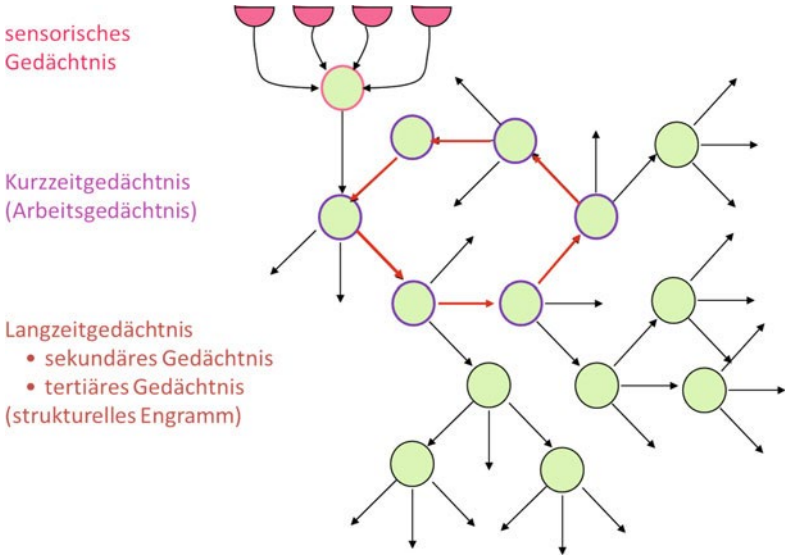


Abb. 3.46 Prinzip des menschlichen Gedächtnisses

gedächtnis". Mit der Zeit können diese Engramme verblassen oder verschüttet werden. Wir nennen diese Art des Langzeitgedächtnisses „sekundäres Gedächtnis". Seine Behaltenszeit kann zwischen einer halben Minute und Jahren liegen. Jedoch gibt es auch Inhalte, die nie vergessen werden. Der eigene Name, die Fähigkeit, zu laufen, Fahrrad zu fahren oder zu schwimmen, gehört zu dieser Art von Gedächtnis. Diesen Teil des Langzeitgedächtnisses nennt man „tertiäres Gedächtnis". Für den Übergang vom primären Gedächtnis zum sekundären Gedächtnis spielt neben der Wiederholung auch die Motivation eine wichtige Rolle. Sie wird vor allem durch die Gehirngebiete Hippocampus und das Limbische System kontrolliert.

Besonders im Zusammenhang mit den dynamischen Eigenschaften eines Automobils ist die Reaktionszeit der menschlichen Informationsverarbeitung wichtig. Durch Trackingexperimente und die Modellierung menschlicher Eigenschaften mittels regelungstechnischer Methoden (hier soll besonders die Forschung von McRuer und seinen Mitarbeitern erwähnt werden; siehe Literaturindex) ist bekannt, dass im Fall von unbewusstem, so genanntem fertigkeitsbasiertem Verhalten (Rasmussen 1987) die Reaktionszeit im Bereich von 200 Millisekunden liegt. Wenn man jedoch die Wechselwirkung Fahrer – Fahrzeug verstehen will, ist nicht nur diese Reaktionszeit wichtig, sondern auch der subjektive Zeitraum, innerhalb dessen der Fahrer seine Handlungsaktivitäten ableitet.

3.2.2.4 Innere Modelle

Wie aus den vorangegangenen Abschnitten schon hervorgeht, ist die Kategorisierung in Informationsaufnahme und -verarbeitung in gewisser Weise willkürlich. So werden wesentliche Elemente der Informationsverarbeitung durch das von Holst'sche Prinzip in gleicherweise beschrieben wie Aspekte der Informationsaufnahme. Der Unterschied ist nur, dass durch einen langwierigen mit Lebensbeginn einsetzenden Lernprozess immer komplexere für bestimmte Situationen adäquate Efferenzkopien gebildet werden, die nunmehr als „innere Modelle" bezeichnet werden. In Abb. 3.47 ist die Darstellung der Abb. 3.44 um das Modell M_B erweitert worden. Ansonsten liegt dort der gleiche Sachverhalt vor wie bei dem einfachen Reafferenzprinzip. Das soll folgendes Beispiel des Befahrens einer Kurve veranschaulichen: Es ist nämlich keineswegs selbstverständlich für eine kommende Rechtskurve genau zu wissen, wie viel Lenkradeinschlag notwendig ist, um die Fahraufgabe adäquat zu lösen. Aufgrund eines komplizierten, hier nicht zu beschreibenden Lernprozesses hat sich der Fahrer eines Kraftfahrzeuges ein inneres Modell M_A gebildet, wie sein Fahrzeug auf Lenkbewegungen und Gaspedalbewegungen reagiert. Zudem besitzt er ein weiteres

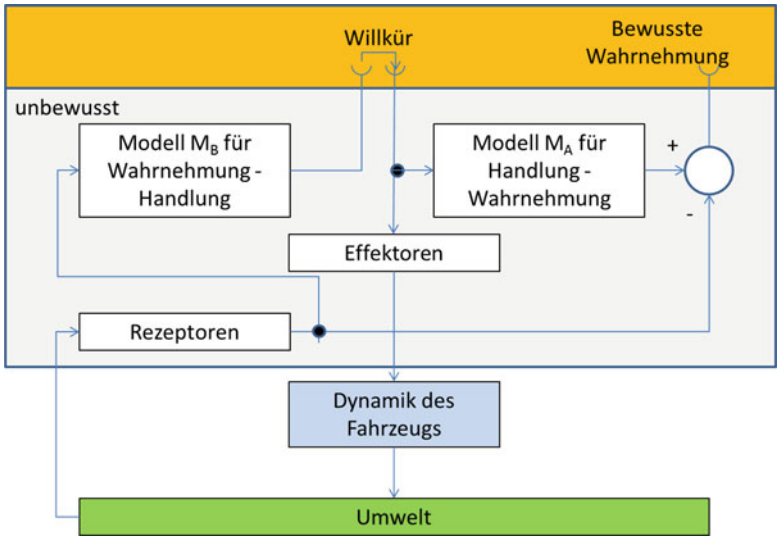


Abb. 3.47 Verhaltensstruktur hochgeübter Tätigkeiten am Beispiel des Kraftfahrzeugfahren

inneres Modell M_B, das ihm sagt, welche Eingriffe er bei gegebener Verkehrssituation vorzunehmen hat. Über seine Rezeptoren, insbesondere die Augen, aber auch über den akustischen, kinästhetischen und haptischen Kanal nimmt er die gegebene Situation auf und leitet daraus eine durch das Modell M_B gegebene Handlungssequenz ab. (Das Modell M_B kann nur für einfache Situationen Handlungssequenzen folgern, wie sie z. B. das Nachfahren eines Straßenverlaufs darstellt; in komplizierteren Fällen werden Entscheidungen notwendig; siehe ▶ Abschn. 3.2.2.5) Aufgrund dieser Handlungssequenz hat er mit Hilfe des Modelles M_A eine Erwartung von der Änderung der Information über die Außenwelt. Stimmt diese Änderung mit der tatsächlichen überein, so bleibt normalerweise der ganze Vorgang unbewusst. Erst eine Abweichung zwischen Modellvorstellung und Rückmeldung aus der Umwelt (wenn z. B. das Lenkverhalten des Fahrzeugs auf glatter Straße ganz anders ist als gewohnt) dringt in das Bewusstsein und macht Entscheidungsvorgänge notwendig, die evtl. motorische Prozesse auswählen, die in dem ursprünglich verwendeten Modell M_A nicht enthalten waren (siehe ▶ Abschn. 3.2.2.5).

Ein wesentlicher Gesichtspunkt des Arbeitens nach einem inneren Modell ist darin zu sehen, dass die für diesen Vorgang notwendige Zeit abgeschätzt werden kann. Sie liegt im Bereich der bereits erwähnten physiologischen Reaktionszeit von ca. 200 ms. Ein weiterer Gesichtspunkt liegt darin, dass äußere Reizkonfigurationen (Informationsaufnahme) durchaus „unscharf" bestimmte innere Modelle erregen können. Dieser Effekt hängt unter anderem mit den verschiedenen Graden der Zugehörigkeit von wahrgenommenen Reizkonfigurationen zu Mengen und Obermengen in der jeweiligen mentalen Repräsentation zusammen. Dieser „Ähnlichkeitseffekt" kann die Ursache von Fehlern sein, indem für die Situation inadäquate Handlungen abgeleitet werden.

3.2.2.5 Entscheidungsmechanismus

Eine Abweichung zwischen der durch das Modell M_A festgelegten Erwartung und den von den Rezeptoren aufgenommenen Eindrücken der realen Außenwelt dringt in das Bewusstsein und macht gegebenenfalls eine Entscheidung für eine Handlung notwendig, die ebenfalls durch die gegebene Reizkonfiguration (Ähnlichkeitseffekt) möglich erscheint. Damit ist eine Erweiterung des in Abb. 3.47 wiedergegebenen Modells der Informationsverarbeitung notwendig, wie sie in Abb. 3.48 dargestellt ist. Wesentlicher Bestandteil dieses erweiterten Modells ist der Entscheidungsmechanismus, dessen Funktion darin besteht, aus der Vielzahl von inneren Modellen das für den jeweiligen Augenblick günstigste Modell auszuwählen. Er entspricht dem angesprochenen Arbeitsgedächtnis (= Kurzzeitgedächtnis) und ist somit dessen Beschränkungen (siehe unten) unterworfen.

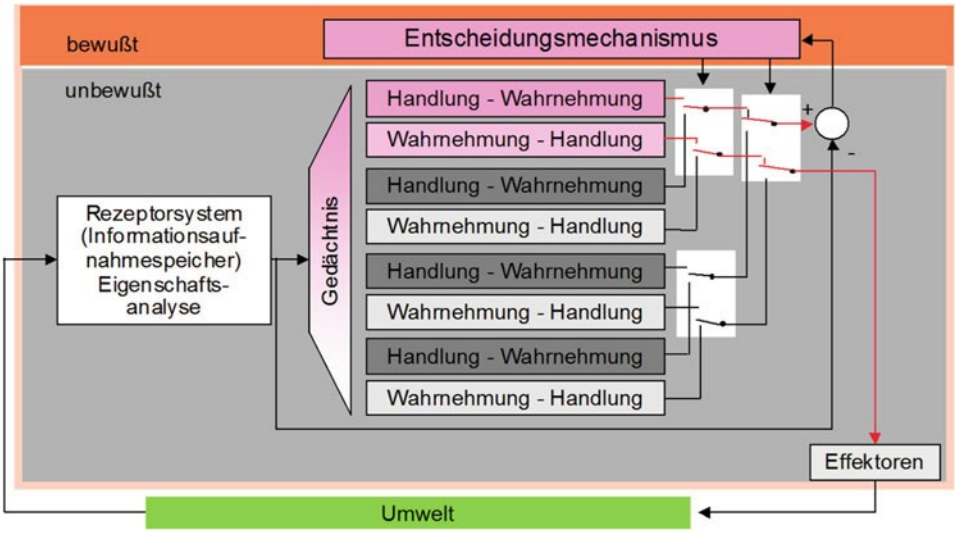


Abb. 3.48 Modell menschlicher Informationsverarbeitung

Wie ist dieser Vorgang genauer zu beschreiben? Die Handlung bleibt unbewusst, so lange die erwartete Information hinreichend mit der beobachteten übereinstimmt. So können wir in bestimmten Situationen ohne Anstrengung autofahren und gleichzeitig zusätzliche Handlungen ausführen, wie z. B. Sprechen mit den Mitfahrern, Telefonieren und Radio-hören. Nur wenn eine bedeutende Abweichung der beobachteten Information von der erwarteten wahrgenommen wird, kommt dies zu Bewusstsein (In unserem Beispiel würde das geschehen, wenn das Auto plötzlich auf Glatteis kommt). Nun müssen wir den aktiven Teil unseres Gehirns benutzend, nach einer Alternative suchen. Wir suchen in unserem Gehirn nach anderen Handlungs-Wahrnehmungs-Modellen, die ein besseres Ergebnis versprechen. Wenn wir ein solches Modell gefunden haben, leiten wir die entsprechende Handlung zu den Effektoren, durch welche diese Handlung dann realisiert wird. Es ist offensichtlich, dass dieses Verfahren Zeit braucht (im Fall unseres Beispiels kann das Auto bereits in den Graben gefahren sein, bis die bessere Handlung gefunden wurde). Dieses Suchen hat noch eine weitere Beschränkung, wie es in vielen psychologischen Experimenten gefunden wurde. Miller et al. (1956) fand erstmals, dass wir nur bis zu 7 ± 2 sog. chunks, die mit den Handlungs-Wahrnehmungs- – Wahrnehmungs-Handlungs-Paaren identisch sind, gegeneinander abwägen können. Wir nennen diese chunks auch „psychologische Einheiten", „Repräsentationseinheiten" oder „innere Modelle". Diese Ausdrücke sind absichtlich ein wenig diffus, da diese chunks selbst wieder nicht ganz scharf sind. Durch Übung und Erfahrung können immer komplexere psychologische Einheiten gebildet werden, die auch in schwierigen Situationen ein sicheres und eindeutiges Handeln ermöglichen. Beispielsweise macht dies den Unterschied zwischen einem erfahrenen Fahrer und einem Anfänger aus (es sei hier auf den im Zusammenhang mit den Springbildern schon erwähnten „Zwang" des Organismus hingewiesen, sich für *eine* Handlung zu entscheiden). Das kann auch aus dem Verlauf der Unfallzahlen in Abhängigkeit von der Zeit abgeleitet werden. Sie zeigen, dass im Durchschnitt erst ca. 7 Jahre nach dem Führerscheinerwerb ein niedriges stabiles Niveau erreicht wird (sog. „Anfängerrisiko"). Diese Zeit scheint notwendig zu sein, bis genug Erfahrung gesammelt wurde, so dass für (fast) jede Situation eine richtige Erwartung des wahrscheinlichen Verlaufs verfügbar ist. Wie die Untersuchung von Maycock et al. (1991; siehe Abb. 3.49) zeigt, ist dieser Effekt unabhängig vom Alter, in dem die Fahrerlaubnis erworben wurde. Allerdings kommt für junge (bevorzugt männliche!) Fahranfänger noch eine gewisse jugendliche Unbekümmertheit und womöglich auch unkontrolliertes Imponiergehabe dazu (sog. „Jugendlichkeits-Risiko").

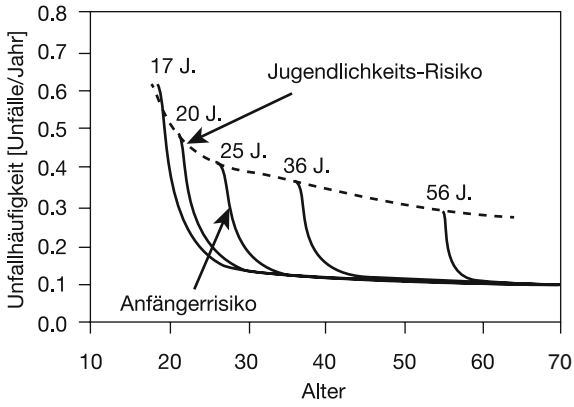


Abb. 3.49 Jugendlichkeits- und Anfängerrisiko (nach Maycock et al. 1991)

Wie oben bereits dargestellt, können die inneren Modelle in zwei Hauptteile unterschieden werden. Der eine Teil enthält die Verknüpfung von Wahrnehmungskonfiguration und den sich daraus ableitenden motorischen Handlungen (Wahrnehmungs-Handlungs-Modell). Der andere Teil enthält die Vorstellung über die erwartete Wahrnehmungskonfiguration aufgrund dieser Handlung (Handlungs-Wahrnehmungs-Modell). Über den Entscheidungsmechanismus kann eines dieser Modellpaare ausgewählt werden, was symbolhaft in Abb. 3.48 durch Schalter angedeutet ist. In der Entscheidungssituation, wenn also noch nicht festgelegt ist, welchem Modell der Vorzug zu geben ist, sind in der modellhaften Wiedergabe der Abb. 3.48 die parallelen Schalter für Wahrnehmungs-Handlungs- und Handlungs-Wahrnehmungs-Modell aufgetrennt. Der Entscheidungsmechanismus wählt nun („in Gedanken") sequentiell jedes in Frage kommende Handlungs-Wahrnehmungs-Modell aus und prüft aufgrund der erwarteten Wahrnehmung die Größe des subjektiven Nutzens. Für die Handlung wird dann das Modell ausgewählt, das unter den gegebenen Umständen (Kontext) den größten subjektiven Nutzen verspricht. In der modellhaften Darstellung der Abb. 3.48 werden nun sowohl die Schalter auf das ausgewählte Handlungs-Wahrnehmungs-Modell als auch auf das zugehörige Wahrnehmungs-Handlungs-Modell gelegt. Nun ist der Weg frei für die Innervation der Effektoren (Muskulatur), die entsprechend dem ausgewählten Modell mit einem Bewegungsprogramm versorgt werden. Durch die Wirkung der Effektoren ändert sich die Konfiguration der Umweltreize, was von den Rezeptoren aufgenommen und an eine Vergleichsstelle gemeldet wird, die diese Rückmeldung mit der Erwartung des Handlungs-Wahrnehmungs-Modells vergleicht. Hat die Handlung zum Erfolg geführt, zeigt sich in der Vergleichsstelle also keine Differenz, so wird bei mehrmaliger Wiederholung das ausgewählte Modellpaar als besonders passend für die entsprechende Reizkonfiguration gespeichert, d. h. die jeweilige „Schalterstellung" wird als neues, d. h. erlerntes, übergeordnetes Handlungs-Wahrnehmungs-Modell in das Gedächtnis übernommen. Abweichungen an der Vergleichsstelle werden bewusst wahrgenommen und beeinflussen den Entscheidungsmechanismus in der Weise, dass bei Überschreitung einer individuellen Grenze die Entscheidungsstruktur geändert wird, was sich in einer neuen Schalterkombination darstellen lässt. Zeigt sich in bestimmten Situationen immer wieder die Entscheidung für dieselbe Handlung als nützlich, so wird diese zusammen mit der entsprechenden Situation als ein neues quasi übergeordnetes inneres Modell gelernt.

In vielen Fällen wird eine Entscheidung zwischen mehreren möglichen Handlungen allein dadurch notwendig, dass in Abhängigkeit einer Abschätzung der äußeren Umstände (Kontext, sog. „Zustände der Welt",) verschiedene Ereignisse zu erwarten sind. Der menschliche Organismus ist offensichtlich im Bereich der täglichen Lebenserfahrung recht gut in der Lage, objektive Wahrscheinlichkeiten von Ereignissen aufgrund einer Beobachtung der Häufigkeit von Ereignissen zu schätzen (Sheridan und Ferrell 1974). Der erwartete subjektive Nutzen setzt sich also aus der subjektiven Schätzung

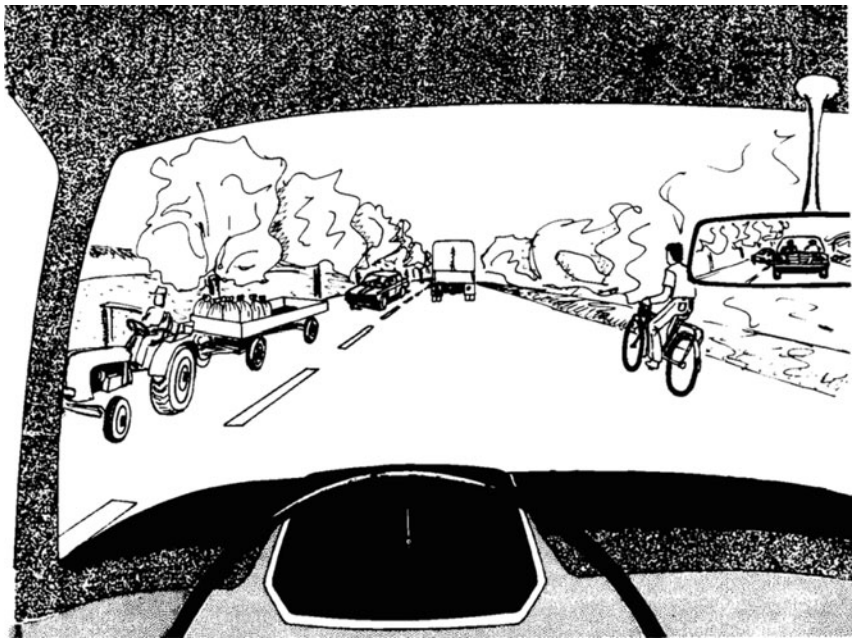


Abb. 3.50 Beispiel einer Verkehrssituation, in der eine Entscheidung notwendig ist

Tab. 3.7 Entscheidungsmatrix für den Fall eines nicht eiligen Fahrers

Handlung ohne Eile	Radfahrer schert aus 0,3	Radfahrer bleibt rechts 0,7	entgegkom. Kfz. überholt 0,3	entgegk. Kfz. bleibt i. Spur 0,7	Lkw bremst 0,1	Lkw hält Geschw. 0,9	Σ
gerade bremsen 0,4	0,12	0,28	0,12	0,28	0,04	0,36	1,20
nach links br. 0,3	0,09	0,21	0,09	0,21	0,03	0,27	0,72
gerade beschl. 0,1	- 0,03	0,07	- 0,03	0,07	- 0,01	0,09	0,16
nach li. beschl. 0,2	0,06	0,14	0,06	0,14	- 0,02	0,18	0,44

der Zustände der Welt und aus der Schätzung des Nutzens zusammen.

Die besprochenen Zusammenhänge mögen am Beispiel der Abb. 3.50 veranschaulicht werden: Das Bild zeigt eine Verkehrssituation und die verschiedenen Zustände der Welt, d. h. eventuell in Betracht zu ziehende mögliche Reaktionen der anderen Verkehrsteilnehmer. Für jede der Reaktionen wird die Wahrscheinlichkeit für deren Auftreten geschätzt. In Tab. 3.7 sind in der ersten Zeile die hypothetischen Schätzung für den Fall eingetragen, dass es der Fahrer nicht besonders eilig hat. In der linken Vorspalte sind verschiedene mögliche Handlungen gezeigt. Für jede dieser Handlungen ist ein Nutzen angegeben. Durch Multiplikation der Wahrscheinlichkeiten der Zustände der Welt und des Nutzens der jeweiligen Handlung kann für die folgende Argumentation formal der Nutzen jedes Matrixelements berechnet werden. Ein ungünstiger Ausgang der Handlung (z. B. Zusammenstoß mit einem anderen Verkehrsteilnehmer) ist dabei als negativer Nutzen (= Schaden) zu berücksichtigen. Die Summen in der letzten Spalte stellen den jeweiligen mittleren Nutzen einer bestimmten Handlung dar. Wie aus Tab. 3.7 hervorgeht, fällt die Entscheidung des Fahrers zugunsten des Abwartens

Tab. 3.8 Entscheidungsmatrix für den Fall eines eiligen Fahrers

Handlung mit Eile	Radfahrer schert aus 0,3	Radfahrer bleibt rechts 0,7	entgegkom. Kfz. überholt 0,3	Entgegk. Kfz. bleibt i. Spur 0,7	Lkw bremst 0,1	Lkw hält Geschw. 0,9	Σ
gerade bremsen 0,1	0,03	0,07	0,03	0,07	0,01	0,09	0,30
nach links br. 0,2	0,06	0,14	-0,06	0,14	0,02	0,18	0,48
gerade beschl. 0,4	- 0,12	0,28	- 0,12	0,28	- 0,04	0,36	0,64
nach li. beschl. 0,3	0,09	0,21	- 0,09	0,21	- 0,03	0,27	0,66

Tab. 3.9 Entscheidungsmatrix für den Fall eines nicht eiligen Fahrers unter Berücksichtigung eingeschränkter Entscheidungstiefe, bedingt durch, Ermüdung, Zeitdruck, Überforderung u. a. Die erwähnte Beschränkung des Kurzzeitgedächtnisses kann zur Folge haben, dass zufällig andere Einflüsse, wie in dieser Tabelle dargestellt, unberücksichtigt bleiben

Handlung ohne Eile	Radfahrer schert aus 0,3	Radfahrer bleibt rechts 0,7	entgegkom. Kfz. überholt 0,3	Entgegk. Kfz. bleibt i. Spur 0,7	Lkw bremst 0,1	Lkw hält Geschw. 0,9	Σ
gerade bremsen 0,4							
nach links br. 0,3			0,09	0,21	0,03	0,27	0,42
gerade beschl. 0,1			- 0,03	0,07	- 0,01	0,09	0,12
nach li. beschl.							

(„geradeaus bremsen“) aus. Tabelle 3.8 zeigt die gleiche Situation für den Fall, dass es der Fahrer eilig hat und folglich den Nutzen von Handlungen, die schnelleres Vorankommen garantieren, stärker bewertet. Die Entscheidung fällt nun zugunsten des Vorfahrens („nach links beschleunigen“). Aus dem Vergleich der Ergebnisse erkennt man, dass der Fahrer in Abhängigkeit seiner Motivation (= Zuordnung von Nutzen) zu ganz unterschiedlichen Handlungen bei sonst gleicher Einschätzung der Situation kommt. Wenn man die Entscheidung eines Menschen analysiert, muss man zum einen beachten, dass die Entscheidung wesentlich durch die inneren Modelle (von denen einige falsch sein können) beeinflusst wird, zum anderen dass der augenblickliche Nutzen im Vordergrund steht und eventuell wichtige Faktoren unberücksichtigt bleiben, weil der augenblickliche Aktionsbereich des Entscheidungsmechanismus durch die Kapazität des Kurzzeitgedächtnisses eingeschränkt ist (siehe hierzu Tab. 3.9). Dabei wird die Informationsverarbeitung des Menschen durch weitere Faktoren beeinfluss, wie Motivation, Wachsamkeit, Zeitdruck u. ä., wobei die Motivation letzten Endes festgelegt, was der augenblickliche subjektive Nutzen ist.

Nach der hier wiedergegebenen Modellvorstellung menschlicher Informationsverarbeitung kann grob zwischen hochgeübten Handlungen, die also keiner Entscheidung bedürfen und solchen, die bei Entscheidungsprozessen auftreten, unterschieden werden. Erstere sind in ihrer Komplexität nicht durch die Kapazität des Kurzzeitgedächtnisses beschränkt, während letztere dieser Beschränkung unterliegen und zudem mehr Zeit in Anspruch nehmen. Wenn wir Handlungen aus den von den Sinnesorganen angeregten inneren

Tab. 3.10 Gegenüberstellung der für die Erledigung von Fahraufgaben zur Verfügung stehenden Zeit und der dafür in Abhängigkeit vom Bearbeitungsniveau benötigten Zeit (nach Hale et al. 1990).

Aufgabe \ Verarbeitungsniveau	benötigte Zeit: Fertigkeitsbasiert < 200ms	Regelbasiert Sekunden bis Minuten	Wissensbasiert Minuten bis Stunden
zur Verfügung stehende Zeit: ***Navigation*** (mehrere Sekunden bis Stunden)	täglicher Arbeitsweg	Wahl zwischen vertrauten Wegen	Zurechtfinden in einer fremden Stadt
Führung (ca. 2 Sekunden)	Abbiegen an einer vertrauten Kreuzung	Überholen anderer Fahrzeuge	Steuern auf einer glitschigen oder eisigen Fahrbahn
Stabilisierung (zwischen 100 ms und max. 300 ms)	um eine Kurve fahren	ein unbekanntes Auto fahren	Fahrschüler in der ersten Fahrstunde

Repräsentationen, den sog. inneren Modellen ableiten, so ist die von Rasmussen (1986) eingeführte Kategorisierung hilfreich, weil sie einen Bezug zur Bearbeitungszeit herzustellen erlaubt. Unbewusstes Reagieren auch auf komplexe Reizmuster nennt er „*fertigkeitsbasiert*". Die damit verbundenen Reaktionszeiten liegen im Bereich von wenigen 100 ms (im Allgemeinen ca. 200 ms). Reizsituationen, deren Bewältigung zwar eine gewisse bewusste kognitive Zuwendung erfordern, die aber nach „bewährten Mustern" abgehandelt werden können, werden durch „*regelbasiertes Verhalten*" bewältigt. Die Bearbeitungszeit für solche Handlungen liegt im 1–2 Sekundenbereich. Für schwierige, neuartige Situationen können aber Lösungen nur durch bewusstes Nachdenken und Abwägen möglicher Folgen gefunden werden. Dieses Verhalten wird als „*wissensbasiert*" bezeichnet. Der Zeitaufwand dafür liegt im Bereich von mindestens mehreren Sekunden bis zu Stunden, Tagen und noch mehr. Aus der für die Erledigung der Aufgabe aufgrund des jeweiligen Verarbeitungsniveaus benötigten Zeit und der durch die Aufgabe zur Verfügung stehenden Zeit ergeben sich womöglich fehlerinduzierende Konflikte, wie sie Hale et al. (1990) zusammengestellt hat (siehe Tab. 3.10).

Ein wesentlicher Aspekt eines Entscheidungsvorgangs ist – wie oben dargestellt – die Tatsache, dass die Handlung ausgewählt wird, die unter Variation der äußeren Umstände den größten Nutzen verspricht. Dieser muss oftmals gegenüber einem möglichen Schaden (s. o. = negativer Nutzen) abgewogen werden. Damit werden Entscheidungsprozesse auch von der Einstellung des Menschen zum Risiko und von seinem Verhalten in Risikosituationen beeinflusst. Der Mensch schätzt subjektiv das Risiko des Ausgangs einer ihm vom erwarteten Nutzen her erstrebenswert erscheinenden Handlung ab. Er entscheidet sich für die Handlung, wenn dieses Risiko niedriger liegt als sein persönlich akzeptiertes Risiko. Abbildung 3.51 zeigt verschiedene Kombinationsmöglichkeiten der subjektiven Schätzung des Risikos und des objektiven Risikos. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass eine gegenüber dem objektiven Risiko höhere subjektive Einschätzung des Risikos einen sicheren Zustand darstellt.

Das persönlich akzeptierte Risiko ist dabei kurzfristigen und langfristigen Wandlungen unterworfen. Außerdem ist es bei ein und demselben Individuum für verschiedene Verhaltensbereiche unterschiedlich (ein tollkühner Motorradfahrer unterzieht sich nicht unbedingt risikofreudig schwierigen akademischen Prüfungen).

Im Zusammenhang mit dem Risiko werden bezüglich des fahrerischen Verhaltens zwei grundsätzliche Problemfelder aufgezeigt:

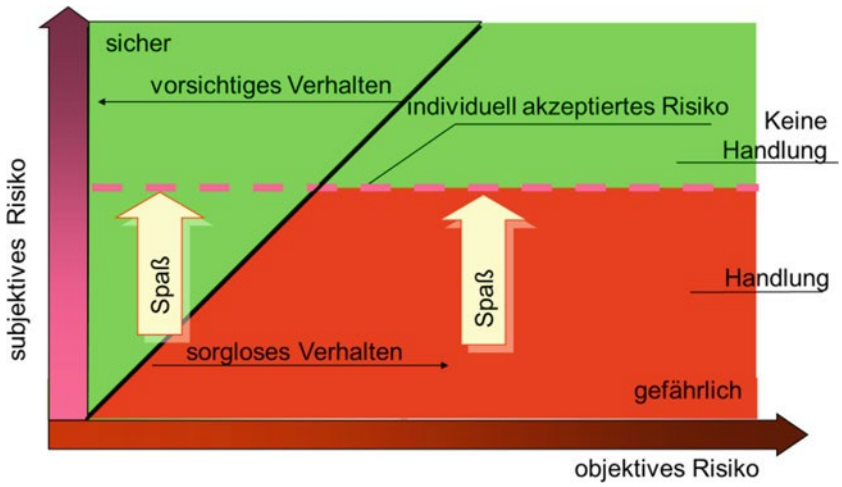


Abb. 3.51 Beispiel von verschiedenen Kombinationen von subjektiver Schätzung des Risikos, objektivem Risiko und der sich daraus ergebender Sicherheit der Handlung

- Viele Fehlverhaltensformen sind darauf zurückzuführen, dass mangels Erlebnismöglichkeit (= Reizkonfiguration in der Informationsaufnahme) keine situationsadäquate Schätzung des Risikos (subjektives Risiko) möglich ist (z. B. ein zu geringer Abstand zum Vorausfahrenden wird subjektiv als nützlich empfunden, da es den Vorausfahrenden veranlasst, die Bahn frei zu machen; das darin liegende Risiko würde erst erfahren werden, wenn es für den Fahrer häufiger zu einem Auffahrunfall oder zumindest Beinahe-Unfall kommen würde).
- Nach der Theorie der „Risikohomöostase" (Wilde 1982; O'Neill 1977) verändert der Mensch bei einer Reduzierung des objektiven Risikos (beispielsweise durch technische Maßnahmen) sein Verhalten in Richtung „gefährlicher" soweit, dass die subjektive Schätzung des Risikos wieder die gleiche Distanz zum persönlich akzeptierten Risiko erhält, wie vor der Einführung der Maßnahme (z. B. durch bessere Straßen und Fahrwerke werden heute grundsätzlich höhere Geschwindigkeiten gefahren als in der Pionierzeit des Autofahrens[39]).

In diesem Zusammenhang kommt die Frage auf: Was verursacht beim Fahren Spaß? Wenn wir verschiedene Gebiete vergleichen, wo wir Spaß haben, dann sehen wir, dass ein wesentlicher Aspekt des Spaßes darin besteht, die individuelle Grenze der eigenen Leistungsfähigkeit zu berühren, um sich somit zu zeigen, die Situation zu meistern. Ein Beispiel ist ein Zitat aus der Motorzeitschrift von „Auto-Motor-und-Sport": „Mit ausgeschaltetem ESP (das elektronische Anti-Schleuder-System) kann man den Porsche Turbo lustvoll diagonal driften lassen". So kann das Eingreifen von aktiven Sicherheitssystemen zu einer Abnahme des Fahrspaßes führen. Eigentlich wollen Fahrer eher bei langweiligen oder beschwerlichen Aufgabe unterstützt werden (z. B. Rückstaus, Baustellen oder beim Passieren von Engpässen), aber in Situationen des freien Fahrens wollen sie selber handeln (Totzke et al. 2008). Dabei ist die Gefahr groß, in den Bereich des gesetzwidrigen Verhaltens zu geraten, wenn man bei der Nutzung des Fahrzeugs Spaß erfahren möchte. Das alles muss in Betracht gezogen werden, wenn die Bedienung (Human Machine Interface, HMI) für Fahrerassistenzsysteme entwickelt wird. Wenn wir die Verkehrssicherheit erhöhen wollen, müssen wir Lösungen dafür entwickeln, dass auch im Gebiet der objektiven Sicherheit der primären Fahraufgabe Spaß erfahren werden kann.

3.2.3 Informationsumsetzung

Aufgabe der Informationsumsetzung ist es, die in der Informationsverarbeitung generierten Handlungssequenzen in die Realität umzusetzen. Dafür

39 Das hat nicht unbedingt etwas mit der höheren Leistungsfähigkeit der heutigen Fahrzeuge zu tun.

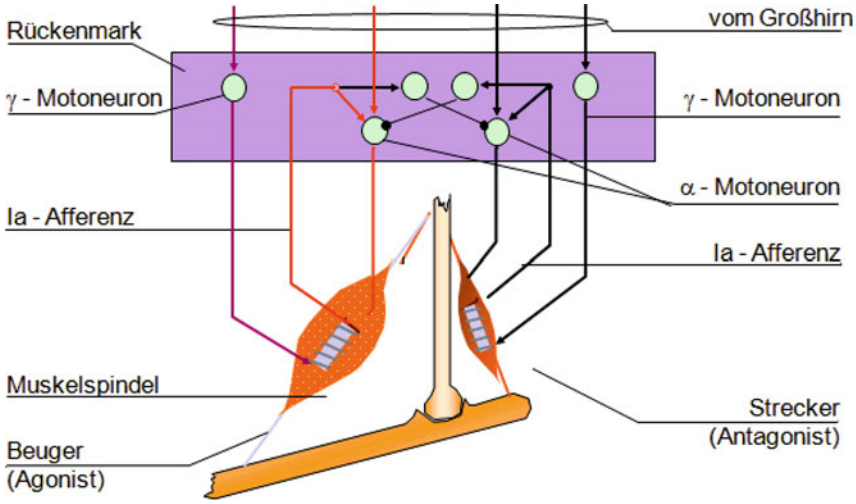


Abb. 3.52 Regelkreis Muskel-Rückenmark Längenservomechanismus.

steht nur durch Muskelkraft hervorgerufene mechanische Bewegung zur Verfügung. Die Prinzipien dieser Umsetzung werden an der Funktionsweise des sog. Eigenreflexbogens dargelegt, der in dieser Form für alle Extremitäten mit Ausnahme des Kopfbereiches gilt. Auch für den Kopfbereich gelten aus regelungstechnischer Sicht die gleichen Prinzipien, wobei die entsprechend Verschaltungen allerdings nicht im Rückenmark lokalisiert sind.

Die vom Großhirn festgelegten Bewegungsprogramme werden im Wesentlichen über zwei Wege als Führungsgröße an den untergeordneten Regelkreis des Reflexbogens geleitet: Schnelle Bewegungen und die Grobmotorik werden über die α-Motoneurone, die Feinmotorik über die γ-Motoneurone innerviert. Abbildung 3.52 zeigt schematisch eine systemanalytisch orientierte Darstellung der Informationsumsetzung.

Die Axone der α-Motoneuronen, die sich – soweit sie die Muskulatur der Körperperipherie innervieren – im Rückenmark befinden, bilden Synapsen mit den quergestreiften, der Willkür zugänglichen Muskelfasern. Gemäß dem antagonistischen Prinzip[40], eine Grundstruktur aller höher entwickelten Lebewesen, gehört zu jedem agonistischen Muskel (z. B. Beuger) ein antagonistischer Muskel (z. B. Strecker), der die Bewegung des ersten aufzuheben vermag. Die Verschaltung verfolgt einerseits den Zweck eines geordneten Zusammenwirkens von Agonist und Antagonist und andererseits der geregelten Umsetzung einer vom Großhirn erdachten Haltung bzw. Bewegung in die Realität. Das Axon des Motoneurons verzweigt sich im Muskel und innerviert so mehrere Muskelfasern. Alle Muskelfasern, die durch ein α-Motoneuron innerviert werden, bilden eine „motorische Einheit“: Da der Muskel nach dem „Alles-oder-nichts-Prinzip“ arbeitet, ist eine dosierte Muskelkontraktion nur in Stufen durch die Innervation einer unterschiedlichen Anzahl von motorischen Einheiten möglich. In den Muskelfasern eingelagert sind die Muskelspindeln, die als Längenmessfühler dienen und bei Dehnung über die Ia-Fasern mit erhöhter Impulsrate reagieren. Da eine Dehnung bzw. Stauchung des ganzen Muskels auch eine Dehnung bzw. Stauchung der Muskelspindeln bewirkt, wird über die Ia-Afferenz die Längenänderung des Muskels rückgemeldet.

Die Ia-Afferenzen sind im Rückenmark erregend auf die α-Motoneuronen der gleichen motorischen Einheit des agonistischen Muskels und über ein zwischengeschaltetes Neuron hemmend auf das α-Motoneuron des antagonistischen Muskels geschaltet. Eine vom Großhirn abgesandte Erregung des α-Motoneurons bewirkt also eine Kontraktion beispielsweise des Beugers. Durch die Kontraktion wird die erregende Impulsrate der Ia-Afferenz reduziert, so dass die Muskelbe-

40 Sog. „Zugcharakteristik“: im Gegensatz zu vielen technischen Aktuatoren (z. B. Hydraulikzylinder) können Muskel nur kontrahieren, d. h. in eine Richtung Kräfte entwickeln (sieh auch Abschn. 4.1.2.2).

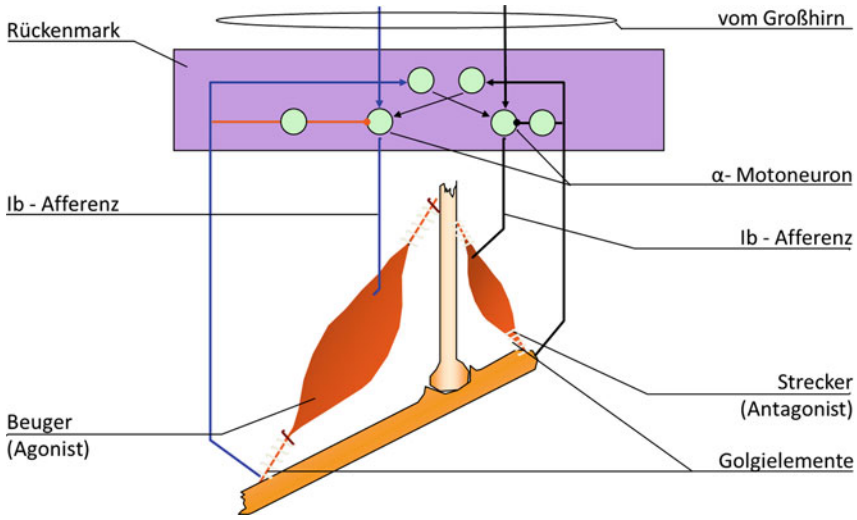


Abb. 3.53 Regelkreis Muskel-Rückenmark Kraftservomechanismus.

wegung in einer neuen Ruhelage (dies entspricht einer bestimmten Körperhaltung) zum Stillstand kommt. Dieser Vorgang wird durch die hemmende Verschaltung der Ia-Afferenz auf das α-Motoneuron einer entsprechenden motorischen Einheit des Streckers unterstützt, indem dort die spontan vorhandene Spannung gelockert wird. Wenn bei einer gegebenen Innervation der α-Motoneurone durch eine äußere Belastung beispielsweise der Strecker gedehnt wird, sorgen die erregenden Ia-Afferenzen für die erhöhte Anspannung des Beugers und ihre hemmenden Verschaltungen für eine nachlassende Wirkung des Streckers. Der skizzierte Regelkreis ist also in der Lage, weitgehend unabhängig von äußeren Belastungen die vom Großhirn verlangte Stellung konstant zu halten bzw. dem vom Großhirn als Führungsgröße vorgegebenen zeitlichen Verlauf der gewünschten Muskellänge zu folgen („Längenservomechanismus", s. Schmidt 1976a).

Die in Abb. 3.52 skizzierte γ-Innervation vermag die Muskelspindeln in der Weise vorzuspannen, dass sich dadurch die Ia-Afferenz erhöht bzw. sich bereits durch kleinere Längenänderungen des Muskels größere Veränderungen der Ia-Afferenz ergeben (Messbereichsverstellung). Über die Verschaltung mit den α-Motoneuronen wird dadurch eine Anspannung des Agonisten und eine entsprechende Erschlaffung des Antagonisten bewirkt, was zu einer Bewegung im Ganzen führt, die an einer durch die γ-Innervation bestimmten Stelle zum Stillstand kommt. Über die γ-Innervation kann also Bewegung im Feinbereich geregelt werden, während durch die α-Innervation mehr die schnelle und gröbere Bewegung angeregt wird.

Da die γ-Innervation vom Kleinhirn ausgeht, das selbst wieder Afferenzen vom Vestibularorgan erhält (siehe auch Abb. 3.5), wird über sie auch die Stützmotorik innerviert, wodurch bei Verlagerungen des Körpergewichts, bei unebenem Fußboden und bei Einwirkung von Beschleunigungskräften im bewegten System immer eine stabile aufrechte Körperhaltung angestrebt wird. Über den Weg der γ-Innervation ist die Stützmotorik der Willkürmotorik ständig überlagert. Im Kraftfahrzeug kann somit unter extremen Bedingungen die vom Kleinhirn innervierte Stützmotorik mit der über den gleichen Weg der γ-Innervation bestimmten Feinmotorik interferieren[41].

Neben dem eben beschriebenen Regelkreis des Längenservomechanismus ist ein dazu paralleler Regelkreis verwirklicht, den man „Kraftservomechanismus" nennen kann. Er ist in Abb. 3.53 dargestellt. In diesem Regelkreis wirken die Sehnenelemente (Golgielemente) als Messfühler, die die Dehnung der die Muskel an das Skelett anbindenden Sehnen und damit die vom Muskel übertragene

41 Das ist neben der Erreichbarkeit das wesentliche Bedienproblem von Touchscreens im Fahrzeug: Beim feinmotorischen Zielen eines Buttons auf dem Touchscreen wird durch die Fahrzeugbewegung die Position der Hand nicht nur in Form von physikalischer Trägheitsreaktion, sondern auch durch die „Doppelaufgabe" der γ-Innervation gestört.

Kraft messen. Über die Ib-Faser und ein zwischengeschaltetes Neuron wirken sie hemmend auf das α-Motoneuron ein.

Arbeitet der Muskel statisch gegen einen nicht beweglichen Widerstand, wird durch diesen Regelkreis über die α-Innervation eine vom Großhirn als Führungsgröße vorgegebene Kraftvorstellung in eine definierte reale Kraft umgesetzt. Daneben stellt diese Verschaltung auch eine Schutzwirkung dar, indem bei unzulässig großer Krafteinwirkung von außen die Ib-Afferenzen so groß werden, dass die α-Innervation nachlässt und der Muskel somit der äußeren Spannung nachgibt.

Zusammenfassend ist also festzuhalten: primär versuchen wir über unseren Bewegungsapparat einen im Großhirn entworfenen Bewegungsverlauf (= Handlung) zu realisieren. Wir innervieren die dafür eingesetzten Muskeln so, dass eine Kraft entsteht, die diese Bewegung ermöglicht. Die erreichte Position wird über die Muskelspindeln und die Stellungsrezeptoren in den Gelenken zurückgemeldet. Durch den Vergleich im Rückenmark kommt die Bewegung zum Stillstand, wenn das durch α-Motoneuronen vorgegebene „Soll" mit dem durch die Ia-Afferenz gemessenen „Ist" übereinstimmt. Es wird dann nur noch so viel Kraft aufgewendet, dass das „Soll" gehalten werden kann. Wenn äußere Krafteinwirkungen die vom Gehirn vorgegebene Stellung des Skeletts zu verändern trachten, wird über den „kurzen Weg" des Rückenmarks unwillkürlich die aufgewendete Kraft so verändert, dass die Stellung erhalten bleibt. In dieser Anwendung ist die haptische Reaktion 4 mal schneller als die Reaktion, die über den äußeren Weg der visuellen Rückmeldung erfolgen würde (Gillet 1999).[42] Nur wenn die Kraft gegen einen festen Widerstand aufgewendet wird, kann über den durch die Ib-Afferenz realisierten Kraftservomechanismus eine gewünschte Kraft dosiert aufgewendet werden. Bei jedem Bewegungsvorgang spielt aber die Kraftrückmeldung eine entscheidende Rolle. Wenn solche Bewegungsvorgänge oft wiederholt wurden, entsteht gerade über diesen Zusammenhang ein inneres Modell, das Auskunft über die Korrektheit des Ablaufs gibt und über das bei ungewöhnlichem Ablauf des meist autonom ablaufenden Bewegungsvorgangs ins Bewusstsein gezogen wird.

Beim Autofahren spielt der hier beschriebene Verschaltungsmechanismus beim Durchfahren von Kurven für das Lenkgefühl eine ausschlaggebende Rolle (siehe Wolf 2009). Die Kombination der Bewegungswahrnehmung über den optischen Fluss, die zugehörigen Beschleunigungskräfte und die an der Lenkung spürbaren Rückstellkräfte machen zusammen das innere Modell für Kurvenfahrt aus. Jede überschwellige Abweichung führt folglich zu Entscheidungsprozessen und damit in einer gegebenen Verkehrssituation womöglich zu gefährlicher Verzögerung der Reaktion. Auch bei der Betätigung von Schaltern und Bedienelementen ist die Kraftrückmeldung von großer Wichtigkeit, weil sie Auskunft über die korrekt ausgeführte Handlung gibt.

Viele Bewegungsvorgänge können aufgrund des hohen Übungsgrads praktisch unabhängig von einer bewussten Informationsverarbeitung ablaufen. Dennoch stellen sie nicht eine isolierte Leistung der Informationsumsetzung dar, da sich alle auf Bewegungsvorgänge beziehen, die mit den Augen kontrolliert werden. Das Auflösungsvermögen der Augen ist dabei wesentlich besser als die reine Bewegungsgenauigkeit, was durch die Beobachtung Hackers (1967) unterstützt wird, wonach sich die Bewegungsleistung bei fehlender Sichtkontrolle im allgemeinen um ein Vielfaches verschlechtert.[43] Durch geeignete haptische Rückmeldung ist aber auch bei fehlender visueller Kontrolle eine deutliche Verbesserung zu erzielen. Für die Genauigkeit der Informationsumsetzung spielt also die Rückmeldung über die Informationsaufnahme eine wichtige leistungsverbessernde Rolle.

Zusammenfassend kann man also feststellen, dass Fehler durch die Informationsumsetzung bedingt werden, wenn die technische Auslegung des Fahrzeugs eines oder mehrere der folgenden Mängel aufweist:

- ungenügende Anpassung der Stellteile an die anatomischen Eigenschaften des Menschen,
- fehlende oder unzureichende haptische Unterscheidbarkeit der Stellteile,

42 Diese Überlegung spielt im Zusammenhang mit sog. „steer by wire"-Lenkungen eine wichtige Rolle (siehe Näheres hierzu in Abschn. 6.4.3).

43 Ein Problem, dass gerade in Verbindung mit der Anwendung von Touchscreens im Auto von Bedeutung ist!

- fehlende oder inkorrekte Kraftrückmeldung eines Stellteils (Der Schaltpunkt eines Druckschalters sollte z. B. durch eine sprunghafte Änderung der Rückstellkraft auch haptisch spürbar sein.),
- fehlende oder inadäquate Rückmeldung des geregelten Prozesses (z. B. das „fly by wire"-Problem: bei vielen mechanisch entkoppelten Stellteilen, durch die z. B. Servomotore geschaltet werden, fehlt eine Rückmeldung über den von der Maschine bewirkten Effekt, wie es bei mechanischer Koppelung naturgegeben ist).

3.3 Informationsverarbeitung beim Autofahren

3.3.1 Das Gefühl für die Zeit

Autofahren ist Bewegung und Bewegung ist Veränderung des Ortes in der Zeit. Von großem Interesse für das Verstehen von Handeln in der Bewegung ist also das Verhältnis des Menschen zur Zeit. Welches Empfinden haben die Menschen bezüglich der aktuellen Zeit oder der kürzlich durchlebten Zeit? Diese Frage ist für alle angesprochenen Zusammenhänge wichtig, denn wir leben im Jetzt und Heute, haben Erinnerungen an die Vergangenheit und Erwartungen für die Zukunft, Aspekte, die wesentlich mit unserem Gedächtnis zu tun haben. Pöppel (2000) hat sich mit dieser Frage intensiv auseinander gesetzt. In Übereinstimmung mit den vielen neurologischen Gehirnexperimenten fand er, dass unser dem Bewusstsein zugängliches Denken in 40 ms-Perioden getaktet ist. Von besonderem Interesse sind hier aber seine Erkenntnisse zu dem, was wir als Gegenwart empfinden. Im Gegensatz zu einer streng logischen Überlegung, nach der es Gegenwart eigentlich nicht gibt, weil sie lediglich die unendlich kurze Trennlinie zwischen Vergangenem und Zukünftigen ist, erleben wir Gegenwart durchaus real. Pöppel fand, dass das Konzept der Gegenwart in drei Bereiche einzuteilen ist: Das, was wir unmittelbar als Gegenwart empfinden, entspricht einer Zeitdauer von etwa 2 Sekunden. Zum Gegenwartgefühl gehört aber auch das unmittelbar Vergangene, was Pöppel Gegenwart der Vergangenheit nennt. Es entspricht einer Zeitperiode von wenigen Sekunden (so können wir beispielsweise einen eben gesprochenen kurzen Satz jederzeit wortgleich wiederholen; das ist nicht mehr möglich für Sätze, die vor mehr als einer halbe Minute gesagt worden sind). Weiterhin gehört aber zum Gegenwartsempfinden auch die Gegenwart der Zukunft, also die Erwartung dessen, was nun unmittelbar folgen wird. Wir können nur handeln, wenn wir eine innere Vorstellung davon haben, was wir im unmittelbar nächsten Moment tun sollten. Die Gesamtzeit von der Gegenwart der Vergangenheit zur Gegenwart der Zukunft stellt eine Spanne von ungefähr 10 bis 15 Sekunden dar (Wickens und Hollands 2000). Sie entspricht damit der Vergessenszeit, die man häufig dem sog Kurzzeit- oder Arbeitsgedächtnis zuspricht, also dem, was im oben genannten Sinne als Bewusstsein bezeichnet wurde.

Die Kenntnisse über das Empfinden von Zeit sind von großer Wichtigkeit im Zusammenhang mit dem Verständnis der menschlichen Informationsverarbeitung beim Autofahren. Da Autofahren ein „Gegenwartserlebnis" ist, erfolgen die meisten Handlungen, Entscheidungen und Reaktionen in dem Zeitfenster der „Gegenwart der Gegenwart" von 2 Sekunden. Ein Großteil der Kenntnisse über das zugrundeliegende Verhalten kann man aus dem Blickverhalten gewinnen, das im Folgenden genauer betrachtet wird.

3.3.2 Blickverhalten des Menschen beim Führen eines PKWs

3.3.2.1 Allgemeine Eigenschaften

Da, wie bereits angesprochen, das Auge nur einen kleinen Winkelbereich von 2° bis 3° scharf wahrnehmen kann und erst durch Blickbewegung im Gehirn ein inneres Bild der Außenwelt zusammengesetzt wird, ist es eine ganz selbstverständliche Alltagserfahrung, den Gegenstand der Aufmerksamkeitszuwendung eines Mitmenschen zu erfassen, indem wir darauf achten, worauf er seinen Blick gerichtet hat. Über die Erfassung der Blickrichtung haben wir sozusagen ein Spährohr in das Innere seines Verhaltens. Natürlich liefert dieses Spährohr keine absolut sicheren Erkenntnisse darüber, was wirklich gesehen wurde und welche inneren Modelle des Beobachteten tatsächlich angeregt wurden. Zudem ist zu unterscheiden zwischen der äußeren „physiologischen

Fovea“ und der inneren „psychologischen Fovea“, die schlechterdings nicht unmittelbar beobachtet werden kann, sondern bestenfalls erfragt werden kann (siehe Zichenko und Virgiles 1972). Beide Aufmerksamkeitsrichtungen müssen also nicht unbedingt identisch sein. Der Unterschied kann bis zu 2° betragen (Kaufmann u. Richards 1969), wenn auch im Allgemeinen von einer hohen Korrelation mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung zwischen beiden ausgegangen werden kann.

Neben dieser Unterscheidung zwischen innerer (psychologischer) Aufmerksamkeitszuwendung und äußerer, beobachtbarer (physiologischer) Aufmerksamkeitsrichtung ist auch noch die Art des Ansteuervorganges für die Blickzuwendung zu beachten (siehe hierzu die Experimente von Remington 1980). Man spricht von *Ablenkung*, wenn durch einen sich ändernden Reiz im peripheren Blickfeld ein Impuls ausgelöst wird, der (auf physiologisch relativ niedriger Ebene) den Blick dorthin wenden lässt und von *Abwendung*, wenn durch einen willentlichen Akt der Blick auf einen neuen Gegenstand der augenblicklichen Aufmerksamkeit („Area of Interest“, AOI) zugewendet wird. Für die hier zu behandelnde Fragestellung ist eigentlich nur letzteres von Interesse, wenngleich sich beides auf gleiche Weise zeigt und folglich experimentell nicht exakt voneinander getrennt werden kann.

Trotz der generellen Einschränkungen stellt die Blickanalyse ein lohnenswertes Instrument dar, Aufschluss über die augenblickliche Aufmerksamkeitszuwendung zu erhalten. Zumindest kann die Aussage „Was nicht im Blickfeld ist, kann auch nicht subjektiv erfasst werden und spielt somit für die Handlungsgenerierung keine Rolle“ eine Grundlage für ein praktikables experimentelles Vorgehen sein.

Die für eine ideale Erfüllung der primären Fahraufgabe benötigte Zeitkapazität ist von zahlreichen Einflussfaktoren wie z. B. den individuellen Eigenschaften des Fahrers, der Verkehrsdichte, der Fahrbahnbeschaffenheit und den Witterungsverhältnissen abhängig. Je komplexer sich eine aktuelle Fahrsituation gestaltet, desto größer ist auch der für die primäre Fahraufgabe benötigte Zeitanteil. Die restliche Zeit steht für sekundäre und tertiäre Aufgaben zur Verfügung, wobei generell eine Minimierung des dafür benötigten Zeitanteils für einen gleichzeitig maximalen Sicherheitsgewinn erstrebenswert ist.

Schweigert (2003) unterscheidet drei Ebenen visueller Grundaufgaben, die im Rahmen der Führungs- und Stabilisierungsaufgabe durchgeführt werden müssen:

1. Kontinuierliche Kontrolle der eigenen Bewegung auf der Fahrbahn
   Die Bewegung des eigenen Fahrzeuges muss visuell überwacht werden. Bei erfahrenen Fahrern geschieht dies in hohem Maße über die periphere Sicht. Dabei sind offensichtlich vor allem Information im nahen Bereich (ca. 6 m vor dem Fahrzeug) wichtig (Chatziastros et al. 1999), wobei die untere Gesichtshälfte deutlich leistungsfähiger ist als die obere.[44] Zusätzlich sind aber immer auch orientierende foveale Blicke notwendig, denn sowohl mit sinkender Breite der Fahrbahn bzw. beim Passieren von Hindernissen als auch bei unerfahrenen Fahrern nimmt der foveale Anteil zu.
2. Kontinuierliche Antizipation des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer
   Das Vorfeld muss kontinuierlich beobachtet werden, um rechtzeitig Ereignisse erkennen zu können, die eigene Reaktionen notwendig machen. Dies entspricht dem von Cohen (1976) postulierten explorativen Scanning-Verhalten. Dies ist nur mit Hilfe des fovealen Sehens möglich. Auch nach Rensink et al. (1997, zit. nach McCarley et al. 2002) muss der Fahrer aktiv die Fahrumgebung scannen, Objekte mental verarbeiten („encoding“) und Veränderungen derselben bemerken. Wenn das Verhalten eines anderen Verkehrsteilnehmers, der in den Einflussbereich des eigenen Fahrzeugs gelangen könnte, nicht extrapoliert und hinreichend genau vorhergesagt werden kann, muss dieser beobachtet werden (Processing-Verhalten, nach Cohen 1976). Hierbei überwiegt ebenfalls das foveale Sehen. Ebenso muss der Verkehr hinter dem eigenen Fahrzeug kontinuierlich und nicht nur situativ (siehe Punkt 3) beobachtet werden.

44 Summala et al. (1996) führten Feldversuche aus, bei denen die Probanden ihren Blick auf ein Display im Fahrzeug richten mussten, sodass die Fahrbahn nur peripher wahrgenommen werden konnte. Das Display wurde mit einer Exzentrizität von 7°, 23°, und 38° in Relation zu der Horizontallinie dargeboten. Mit steigender Exzentrizität verschlechterte sich die Spurhaltequalität.

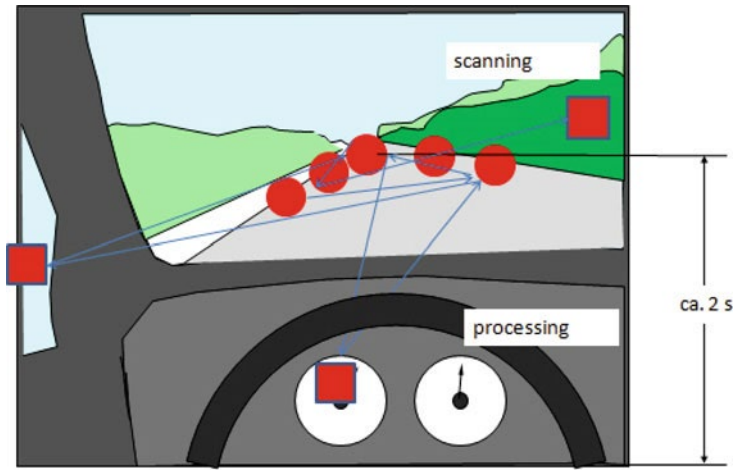


Abb. 3.54 Blickverhalten: Durch „Scanning"-Blicke wird der Straßenverlauf erfasst. Durch „Processing"-Blicke werden bestimmte areas of interest (AoI's) angesehen.

Dies ist erforderlich, um sich rechtzeitig eine hinreichend genaue interne Repräsentation vom rückwärtigen Geschehen machen zu können.

3. Situativ erforderliches Blickverhalten
   Darüber hinaus existieren Fahrsituationen, die im Gegensatz zu den zuvor besprochenen Aufgaben nicht kontinuierlich während der Fahrt erforderlich sind, sondern ein spezielles, an die jeweilige Situation angepasstes Blickverhalten voraussetzen. Hierbei handelt es sich z. B. um die Antizipation des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer an Knotenpunkten und Hindernissen.

Bei der Beobachtung des Blickverhaltens während des Fahrens mittels eines Eye-Tracking-Systems konnte Schweigert (2003) deutlich zwischen den „Scanning-" und „Processing-" Blicken unterscheiden (siehe Abb. 3.54). Scanning-Blicke sind durch eine ziemlich kurze Dauer von durchschnittlich 400 ms charakterisiert. Durch sie werden quasi kontinuierlich vor allem die Straßenränder, andere Verkehrsteilnehmer und Verkehrszeichen erfasst. Offensichtlich dienen sie der Erfassung der Daten, die für die Generierung des innerlich gebildeten Sollkurses im Rahmen der Führungsaufgabe notwendig sind (siehe auch ▶ Abschn. 3.3.3). Ein Teil dieser für die Bahnführung notwendigen Information kann auch durch die Erfassung des optischen Flusses im peripheren Bereich der Bilderfassung erfolgen. Durch die gezielten Processing-Blicke werden speziell sog. areas of interest (AoI's) fixiert. Besonders häufig dienen sie der Informationsaufnahme für die Antizipation des zukünftigen Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer. Es können aber auch die Anzeigeinstrumente, die Spiegel, der zentrale Bildschirm, oder auch andere interessierende, aber nicht verkehrsrelevante Gegenstände in der Umgebung sein. Die Processing-Blicke benötigen durchschnittlich die doppelte Zeit der Scanning-Blicke (siehe Abb. 3.55).

In diesem Zusammenhang ist auf die Untersuchung von Underwood et al. (2003) hinzuweisen, der fand, dass sich das Blickverhalten von Anfängern von dem erfahrener Fahrer signifikant unterscheidet. Während Anfänger im Allgemeinen länger fixieren und von jedem AOI sofort den Blick wieder auf den Fixationspunkt auf der Straße lenken, scannen erfahrene Fahrer viel mehr die Straße vor allem in ferneren Bereich ab, wobei immer wieder ein Processing-Blick bestimmten AOIs gewidmet ist (siehe Abb. 3.56).

Zur Beurteilung des Blickverhaltens ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen der *Verkehrssituation*, welche die objektiv gegebene räumliche und zeitliche Konstellation der verkehrsbezogenen Einflussgrößen darstellt, der *Fahrsituation*, welche die sich daraus ergebende prinzipiell wahrnehmbare Fahrersicht darstellt und der *Fahrersituation*, die die subjektive, tatsächlich vom Fahrer wahrgenommene Fahrsituation beschreibt (Reichart 2000). Wenn es überhaupt möglich ist, ein Soll-Blickverhalten zu definieren, so kann dies nur auf der Ebene der Fahrsituation geschehen. Für die dafür benötigte

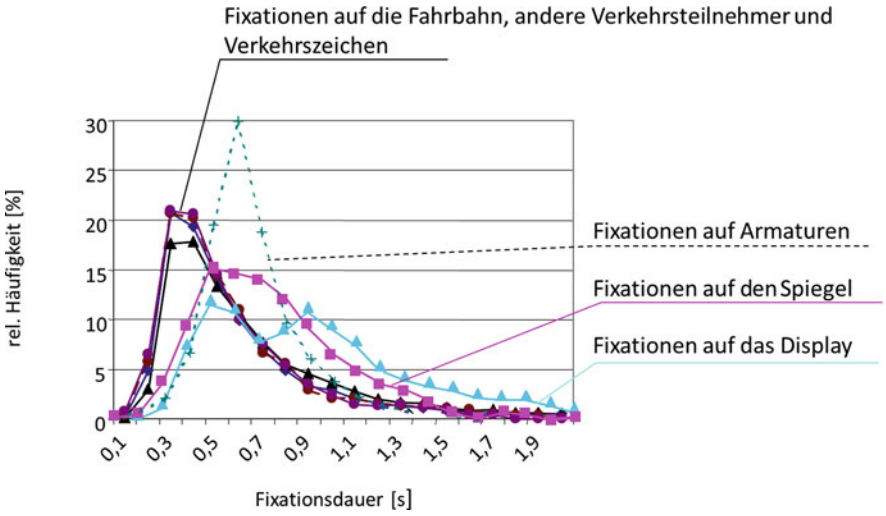


Abb. 3.55 Experimentelle Ergebnisse von Blickerfassungsuntersuchungen (Schweigert 2003)

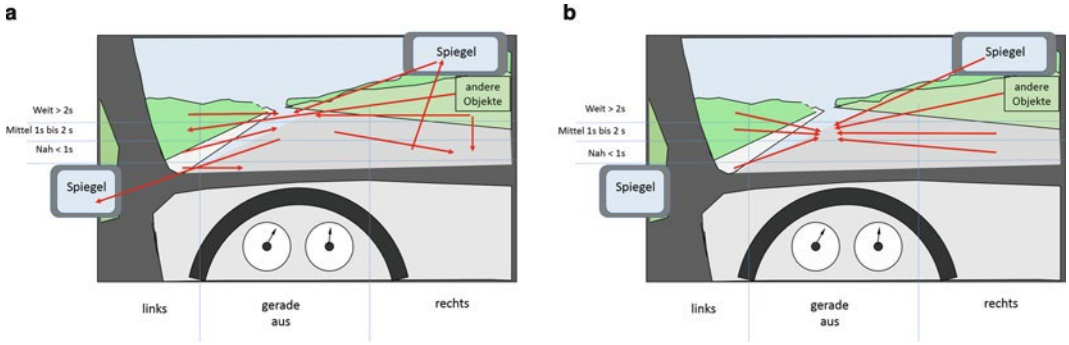


Abb. 3.56 Typische Blicksequenz bei erfahrenen Fahrern (**a**) und Anfängern (**b**) (Underwood et. al. 2003)

Taxonomie wird auf die von Fastenmeier (1995) zurückgegriffen, welche durch einige Untergruppen, die vor allem die Fahrersicht berücksichtigen, ergänzt wird. Tabelle 3.11 gibt Beispiele für unterschiedliche Komplexitätsklassen und listet Situationen auf, die in der Untersuchung von Schweigert (2003) benutzt worden sind.

Da es im vorliegenden Fall um die visuelle Komplexität geht, versucht Schweigert eine genauere Bestimmung des Komplexitätsgrades der Aufgabe. Offensichtlich spielt dabei hauptsächlich das Vorhandensein von entgegenkommenden und vorausfahrenden Fahrzeugen, sowie Knotenpunkten und Kurven eine Rolle. Ein weitergehender Ansatz stellt die für das Blickverhalten relevanten Komplexitätsfaktoren eines Streckenabschnittes einzeln dar. In Abb. 3.57 ist die Zusammensetzung dieses Komplexitätsindex dargestellt. Bei den Einflussfaktoren „Kurven“ und „Knotenpunkte“ werden die Anzahl dieser Objekte herangezogen. Für das „Vorhandensein vorausfahrender Fahrzeuge“ wird als Vergleichsmaßstab der mittlere zeitliche Anteil, bei dem im konkreten Streckenabschnitt auf vorausfahrende Fahrzeuge geblickt wurde, ermittelt. Das „Vorhandensein entgegenkommender Fahrzeuge“ wird mit der mittleren Anzahl dieser Fahrzeuge erfasst. Dies ist eine pragmatische und einfach nachzuvollziehende Vorgehensweise, die keine Gewichtung zwischen den Faktoren vornimmt.

Schweigert hat auf der Grundlage dieser Überlegungen Versuche zum Blickverhalten mit insgesamt 30 Probanden auf öffentlichen Straßen durchgeführt und die Ergebnisse einer detaillierten Auswertung

Tab. 3.11 Beispiele für Komplexitätsklassen und in den Untersuchungen von Schweigert (2003) benutzte Situationen

Komplexität	Beispiel	Ausgewählte Situationen
gering	• Autobahn, wenig Verkehr • Landstraße, wenig Verkehr • Stadt mit wenig Verkehr, knotenfreie Straße	Einspurige Landstraße, wenig Verkehr, Tempo 80 bzw. 60
mittel	• Stadt mit beschilderten Kreuzungen, ampelgeregelt, Engstellen und Kurven • Autobahneinmündungen • Landstraße mit Kurven und Steigungen	1. Autobahn, 3 Spuren, Tempo 80, je zwei Ein- und Ausfahrten, mittlerer Verkehr 2. Stadt, zweispurig, ampelgeregelte Kreuzung, mittlerer Verkehr
hoch	• Stadt, beschilderte Kreuzung mit Wartepflicht • Autobahnauffahrten	Stadt, Tempo 30, rechts-vor links, Engstellen durch parkende Pkw´s

unterzogen[45]. Von Interesse waren dabei das „normale" Blickverhalten und dessen Veränderung durch Zusatzaufgaben. Die relative Häufigkeit der Fixationsdauer zeigt hier einheitlich eine linkssteile Verteilung mit einem Modalwert zwischen 0,3 und 0,4 s (siehe auch Abb. 3.55). Komplexere Streckenabschnitte ziehen schmälere Verteilungen und einen stärker ausgeprägten und zugleich kleineren Modalwert nach sich. In Abhängigkeit von den jeweiligen angeblickten Objekten zeigen sich dabei signifikante Unterschiede. Am kürzesten wird im Mittel auf Verkehrszeichen geblickt (0,5 s) und am längsten auf das vorausfahrende Fahrzeug (0,73 s). Die Blickdauer beim Processing (rückwärtiges Fahrzeug, Tacho) sind dabei in etwa um den Faktor 2 größer. Überwiegend vorausfahrende Fahrzeuge (62,6 %) und die Fahrbahn werden länger als 2 s angeblickt. Immer handelt es sich bei den länger angeblickten Objekten um solche mit essentieller Relevanz für das Erfassen des Verkehrsgeschehens. Fixationen auf den Fluchtpunkt und auf das vorausfahrende Fahrzeug beanspruchen ca. 50 % der Fixationszeit, wobei das jeweilige relative Verhältnis stark vom Streckenabschnitt abhängt. So dominieren auf der vielbefahrenen Autobahnstrecke mit 31 % die Fixationen auf den Fluchtpunkt, gefolgt von 24 % auf Fahrzeuge der anderen Fahrspuren und 19 % auf das vorausfahrende Fahrzeug. Auf der kurvenreichen aber wenig frequentierten Ortsdurchfahrt sind 42 % der Blickdauern auf den Fluchtpunkt gerichtet, 14 % dienen der Spurkontrolle und nur 9 % sind dem vorausfahrenden Fahrzeug gewidmet. Auf dem Autobahnabschnitt mit der höchsten Durchschnittsgeschwindigkeit ist 54 % der Fixationszeit auf den Fluchtpunkt gerichtet. Aus diesen Angaben lässt sich allerdings kein „Soll" für das richtige Blickverhalten ableiten. Dennoch werden diese Werte im Folgenden als mittleres Verhalten für die weitere Bewertung des Blickverhaltens bei Zusatzaufgaben herangezogen.

Auf dieser Grundlage lässt sich für manche Aufgaben ein Qualitätsmaß in der Form „Anzahl der korrekt erfüllten Aufgaben in Relation zur Zahl der durchzuführenden Aufgaben" angeben. Dabei fällt auf, dass nur die Aufgaben

- Kontrolle eines vorausfahrenden Fahrzeugs,
- Kontrolle von Engstellen,

45 Die Auswertung basiert auf umfangreichen Untersuchungen: 10 h Videomaterial wurde ausgewertet, 40.000 Fixationen, ca. 12.000 Blicke/Fixation analysiert und 3000 visuelle Aufgaben quantifiziert.

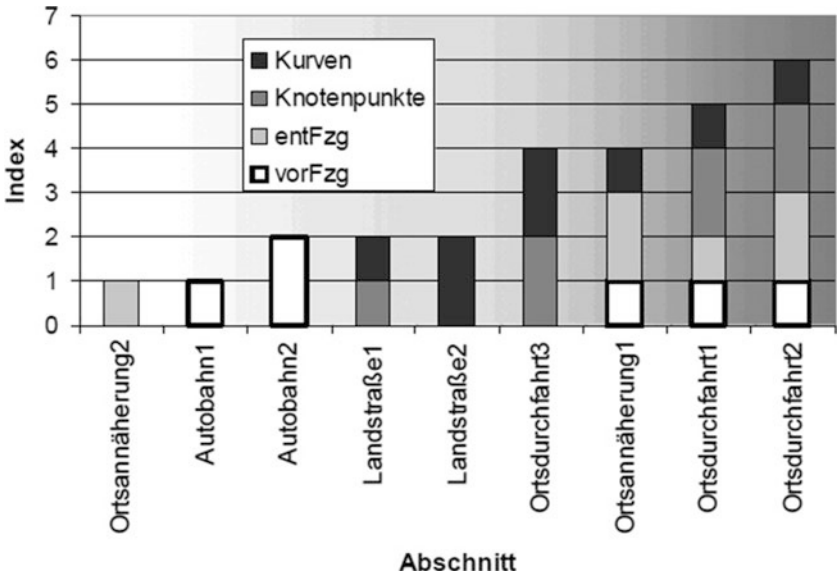


Abb. 3.57 Zusammensetzung des Komplexitätsindex für einzelne Streckenabschnitte (nach Schweigert 2003)

- Beobachten von Fußgängern, die in den Verkehrsbereich treten,
- Blick in den Rückspiegel bei bestimmten Manövern

vollkommen erfüllt werden. Der sog. Schulterblick wird nur zu 76 % durchgeführt, Verkehrszeichen zur Geschwindigkeitsvorschrift und Tachometer nur zu 64 %. Ampeln werden zu 90 % und Gefahrenschilder nur zu 45 % beachtet. Viele weitere Verkehrszeichen werden noch sehr viel weniger beachtet.

Das Blickverhalten hängt erheblich vom durchfahrenen Streckenabschnitt und der aktuellen lokalen Verkehrssituation ab. Komplexere Streckenabschnitte weisen im Mittel kürzere Fixationsdauern und häufigere Wechsel auf, da hier offensichtlich mehr Information pro Zeiteinheit aufgenommen werden muss. Besonders kurz (ca. 0,4 s) sind dabei die Blicksequenzen auf für die Fahraufgabe irrelevante Objekte und suchende Fixationen (Scanning), während gezielte Fixationen (Processing), die besonders häufig der Informationsaufnahme für die Antizipation des zukünftigen Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer dienen, länger sind (ca. 0,8 s und mehr). Alle Fixationsdauern bleiben jedoch unter dem Grenzwert von 2 s. Das gilt auch für die eye-off-road-times. Es zeigt sich auch, dass Blickzuwendungen, die aufgrund des gegebenen Streckenabschnittes oder der Verkehrssituation als unnötig erachtet werden, auch unterbleiben: so wird auf Streckenabschnitten mit nur einer Fahrspur, bei denen ein Überholt-werden so gut wie ausgeschlossen ist, überhaupt nicht in den Rückspiegel geblickt; bei Kolonnenverkehr spielt die regelmäßige Kontrolle des Tachometers eine sehr untergeordnete Rolle. Bei den kontinuierlichen visuellen Aufgaben scheinen die Fahrer aus dem peripheren Sehvermögen genügend Information ableiten zu können, um irrelevante Blicke zu vermeiden (z. B. Beobachten von Parkverbotsschildern, wenn man nicht auf Parkplatzsuche ist). Auch an Knotenpunkten, an denen man selbst die Vorfahrt besitzt, wird seltener nach anderen Verkehrsteilnehmern geblickt.

Durch eine optische bzw. akustische Zusatzaufgabe[46] sollte der Einfluss der Bedienung bzw. der Beachtung von Zusatzgeräten auf das Blickverhalten untersucht werden. Durch die Erfüllung der Fahr-

46 Es wurde eine visuelle Aufgabe konzipiert, bei der der Fahrer auf einem in Armaturenbrettmitte montierten Display aus zufällig dargebotenen geometrischen Figuren eine bestimmte erkennen musste und durch Tastendruck am Lenkrad bestätigen musste, wobei das Weiterschalten zur nächsten Aufgabe durch Betätigung einer anderen Taste der Versuchsperson selbst überlassen blieb. Die akustische Aufgabe bestand darin, aus zufällig dargebotenen einsilbigen Wörtern, dasjenige durch Tastendruck zu erkennen, das ein Lebewesen darstellt. Auch in diesem Fall konnte die Frequenz der Aufgabendarbietung durch die Versuchsperson selbst gesteuert und jederzeit bei schwieriger Verkehrssituation unterbrochen werden.

aufgabe kann aber auch die Erfüllung der Zusatzaufgabe beeinträchtigt werden. Die Überprüfung zeigt jedoch, dass sich die Qualität der Zusatzaufgabe im Stand und während der Fahrt nicht unterschieden und immer zwischen 92 % und 98 % lagen. Bezüglich der Hauptaufgabe des Fahrens zeigt sich bedingt durch die auditive Zusatzaufgabe ein starker Qualitätseinbruch nur beim Sicherungsverhalten (z. B. Schulterblick). Bei der visuellen Zusatzaufgabe verschlechtert sich die Fahrqualität dagegen in allen Kategorien. Zur Kompensation wird bei 30 % der Fahrten mit auditiver Zusatzaufgabe und bei 39 % der Fahrten mit visueller Zusatzaufgabe der Längsabstand vergrößert. Veränderte Fixations- und Blickdauer zeigen sich nur bei den auditiven Aufgaben mit einem extrem hohen Anteil an Fixationen über 2,5 s, was bei der visuellen Zusatzaufgabe nicht zu beobachten war. Ansonsten zeigen sich keine Veränderungen in den Verteilungsformen der Blickhäufigkeiten. Allerdings sinken bei der Bearbeitung der visuellen Aufgabe in allen Kategorien die mittleren Fixationsdauern um 26 %, da die Versuchspersonen offensichtlich für die Erfüllung der Zusatzaufgabe Zeit zu gewinnen trachten. Bei der auditiven Zusatzaufgabe steigen hingegen die Blickdauer in Geradeaus-Richtung um ca. 50 %. Dabei ist auf allen Streckenabschnitten ein auffallend hoher Anteil an Fixierungen zu beobachten, die länger als 2 s dauern. Fixationen von mehr als 2 s Länge sind bei der auditiven Zusatzaufgabe, genauso wie bei Fahrten ohne Zusatzaufgabe, vor allem auf das vorausfahrende Fahrzeug gerichtet, während sie bei der visuellen Zusatzaufgabe dem Display gewidmet sind. Die Abwendung zum Display bei der visuellen Aufgabe zeigt für sehr komplexe Verkehrssituationen einen ausgeprägten Modalwert bei 0,5 s. Bei niedrig-komplexen Abschnitten (Definition siehe Abb. 3.57) zeigen sich zwei Spitzen bei 0,5 und 1 s, bei sehr niedrigem Komplexitätsindex der Verkehrssituation sogar noch mehrere Maxima bei 0,5, 0,9, 1,1, 1,3 und 1,6 s. Offensichtlich ist der Fahrer bei sehr niedriger Komplexität geneigt, nicht nur eine, sondern hintereinander sogar mehrere tertiäre Aufgaben durchzuführen.

Neben der soeben behandelten kontinuierlichen Fahraufgabe, die die regelmäßige Beobachtung der eigenen Spurhaltung und des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer umfasst, gibt es noch eine Reihe situationsspezifischer Aufgaben, wie Beobachten des voraus fahrenden Fahrzeugs, Schulterblick vor dem Überholen und Durchfahren einer engen Spur, die sich dadurch auszeichnen, dass nur ein enges Zeitfenster existiert, innerhalb dessen die Fixationen, Blicke oder Blicksequenzen erfolgen müssen. In Verbindung mit einer Zusatzaufgabe wird nur in wenigen Fällen der Erfüllungsgrad der ungestörten Aufgabe erreicht. Besonders starke Einbußen sind zu verzeichnen bei Aufgaben wie Beobachten von Fußgängern und Suchen nach einem möglichen Fahrzeug an einem Knotenpunkt.

Generell ist festzustellen, dass durch die Zusatzaufgabe der Zeitanteil auf irrelevante Blickobjekte abnimmt, wobei diese Reduzierung bei der akustischen Aufgabe 65 % beträgt und bei der optischen Aufgabe sogar 96 %. Dies belegt, dass durch die Zusatzaufgabe sozusagen „nichts mehr für sonstige Blicke übrig bleibt". Der Anteil von Fahrten ohne einen einzigen Spiegelblick steigt bei beiden Zusatzaufgaben an. Dabei bezieht sich der Unterschied zwischen Zusatzaufgabe und „Normalfahrt" nicht darauf, wie oft in den Spiegel geblickt wird, sondern darauf, ob überhaupt ein Spiegelblick erfolgt. Das gleiche gilt auch für den Tachoblick.

Zwischen dem Fahrfehler „ungenaue Spurführung" und den Blickmaßen der maximalen bzw. mittleren Abwendungsdauer kann eine relativ hohe Korrelation ($r^2 = 0{,}84$) festgestellt werden, wobei schon mittlere Abwendungsdauern von 0,3 bis 0,6 s bei 60 % der Fahrten zu ungenauer Spurführung führen, während bei Blickabwendungsdauern von 1,2 bis 1,5 s bei allen Fahrten (100 %) Spurführungsfehler zu beobachten sind. Es besteht allerdings kein Zusammenhang zwischen Abwendungsdauer und ruckartigen Lenkkorrekturen.

Zusatzaufgaben haben, ob optisch präsentiert oder akustisch, auf unterschiedliche Weise negativen Effekt auf das Blickverhalten bezüglich der Fahraufgabe. Bei der optischen Zusatzaufgabe kommt vor allem zum Tragen, dass nun die für sie benötige Blickzeit mit der für die Fahraufgabe geteilt werden muss, bei der akustischen Zusatzaufgabe zeigt sich demgegenüber eine Verengung des Blickverhaltens auf nur fahrrelevante Anteile.

Autofahrer blicken nicht nur verkehrsrelevante Objekte an. Die Untersuchung von Schweigert weist u. a. aus, dass bei ungestörtem, wenig komplexen Fahren fast 90 % der Blicke nichtfahrrelevanten

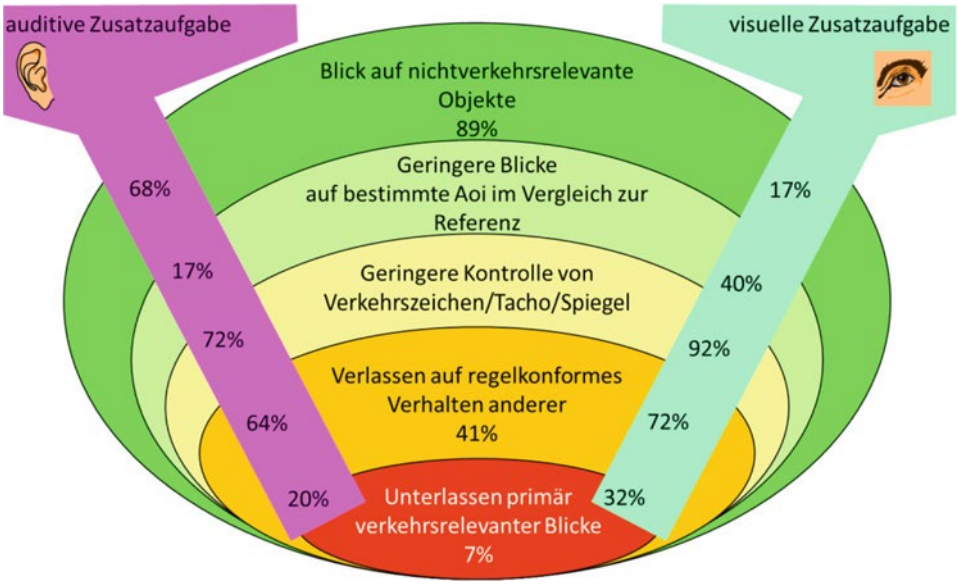


Abb. 3.58 Anteil fehlerhaften Blickverhaltens (Schweigert 2003)

Dingen gehören. Dieser Anteil reduziert sich bei der akustischen Nebenaufgabe auf nur noch 68 % und bei der optischen Nebenaufgabe sogar auf 17 %. Man kann die nichtfahrrelevanten Blicke geradezu als einen Gradmesser für die Komplexität einer Fahrsituation ansehen, ein Gradmesser, der allerdings nur im Mittel über längere Versuchsperioden eine Aussagekraft besitzt, nicht in der akuten Situation. Mit zunehmender Komplexität nehmen die nichtfahrrelevanten Blicke zunehmend ab. Dies kann in dem in Abb. 3.58 dargestellten schalenförmigen Kompensationsmodell veranschaulicht werden. Von außen nach innen kennzeichnen diese Schalen mit zunehmende Komplexitätsindex der Situation folgendes kompensatorisches Verhalten:

1. Abnahme der Beachtung nichtverkehrsrelevanter Objekte,
2. Verringern der Blickdauer auf bestimmte Aoi's (areas of interest),
3. Geringere Kontrolle von Verkehrszeichen, Tacho und Spiegel,
4. Verlassen auf regelkonformes Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer,
5. Unterlassen primär verkehrsrelevanter Blicke.

Je nach optischer bzw. akustischer Zusatzaufgabe nehmen diese kompensatorischen Handlungen noch zusätzlich zu, wobei der Prozentsatz bei der akustischen Zusatzaufgabe insgesamt etwas niedriger ist.

Aus alledem kann gesehen werden, dass die Gegenwart der Gegenwart, welche eine Dauer von ca. 2 Sekunden umfasst, große Bedeutung für unser Blickverhalten hat. Alle Experimente zum Blickverhalten beim Autofahren zeigen, dass normalerweise nur in einer Entfernung von 1 bis 1.5 s, maximalen 2 s voraus Information abgetastet wird (Entfernung = Geschwindigkeit × Vorschau-Zeit; Donges 1978; Yuhara et al. 1999; Guan et al. 2000; Schweigert 2003). Und es gibt viele experimentelle Ergebnisse, die zeigen, dass wir normalerweise akzeptieren, die Sicht bis zu zwei Sekunden von der Straße zu nehmen (z. B. Zwahlen et al. 1988; Gengenbach 1997; Schweigert 2003). Gengenbach (1997) konnte zeigen, dass nach dem Abwenden der gefühlte Verlust an Information durch eine vergrößerte Abtastungsrate wieder wettgemacht wird (siehe Abb. 3.59).

In einer weiteren Untersuchung wurde von Rassl (2004) im Detail der Einfluss der tertiären Aufgabe und verschiedener Bedien-Layouts solcher Aufgaben auf das Blickverhalten untersucht. Neben anderen mussten seine Versuchspersonen mittels eines Drehdrücksteller (ähnlich dem BMW-I-Drive) eine von 3, 5, 8, oder 14 Alternativen während des Fahrens auswählen. Es ist von Interesse, dass die

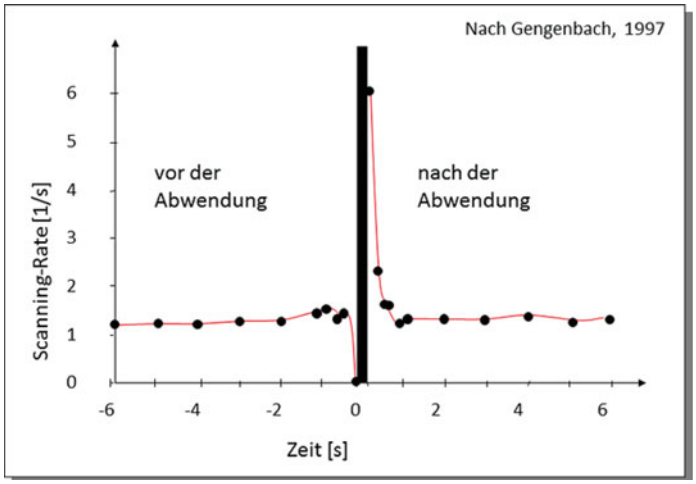


Abb. 3.59 Scanning-Verhalten vor und nach einer Blickabwendung von der Straße (nach Gengenbach 1997)

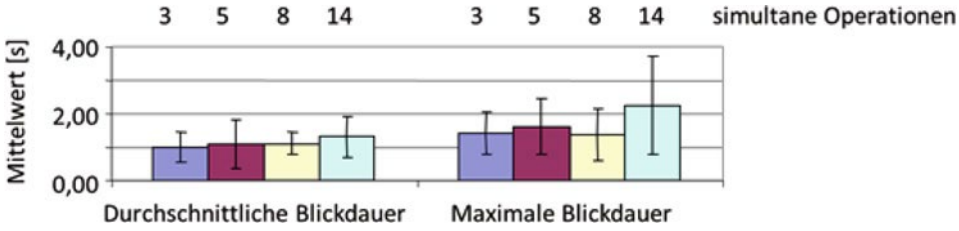


Abb. 3.60 Blickverhalten in Verbindung mit tertiären Fahraufgaben (nach Rassl 2004)

Auswahl im Durchschnitt ungefähr 1,2 Sekunden benötigte und es keinen bedeutenden Unterschied zwischen diesen Abweichungszeiten in Abhängigkeit von der Zahl der präsentierten Alternativen gibt. Wenn man jedoch die maximale Dauer von Abwendungsblicken betrachtet, unterscheidet sich der Fall von 14 Alternativen signifikant von den anderen. Die mittlere maximale Ablenkungszeit ist bei 14 Alternativen zwar auch durchschnittlich nur 2,2 Sekunden. Wie aber Abb. 3.60 zeigt, wurden in diesem Fall aber sporadisch sogar Ablenkungszeiten von 12 Sekunden beobachtet.

Das ist kein singuläres Ereignis. In den Untersuchungen von Rassl wurde in einem anderen Teil des Experimentes sogar die Ablenkung von 16 Sekunden beobachtet und in weiteren nicht veröffentlichten Experimenten zur Bedienung des ACC-Systems wurden ebenfalls Ablenkungszeiten von bis zu 12 Sekunden gefunden. Die psychologische Erklärung für diese langen Dunkelperioden liegt in der bereits angesprochenen Gegenwartserfahrung. Normalerweise sind wir nach zwei Sekunden der Ablenkung beunruhigt und wenden den Blick zurück auf die Straße. Wenn wir jedoch zu Beginn der Ablenkung von der Szene den Eindruck hatten, dass keine großen Änderungen zu erwarten sind, und wenn zusätzlich die ablenkende Aufgabe – aus welchen Gründen auch immer – attraktiv wird, benutzen wir in seltenen Fällen die Gesamtperiode zwischen der Gegenwart der Vergangenheit und der Gegenwart der Zukunft. In keinen dieser Fälle nehmen wir subjektiv die lange Ablenkungszeit von der Straße wahr, weil uns durch das innere Modell der zu Beginn angenommene Verlauf der Szene auf der Straße subjektiv gegenwärtig ist.

3.3.2.2 Blickverhalten ohne Querverkehr

Bubb und Wohlfahrter (2012) haben sich näher mit den Scanning- und Processing-Blicken beim Kurvenfahren befasst. Die Versuche wurden im Simulator des Lehrstuhls für Ergonomie durchgeführt, der mittels der Silab-Software und einer 180° Projektion dem Versuchsfahrer ein sehr realistisches Bild liefert. Die Silab-Software erlaubt es, die Versuchsperson gezielt in eine bestimmte Situation zu bringen, unabhängig von ihrem zuvor zutage gelegten Verhalten.

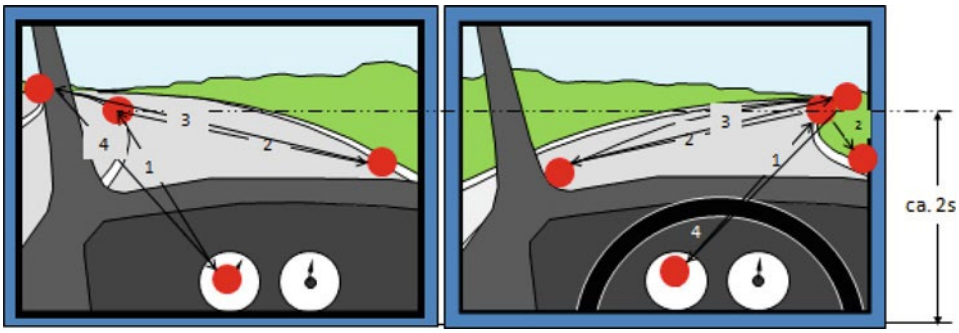


Abb. 3.61 Typische Blickfolge in einer Links- und einer Rechtskurve

Die Blickfolgen, die individuell und auch bedingt durch die augenblickliche Situation zunächst regellos und zufällig erscheinen, lassen mittels der Markov-Analyse mit dem Signifikanztest nach Liu (1998) die Regelmäßigkeit, die sich doch bei allen Versuchspersonen zeigt, sichtbar werden. Als wichtigste Ankerpunkte haben sich dabei der Bereich des Tangentenpunkts, der nahe, der mittlere und der entfernte Straßenbereich, die Geschwindigkeitsanzeige, Verkehrsschilder und, wenn vorhanden, ein vorausfahrendes Fahrzeug, Gegenverkehr und ein in der Simulation vorhandenes Pannenfahrzeug herausgestellt.

Beim Kurvenfahren lassen sich grob die Abschnitte „Kurve anfahren und orientieren", „Blickverhalten in der Kurve" und „Blickverhalten beim Verlassen der Kurve" unterscheiden. Das typische Verhalten ist in der Abb. 3.61 illustriert. Danach blickt der Fahrer in der Einfahrphase zunächst auf den Tachometer, um sich zu versichern, ob die Geschwindigkeit für den abgeschätzten Kurvenradius adäquat ist. Der nächste Blick ist auf den Tangentialpunkt der Kurve gerichtet (bei einer Linkskurve ist dies – normalerweise – der Mittelstreifen, bei einer Rechtskurve der rechte Straßenrand). Er dient unter anderem der Antizipation der Kurve und wird im Mittel 2 s vor Kurveneintritt fixiert. Die Antizipationszeit verlängert sich (das heißt, der Tangentenpunkt wird früher fixiert) besonders mit zunehmender Einschränkung der Sicht durch irgendwelche Gegenstände, beispielsweise einen vorausfahren Lkw. Der nächste Blick überprüft den Abstand zum rechten Straßenrand (bei der Rechtskurve kann dies bei einigen Versuchspersonen auch zunächst der Abstand zum linken Mittelstreifen sein). Der nächste Blick versichert sich dann des Abstands zur jeweiligen Gegenseite. Nun folgt nochmals ein Kontrollblick auf den Tachometer.

In einer weiteren Simulatorstudie zum Sichtverhalten konnte Remlinger (2013) feststellen, dass es von diesem „Normblickverhalten" signifikante Abweichungen gibt. Auf der Grundlage von Versuchen mit 40 Probanden konnte er vier Blickverhaltenstypen beobachten, nämlich

- Blicktyp „Innen", der das oben und auch sonst in der Literatur geschilderte Verhalten wiedergibt, wonach der Blick beim Kurvenfahren auf den jeweiligen inneren Rand der Kurve gerichtete wird (60 % der Versuchspersonen),
- Blicktyp „Außen", der Personen charakterisiert, die sich prinzipiell am jeweiligen Kurvenaußenrand orientieren (12,5 % der Versuchspersonen),
- Blicktyp „Links", repräsentiert durch Personen, die sich – unabhängig von der Richtung der Kurve – prinzipiell am linken Rand der Fahrspur orientieren (10 % der Versuchspersonen),
- Blicktyp „Rechts", repräsentiert durch Personen, die sich prinzipiell am rechten Rand der Fahrspur orientieren (17,5 % der Versuchspersonen).

Folgefahrtsituationen zeichnen sich nach Bubb und Wohlfahrter (2012) durch eine ausgeprägte Blickbindung an das vorausfahrende Fahrzeug aus. Dies zeigt sich verstärkt bei einem vorausfahrenden Lkw (siehe Abb. 3.62).

In einer weiteren Untersuchung im Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ergonomie der TU-München wurden 35 Probanden durch einen Überland- und Stadtkurs geleitet (Bubb und Wohlfahrter 2012). Dabei wurden unter anderem Blickuntersuchungen bzgl. des peripheren Sehens durchgeführt. Nach

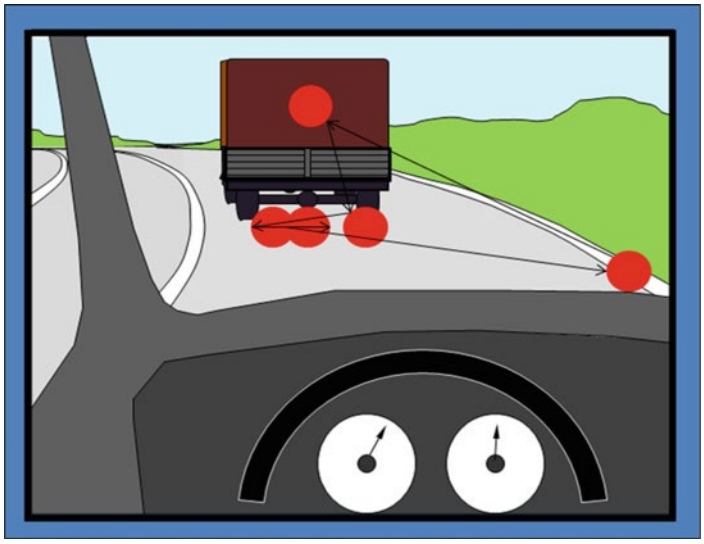


Abb. 3.62 Typische Blickfolge beim Fahren hinter einem vorausfahrenden Fahrzeug.

Abb. 3.63 Auf der linken Seite befindet sich die Werbetafel. Rechts ist das Tempolimit-Schild zu sehen. Es ist völlig freistehend und jederzeit einsehbar

speziellen Szenen wurden die Probanden zur Aufgabe befragt. In einer Szene mussten die Probanden einen Text auf einer Werbetafel lesen mit der zusätzlichen Aufgabe, die eigene Fahrgeschwindigkeit gemäß der aktuell geltenden Geschwindigkeitsbegrenzung zu halten. Die Szene befindet sich in einer leichten Rechtskurve. Abbildung 3.63 zeigt diese Szene. Auf der rechten Seite befindet sich ein Verkehrsschild („60 bei Nässe“).

Die Begrenzung „60 km/h bei Nässe“ wird nur von 14,3 % (5 Probanden) der Fahrer korrekt erkannt, obwohl das Verkehrszeichen leicht sichtbar, freistehend und in keinem Augenblick verdeckt ist (siehe Abb. 3.63). Der Workload ist offensichtlich für einen Großteil der Probanden in dieser Szene sehr hoch. Innerhalb der Blickanalyse fällt auf, dass während der Fixation der Werbetafeln kaum Kontrollblicke auf die Fahrbahn stattfinden, wie sie gemäß den in Abb. 3.54 wiedergegebenen „normalen“ Blickverhalten zu erwarten sind. Dies bestätigt zwar, dass die Spurhaltung über die periphere Wahrnehmung trotz Kurvenfahrt relativ problemlos möglich ist, doch erhöht dies auch den Winkelabstand zum Verkehrszeichen und verringert damit offenbar die Wahrnehmungswahrscheinlichkeit.

13 Versuchspersonen haben die 60 km/h Begrenzung über eine oder mehrere Blicke fixiert. Jedoch haben von diesen Teilnehmern nur 40 %

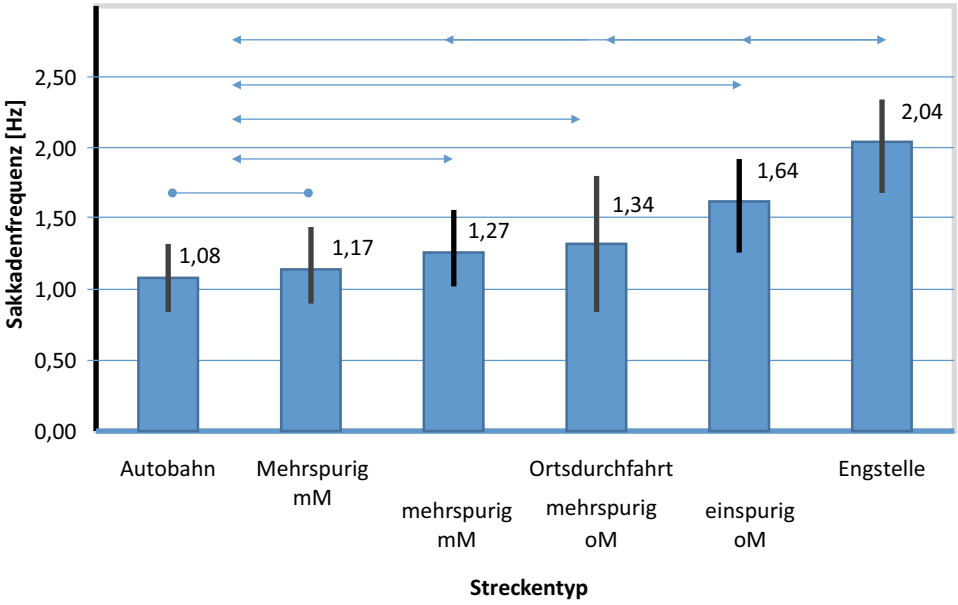


Abb. 3.64 Mittlere Sakkadenfrequenz über alle Versuchspersonen in Abhängigkeit vom Streckentyp. Die Pfeile im oberen Teil der Abbildung zeigen an, zwischen welchen Kategorien ein signifikanter ($\alpha < 5\,\%$) Unterschied beobachtet worden ist.

das Zusatzschild „bei Nässe" korrekt erkannt. Daraus kann abgeleitet werden, dass das Zusatzschild „bei Nässe" nicht als wichtiges Schlüsselelement identifiziert wird. Überraschenderweise haben die Fahrer, die nur das Tempolimit wahrgenommen haben, nicht einmal die Existenz eines Zusatzschildes bemerkt (Fragebogen nach der Szene). Diese Information wurde damit offenbar als nichtrelevant vom Wahrnehmungssystem aussortiert. Dieses Beispiel zeigt, dass für die Wahrnehmung von Details unbedingt eine Blickzuwendung notwendig ist.[47]

In einer weiteren Untersuchung wurden 23 Versuchspersonen in einem Feldversuch mit einem Blickerfassungssystem (Dikablis) beobachtet. Die Versuchspersonen durchfuhren ausgesuchte Streckenabschnitte und mussten einer vorgegebenen Fahrroute folgen. Die Streckenabschnitte waren sehr vielfältig und reichten von kleinen Rechts-vor-Links-Situationen bis zur Überquerung von großen Kreuzungen im Stadtbereich. Besonders die Auswertung von Engstellen (einspurige Nebenstraße mit parkenden Fahrzeugen), zeigt, wie dort einzelne Informationseinheiten am Straßenrand in kürzeren Abständen aufgefrischt werden müssen, um nichts Wichtiges zu übersehen. In Abb. 3.64 ist die Sakkadenfrequenzen für die unterschiedlichen Streckentypen wiedergegeben.

Auf den Streckenabschnitten „Autobahn" und „mehrspurig mit Markierungen" wird die gleiche Anzahl an Sakkadensprüngen benötigt (Signifikanz $\alpha = 0{,}356$). Auf allen anderen Fahrbahntypen unterscheiden sie sich signifikant voneinander. Die Sakkadenfrequenz ist also abhängig vom visuellen Anspruch des Streckentyps. Je höher der visuelle Anspruch und damit verbunden je höher der Bedarf zur Informationsaufnahme, umso größer wird die Sakkadenfrequenz (das ist ein Ergebnis, das auch schon bei der Blickabwendung und der erneuten Blickzuwendung auf die Straße sichtbar geworden ist; siehe Abb. 3.59). Bei Autobahnen – wie auch bei mehrspurigem Stadtverkehr mit Fahrbahnmarkierungen – wird außer der Fahrbahn selbst und dem umgebenden Verkehr keine zusätzliche Information benötigt, um die Fahrstrategie festzulegen. Dies bedeutet, dass die Situation durch Fahrbahnmarkierungen und den umgebenden Verkehrsfluss eindeutig geregelt ist. Bei Ortsdurchfahrten ist

47 Die Ergebnisse dieses Versuchs zeigen, welch wirkungsvolle Unterstützung eine Verkehrszeichenerkennung und die Darstellung des Piktogramms im I-Kombi oder Head-Up-Display darstellen würde.

einerseits der zur Verfügung stehende Fahrraum enger, d. h. das Bedrohungspotential durch andere Verkehrsteilnehmer steigt. Deshalb müssen Informationen aus der Umwelt mit höherer Frequenz aufgefrischt werden. Andererseits ist es erforderlich, eine Vielzahl von Sekundärinformationen wie z. B. Fußgänger, Gegenverkehr, Ampeln usw. zu erfassen. Der Fahrer muss folglich mehrere Informationsquellen zur Einschätzung der Situation beachten. Ein weiterer Aspekt, der die mentale Belastung mitbestimmt, ist die Alltäglichkeit einer Situation. Kommt der Fahrer beispielsweise in ungewohnte Situationen, in denen ihm wichtige Informationsquellen fehlen (z. B. fehlender Mittelstreifen), sucht er in der Umgebung nach visuellen Hilfen, die ihn bei der Einschätzung der Situation unterstützen. Aufgrund der Suchblicke ergibt sich eine gesteigerte Sakkadenfrequenz, wie sie bei den Streckentypen „mehrspurig oM: mehrspurig ohne Markierung" und, „einspurig oM: einspurig ohne Markierung" zu finden ist. Die vergleichsweise hohe Sakkadenfrequenz von 2 Sakkaden pro Sekunde bei der Engstelle ist darauf zurückzuführen, dass sich der Fahrer ständig abwechselnd am linken und rechten Rand der Engstelle orientiert, um Kollisionen zu vermeiden. Objektiv ist dabei auch eine leichte Schlingerbewegung des Fahrzeugs zu beobachten.[48]

3.3.2.3 Blickverhalten an Kreuzungen

Neben den Unfällen im reinen Längsverkehr, die im Wesentlichen aus Abweichen von der Fahrbahn mit den möglichen Folgen und Auffahrunfällen bestehen, spielen eine ebenso große Rolle die Unfälle an Kreuzungen. In Europa sind – abhängig vom Land – Kreuzungen für 30 bis 60 % aller Unfälle mit Verletzungsfolge verantwortlich (Intersafe 2009). Davon geschehen Unfälle außer Orts zu erstaunlichen 42 % an gut einsehbaren Kreuzungen.

Eines der wenigen Experimente, das sich mit Blickbewegungen an Kreuzungen befassen, stammt von Langham (2006). Unter anderem beobachtete er die Unterschiede zwischen erfahrenen Fahrer und Anfängern, wie sie schon Underwood et al. (2003) für das Fahren auf der Landstraße fand, nämlich, dass erfahrene Fahrer weniger als Anfänger konkrete Punkte fixieren, sondern eher breitere Bereiche abscannen. Auch in der Fixations-Folge zeigen sich Unterschiede in der Form, dass Anfänger eher Objekte in einer klaren Reihenfolge fixieren, während Erfahrene die Blicke zwischen verschiedenen Fixationsrichtungen springen lassen. Allerdings spielt dabei die Geschwindigkeit der Abtastung eine herausragende Rolle. Plavšic et al. (2010) zeigte in Simulatorexperimenten, dass eine mittlere Abtastgeschwindigkeit am günstigsten ist. Bei den Versuchen konnten zwei Gruppen von Probanden, die einen Kreuzungsunfall verursachten, separiert werden, nämlich solche, welche die Szene relativ langsam scannten und solche, welche die Szene unwirksam schnell scannten. Offensichtlich führen zu viele und zu schnelle Sakkaden zu Unterdrückungen von Sehwahrnehmung und zu wenige Sakkaden zu einer ineffizienten Erfassung der Szene.

Plavšic (2010) hat sich mit dem Verhalten und hier speziell dem Blickverhalten an Kreuzungen im Detail auseinandergesetzt, wobei erneut der oben genannte Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ergonomie der TUM zum Einsatz kam. Gegenstand ihrer Untersuchung war, den Einfluss von Vorfahrtsregelungen, die Art des notwendigen Fahrmanövers (gerade- aus, links/rechts Abbiegen), den Einfluss eines vorausfahrenden Fahrzeugs und den von Zeitdruck zu untersuchen. Diese Faktoren wurden aus einer theoretischen Analyse als die Haupteinflussgröße auf das Unfallgeschehen an Kreuzungen gewonnen (Plavšic et al. 2009). Auf der Grundlage dieser Untersuchungen wurde eine Versuchsstrecke konstruiert, die aus 10 Kreuzungssituationen besteht. Dazu wurden die Manöver (geradeaus, rechts und links Abbiegen), die Vorfahrtsregelung (Vorfahrt haben, Vorfahrt gewähren, Stopp-Schild und Rechts-vor-links) und die Gegenwart eines vorausfahrenden Fahrzeugs variiert.

48 Durch dieses Verhalten wechseln die Fahrer ihr Regelverhalten. Es wird der seitliche Abstand und nicht mehr die Längsorientierung des eigenen Fahrzeugs geregelt. Im Sinne der Überlegungen in Abschn. 2.4.1 ändert sich für den Fahrer somit die Fahraufgabe von der leichter zu bewältigenden Geschwindigkeitssteuerung in die schwieriger zu handhabende Beschleunigungssteuerung. Es konnte gezeigt werden, dass dieser Effekt wegfällt, wenn in der Engstelle ein Fahrzeug vorausfährt, wodurch wieder die Konzentration auf die Längsorientierung erreicht wird. Versuche von Israel (2012) zeigen zudem, dass dieser Effekt auch durch die Anzeige des Sicherheitsabstandes in Form eines in der entsprechenden Entfernung ($x_s = v \cdot t_s$ mit $t_s = 1.5_s$) virtuell auf der Fahrbahn liegenden Querbalkens im sog. kontaktanalogen HUD (Bubb 1981) dauerhaft zur Verfügung gestellt wird (siehe hierzu Abschn. 6.3.1.2).

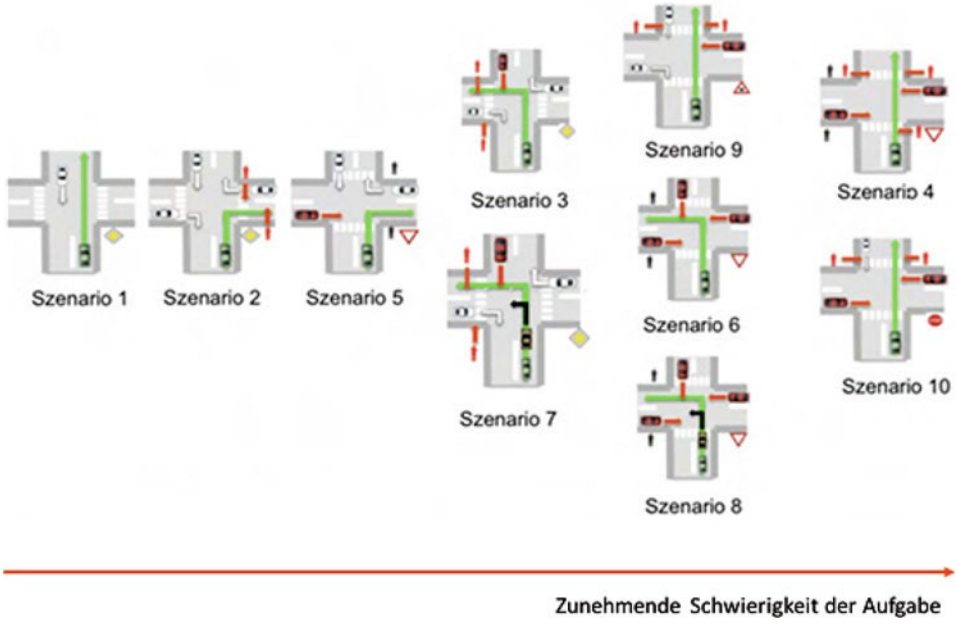


Abb. 3.65 Kreuzungsszenarien, die in der Untersuchung von Plavšic angewendet wurden, nach dem Schwierigkeitsgrad geordnet.

Auf dieser Grundlage und der weiteren Einteilung der notwendigen Blicke nach Schweigert (2003) in „wesentlich", „wichtig", „vorausschauend" und „irrelevant" werden für die einzelnen Szenarien Triggerpunkte gesetzt, die ein normatives Blickverhalten festlegen. Das beobachtete Verhalten wird dann daran gespiegelt.

Um den Anspruch der Aufgabe festzulegen, werden die Verkehrssituationen gemäß der Überlegungen von Miller et al. (1956) in „Chunks" gebündelt. Chunks sind hierbei Verkehrsteilnehmer, die sich quasi gleichförmig bewegen und die somit aus der Sicht des Fahrers als eine Einheit behandelt werden können. Durch je mehr solcher voneinander unabhängiger Chunks eine Verkehrssituation beschrieben werden muss, umso komplexer ist sie für den Fahrer[49]. Dabei ist noch zusätzlich zu unterscheiden zwischen Chunks, auf die der Fahrer unmittelbar zu reagieren hat und solchen, die er nur zu beobachten hat. Auf der Grundlage dieses Gedankens entwickelt Plavšic ein Verfahren, mit dem die Komplexität einer Verkehrssituation beschrieben werden kann. Damit ist eine Rangfolge der Schwierigkeit der in den Experimenten verwendeten Szenarien möglich. Die untersuchten Kreuzungs-Situationen und deren Bewertung sind in Abb. 3.65 skizziert.

Generell kann ideales Fahrverhalten als Verhalten beschrieben werden, welches der gesetzlichen Regulierung entspricht. Dennoch gibt es für jede Verkehrssituation eine Spannweite des korrekten Verhaltens. Um dies alles festzulegen, wurde der Kreuzungsbereich in fünf Segmente unterteilt: Annäherung, Verzögerung, Durchfahren, Abbiegen und Verlassen der Kreuzung. In jedem Bereich ist eine regelbasierte Entscheidung nötig. Sowohl die Entscheidungen als auch die Aufgaben und deren Wichtigkeit wurden für jede Kreuzung und jeden Bereich bestimmt. Eine Fehleranalyse wird durch den Vergleich zwischen definiertem und tatsächlichem Fahrverhalten durchgeführt. Die Detailaufgaben, die in jedem Segment durchzuführen sind, werden bei Plavšic (2010) ausführlich dargestellt.

Mit dem Simulator war es möglich, die Verkehrssituation in Abhängigkeit von dem Verhalten

49 Der Unterschied zu der Komplexitätsdefinition von Schweigert ist, dass in einem Simulatorexperiment die Komplexität wie beschrieben definiert werden kann. In einem Real-Live-Experiment ist es demgegenüber extrem schwierig, die Komplexität von Situationen entsprechend der Plavšic'schen Definition zu kategorisieren.

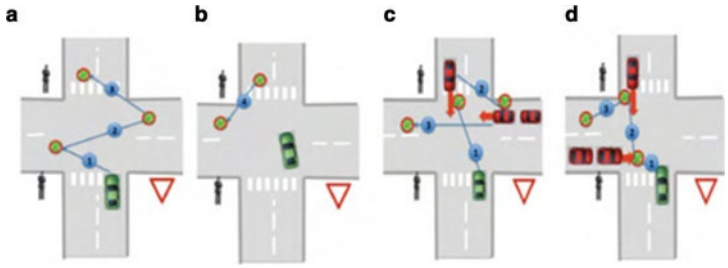


Abb. 3.66 Typische Blicksequenz in Scenario 6 für (**a**) Durchfahren, wenn keine anderen Verkehrsteilnehmer vorhanden sind, **b** Abbiegen, wenn keine anderen Verkehrsteilnehmer vorhanden sind, **c** Durchfahren mit entgegenkommendem und von rechts kreuzendem Verkehr , **d** Durchfahren mit entgegenkommendem und von links kreuzendem Verkehr

der Versuchsperson zu steuern. So war zu garantieren, dass jede Versuchsperson in die gleiche Verkehrssituation kam.

Die Versuche wurden mit 24 Versuchspersonen (Durchschnittsalter 27 Jahre, 3 Frauen, 21 Männer) durchgeführt. Nachdem die Versuchspersonen die ersten Testrunden durchfahren hatten, wurden ihnen die einzelnen Szenen zu einer Beurteilung vorgeführt. Dann wurde der Versuch unter Zeitdruck wiederholt. Diesem schloss sich wieder eine subjektive Beurteilung der einzelnen Szenarien an.

Die Ergebnisse der Versuche werden in subjektive Daten – erhalten von der Auswertung der Fragebögen – und objektive Daten (Fahrsimulator, Blickerfassungssystem) eingeteilt. Bei den *subjektiven Daten* zeigt sich nach dem NASA-TLX-Fragebogen (siehe ▶ Abschn. 11.3.3.1), dass das Überqueren einer Kreuzung eine sehr herausfordernde Aufgabe ist. Es zeigt sich zudem ein signifikanter Unterschied in der Belastung zwischen der Baseline und der Fahrt unter Zeitdruck. Ansonsten konnten praktisch keine Unterschiede bei der subjektiven Einschätzung der Aufgabenschwierigkeit, der Orientierung, der Fehleinschätzung und des Risikos einer Kollision bei den verschiedenen Szenarien festgestellt werden. Die Versuchspersonen würden sich zwar ein Assistenzsystem für die Bewältigung von Kreuzungen wünschen, haben aber keinerlei Idee, wie so etwas aussehen könnte.

Die *objektiven Daten* beziehen sich vor allem auf die Aufzeichnung und die Analyse der Blickbewegungen, hier besonders auf die Abweichung zwischen dem beobachteten Verhalten und dem theoretischen Idealverhalten. Es wird für jedes der 10 Kreuzungsszenarien das kritischste Verhalten im Detail dargestellt und Unterschiede nach statistischen Regeln festgehalten. Allgemeines Ergebnis ist, dass das Blickverhalten im Wesentlichen durch die Gegenwart anderer Verkehrsteilnehmer, nicht jedoch durch irgendwelche Kreuzungsparameter bestimmt wird. Wenn sich mehr als 3 oder 4 voneinander unabhängige Verkehrsteilnehmer bzw. Verkehrsteilnehmergruppen in der Szene befinden, ist das Verhalten sogar ausschließlich davon bestimmt. Trotzdem wird aber das aktive Absuchen der Szene durch die inneren Modelle des Fahrers und damit durch die Kreuzungsparameter bestimmt (siehe ▶ Abschn. 3.3.3). Dabei hat das beabsichtigte Manöver, das der Stabilisierung des Fahrzeugs dient, größeren Einfluss als die objektive Verkehrsregelung. Das Blickverhalten ist unabhängig von dem ausgeführten Manöver oder der Vorfahrtsregelung. Die Konsequenz ist, dass in komplexen Szenarien, die Blicke in vorfahrtsberechtigte Richtungen oft ausgelassen wurden. In Abb. 3.66 ist der Unterschied der Blicksequenzen ohne Fremdverkehr und mit Fremdverkehr für den Fall des Szenario 6 aus Abb. 3.65 dargestellt. Nennenswert ist auch die Tatsache, dass sehr häufig die gleichen Versuchspersonen den gleichen Fehlertyp begangen haben, sei es fehlende Fokussierung der Verkehrszeichen, das Auslassen von wichtigen Teilaufgaben oder die typische Anzahl von Blicken in bestimmten Phasen. Das unterstützt die Hypothese, dass ein hoher Anteil der Fehler systematischer Natur ist und deswegen auch verhindert werden könnte.

Eine Beschreibung der wichtigsten Ergebnisse pro Segment wird im Folgenden dargestellt. Detaillierte Ergebnisse sind bei Plavsic (2010) zu finden.

Annäherungsphase. In der Annäherungsphase fokussieren die Fahrer meistens einen mittleren (1 bis 2 s) oder weiteren (> 2 s) Fahrschlauch. In ca.

60 % der Fälle war der Fokus nur auf die rechte Seite der Fahrbahn gerichtet. Die wichtigsten Aufgaben in der Annäherungsphase sind antizipatorische Aufgaben. Dabei hat die Wahrnehmung der Verkehrszeichen und entsprechende Anpassung des Fahrverhaltens die höchste Priorität. Allerdings haben nur ca. 60 % der Versuchspersonen das regulierende Verkehrszeichen foveal fokussiert, mit Ausnahme des Stopp-Schilds. Der gravierendste Fehler war jedoch die nicht angepasste Geschwindigkeit (siehe hierzu ▶ Abschn. 3.4.2.2: „Struktureller Fehler").

Verzögerungsphase. Die Unfälle, die sich in der dritten und der vierten Phase ereignet haben, waren meistens schon durch begangene Fehler in der Verzögerungsphase gekennzeichnet. Die Diskrepanz zwischen idealem und tatsächlichem Verhalten war in dieser Phase sehr hoch. Die schwerwiegendsten Fehler waren das Auslassen von Blicken in Richtung schwächerer Verkehrsteilnehmer (Fußgänger, unabhängig davon, ob sie im Recht sind oder nicht, und nicht bevorrechtigte Fahrzeuge). Nur 15 % der Versuchspersonen haben sich vergewissert, dass der vorfahrtspflichtige Fremdverkehr die Vorfahrtsregelung einhält. Der Einfluss von Zeitdruck war in dieser Phase am stärksten, was oft zum Auslassen der wichtigsten Aufgaben geführt hat.

Abbiege Phase. Das Blickverhalten in dieser Phase ist durch die Fokussierung des Punktes charakterisiert, der sich in der Mitte der Fahrbahn (Ankerpunkt) befindet. Die Fokussierung auf diesen Punkt dient der besseren Stabilisierung des Fahrzeugs während des Abbiegemanövers (siehe auch ◘ Abb. 3.61). Die typische Blicksequenz bei Rechtsabbiegen war ein kurzer Blick nach links und dann ein Blick nach rechts. In 40 % der Fälle war auch ein Blick in die entgegenkommende Richtung vorhanden. Die typische Blicksequenz beim Linksabbiegen war ein Blick nach links, nach rechts, dann in die entgegenkommende Richtung und dann wieder nach links. Wenn die Probanden Vorfahrt hatten, war der Blick nach links nur in ca. 25 % Fallen vorhanden. Der Einfluss der anderen Verkehrsteilnehmer war sehr stark in diesem Segment. Häufig haben die Fahrer die falschen Blicksequenzen durchgeführt, was oft in einem Übersehen des vorfahrtberechtigten Verkehrs resultierte. Kreuzende Fußgänger werden hauptsächlich in dieser Phase gesehen, allerdings nur einer, auch wenn mehrere vorhanden sind.

Verlassen der Kreuzung. Die in diesem Segment begangenen Fehler waren nicht so kritisch wie die in den anderen Phasen. Allerdings rückversicherten sich die Fahrer in dieser Phase nicht mehr über das regelkonforme Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer.

Remlinger (2013) hat sich ausführlich mit dem Einfluss der A-Säulensichtverdeckung in Kreuzungssituationen beschäftigt. Durch die verfügbare Technik des Simulators am Lehrstuhl für Ergonomie war es möglich, verschiedene Kreuzungssituationen (immer mit einer im 90° Winkel querenden vorfahrtsberechtigten Straße) zu konstruieren, bei denen querender Verkehr in einer definierten Weise im Sichtschatten der linken bzw. rechten A-Säule gehalten wurde. Die Versuchssteuerung hielt das kollidierende Fahrzeug kurz vor der Kollision jeweils abrupt an, sodass für die Versuchsperson kein „Schreckeffekt" entstand. Es wurde ein geschicktes Szenario zusammengestellt, durch das der Versuchsperson der Gegenstand der Untersuchung verborgen bleibt. Die Versuche wurden mit 46 Probanden unterschiedlichen Alters und Körpergröße durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Versuchspersonen ganz deutlich in zwei Gruppen einteilen lassen, nämlich die sog. „Kreuzungsbremser", welche das Fahrzeug vor einer Kreuzung stark, fast bis zum Stillstand (< 30 km/h) abbremsen, und die „Kreuzungshuscher", die den Verkehr weit vorher beobachten, dann aber fast ohne Geschwindigkeitsminderung über die Kreuzung fahren. Die „Kreuzungsbremser" verursachten keine einzige Kollision, während bei den „Kreuzungshuschern" nur diejenigen (2 Versuchspersonen!) ohne Kollision blieben, die sich durch starke Kopfquerbewegung vor der Kreuzung auszeichnen. Interessant ist, dass selbst dann, wenn das querende Fahrzeug sichtbar ist, aber in „stehender Peilung" (d. h. aus dem Blickwinkel des Fahrers keine Relativbewegung zwischen Fahrzeug und A-Säule zu registrieren ist) zur rechten A-Säule bleibt, von einem Großteil der Probanden nicht wahrgenommen wird[50] (siehe auch ▶ Abschn. 7.3.1).

50 Durch die Versuche tritt ein Lerneffekt ein, sodass am Ende der Testfahrt weniger Kollisionen entstanden. Aus den Versuchen leitet Remlinger (2013) die Notwendigkeit eines entsprechenden Trainings in den Fahrschulen ab (nach Möglichkeit mit einem Simulator!), durch welches die Strategie des „Kreuzungsbremsens" und der Kopfquerbewegung – ähnlich wie der „Schulterblick" – anerzogen werden soll.

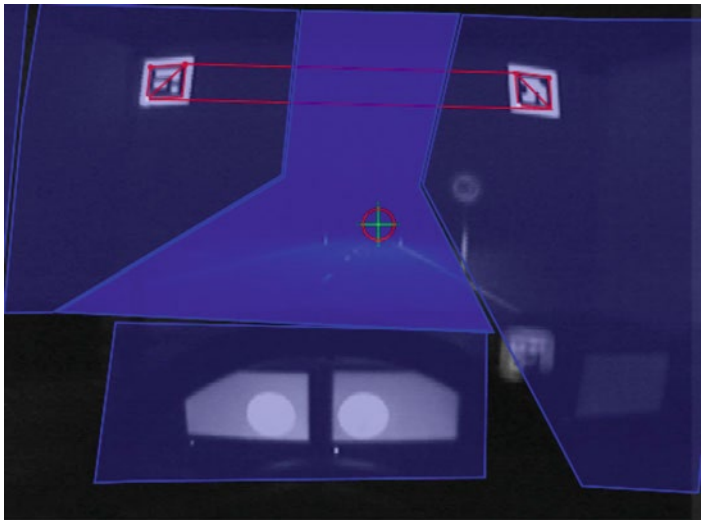


Abb. 3.67 Area of Interests

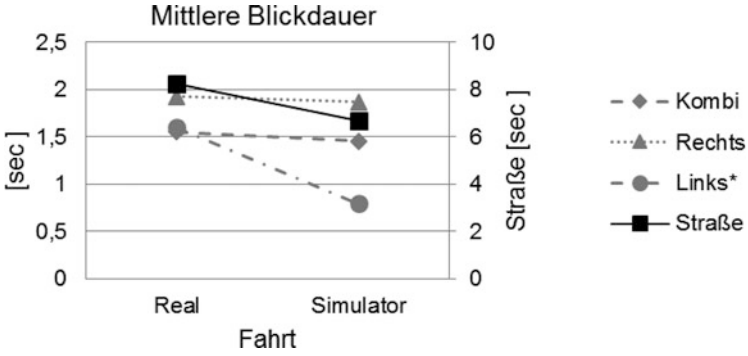


Abb. 3.68 Mittlere Blickdauer auf die vier AOI in Abhängigkeit der absolvierten Fahrt. Anmerkung: * signifikanter Unterschied

Die Ergebnisse der Kreuzungsexperimente zeigen, dass die Fahrer am meisten von einem Assistenzsystem profitieren können, welches in der Verzögerungsphase geeignete Unterstützung gibt. Ein einfaches System würde dem Fahrer eine geeignete Geschwindigkeit bereits in der Verzögerungsphase anzeigen. Eine andere Unterstützungsmöglichkeit ist die Reduzierung der Belastung durch die Unterstützung in den anspruchsvollsten Teilaufgaben. Das ist beispielsweise die Kenntnis über die momentane Verkehrsregelung, vor allem in kritischen Momenten und in Situationen mit einer großen Anzahl von Fremdverkehrsfahrzeugen. Deshalb würde ein Assistenzsystem, welches dem Fahrer in kritischen Momenten die Vorfahrtsregelung anzeigt, den Fahrer deutlich entlasten. Diese Visualisierung könnte z. B. im Head-Up Display (siehe ▶ Abschn. 6.2.1.1) erfolgen. Auf diese Weise ist die Priorisierung der relevantesten Informationen für den Fahrer bereits erfolgt. Somit könnten bereits die im Fahrzeug vorhandenen Sensoren und Karteninformationen die nötigen Informationen liefern, um die gefährlichsten Fehler bei Fahrmanövern im Kreuzungsbereich zu reduzieren. Solche Systeme würden die Fahrerkompetenz fördern. Dennoch blieb die Ausführung der Aktion dem Fahrer überlassen. Im Vergleich zu vorhandenen Warnungssystemen kann ein solcher Ansatz die Akzeptanz des Nutzers erhöhen und wäre zudem kosteneffizient.

3.3.2.4 Blickverhalten bei simulierter und realer Nachtfahrt

Ein Teil der geschilderten Untersuchungen fand in diversen Fahrsimulatoren statt. Ungeklärt ist die Frage, in wieweit die in Fahrsimulatoren gefundenen Ergebnisse auf das Blickverhalten in einer realen Fahrumgebung übertragen werden dürfen. Reinprecht (2011) untersuchte, wie sich das Blickverhalten bei Dunkelheit/Dämmerung darstellt und

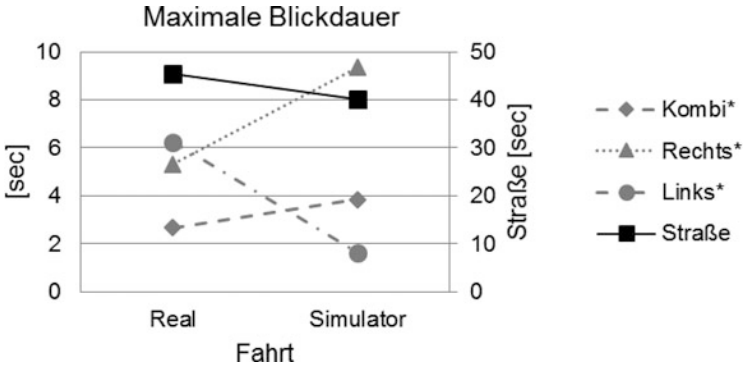


Abb. 3.69 Maximale Blickdauer auf die vier AOI in Abhängigkeit der absolvierten Fahrt. Anmerkung: * signifikanter Unterschied.

ob es einen Unterschied zwischen einer Nachtfahrt in einem Fahrsimulator und einer realen Nachtfahrt gibt. Zur Realisierung wurde eine real vorhandene Strecke von ca. 20 km Länge im Fahrsimulator konstruiert. Die Strecke bestand aus Landstraßen und Stadtgebieten. Insgesamt nahmen an der Untersuchung, die als Messwiederholungsdesign konzipiert war, 14 Versuchspersonen (4 weiblich, 10 männlich) mit einem Durchschnittsalter von 28.6 Jahren (SD = 8.06) teil. Die Aufgabe der Teilnehmer war es, die vorgegebene Strecke nach einem permutierten Versuchsplan einmal im Fahrsimulator und einmal im normalen Straßenverkehr zu durchfahren. Dabei wurde das Blickverhalten mit einem Head-Mounted-Eye-Tracking-System gemessen.

Die Auswertung des Blickverhaltens wurde anhand von vorab definierten Area of Interests (AOI) für die gesamte Fahrt durchgeführt (Abb. 3.67). Insgesamt wurden vier AOIs definiert:

- Straße,
- Kombiinstrument,
- Linke Straßenseite,
- Rechte Straßenseite.

Betrachtet man für die *mittlere* Blickdauer (Abb. 3.68) die AOIs Straße (Simulator = 6,7 s; Realfahrt = 8,3 s), Kombiinstrument (Simulator = 1,5 s; Realfahrt = 1,6 s) und rechte Straßenseite (Simulator = 1,8 s; Realfahrt = 1,9 s) so zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden befahrenen Strecken. Signifikante Unterschiede finden sich hingegen in der mittleren Blickdauer auf die linke Straßenseite. Hier ist die mittlere Betrachtungsdauer in der Realfahrt (1,6 s) im Vergleich zur Simulatorfahrt (0,7 s) signifikant länger.

Die Fahrer betrachten die AOIs Straße, Kombiinstrument und rechte Straßenseite unter beiden Versuchsbedingungen im Mittel also gleich lange. Im Realverkehr kommt es jedoch im Vergleich zum Simulator zu einer längeren Betrachtung der linken Straßenseite. Dies kann bewirken, dass Objekte, die von links die Fahrbahn queren, im Simulator später wahrgenommen werden. Durch die verspätetete Wahrnehmung bleibt dem Fahrer u. U. weniger Zeit, angemessen auf das querende Objekt zu reagieren.

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch für die *maximale* Blickzuwendung zu den einzelnen AOIs (Abb. 3.69). Die maximale Dauer der Betrachtung der linken Straßenseite ist im Simulator kürzer als in der realen Fahrumgebung. Ebenso werden in der maximalen Blickdauer signifikante Unterschiede für die AOIs rechte Straßenseite sowie Kombiinstrument beobachtet. Hier werden beide AOIs in der simulierten Fahrt signifikant länger betrachtet als im realen Fahrumfeld.

Dieses veränderte Blickverhalten im Fahrsimulator kann dazu führen, dass sich die Unfallwahrscheinlichkeit im Fahrsimulator höher darstellt als sie tatsächlich ist.

Eine direkte Übertragung des beobachteten Blickverhaltens in simulierter Fahrumgebung auf eine echte Fahrsituation ist also nur mit Bedacht durchzuführen. Vor allem, wenn es darum geht, Fahrerreaktionen auf seitliche Objekte zu prüfen, können sich Unterschiede zwischen simulierter und realer Umwelt ergeben, was unter anderem auf das unterschiedliche Blickverhalten in den beiden Fahrumgebungen zurück geführt werden könnte. Trotz dieser scheinbar negativen Befunde kann man auf Untersuchungen im Fahrsimulator kaum verzichten,

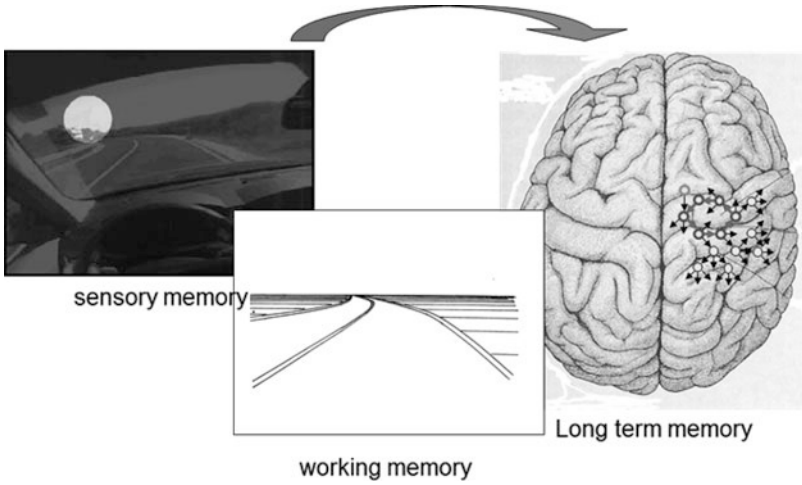


Abb. 3.70 Stimulation innerer Modelle durch eine externe Situation

weil man spezielle, insbesondere gefährliche Verkehrssituationen schon aus ethischen Gründen nicht in der realen Situation herstellen darf und weil nur im Simulator vergleichbare Situationen für unterschiedliche Probanden geschaffen werden können.

3.3.3 Blickverhalten und innere Modelle

Wie schon in ▶ Abschn. 3.1 dargelegt, ist es das primäre Ziel menschlicher Informationsverarbeitung, sich ein räumlich-zeitliches Bild der umgebenden Situation zu verschaffen, um daraus die richtigen, ein gefahrloses und lustvolles Leben versprechenden Konsequenzen für ein Handeln in Raum und Zeit zu ziehen. Auch die meisten Aspekte abstrakten Denkens werden wegen dieser sich aus unserer Entwicklungsgeschichte erklärenden räumlich-zeitlichen Denkweise in diesen Kategorien abgehandelt. Womöglich macht es sogar die Attraktivität des Autofahrens aus, dass es dieses ursprüngliche Streben, sich im Raum zeitlich zu verändern, realisiert und dabei sogar alle durch natürliche Bedingtheiten gegebenen Grenzen weit übersteigt. Wenn wir also Autofahren verstehen wollen, müssen wir es im Kontext dieser Voraussetzung menschlichen Denkens und Handelns sehen.

Wie können wir unser Bild der Informationsaufnahme und -verarbeitung durch diese Ergebnisse vervollständigen? Abbildung 3.70 soll dazu dienen, diesen Prozess zu verstehen. Durch das Scannen wird auf dem Niveau des sensorischen Gedächtnisses Information aufgenommen, um damit innere Modelle zu stimulieren, die als ein Gesamtkonzept in der Form eines strukturellen Engramms in unserem Langzeitgedächtnis gespeichert sind.

Durch diese Anregung wird das entsprechende innere Modell „geweckt“ und wird so – wie in ▶ Abschn. 3.1.3 bzw. 3.2.2.3 bereits erwähnt – zu einem Teil des Arbeitsgedächtnisses. Dieser Prozess soll genauer durch das Beispiel einer Fahrt auf einer nach links gebogenen Straße verstanden werden. Die durch das Scannen aufgenommene Information stimuliert ein allgemeines inneres Modell eines Konzepts einer nach links gebogenen Straße. Indem wir im Arbeitsgedächtnis dieses Konzept an die aktuellen Stimuli anpassen, erkennen wir die wirkliche Breite und die wirkliche Biegung dieser Straße. Weitere Abtastungsreize – die Processing-Blicke – geben uns Information über weitere Einzelheiten dieser Straße. Das quasi leere Bild der Straße wird so mit Gegenständen der Umgebung (Bäumen, Sträucher, Hügel, Berge im Hintergrund) gefüllt. Wir haben das Gefühl, uns an genau diesem Ort zu bewegen. Auf diese Art werden natürlich auch bewegte Objekte (andere Fahrzeuge, Fußgänger, ev. Tiere) durch die Processing-Blicke erfasst und in die erfassten Szenerie „eingesetzt“. Die Information dieser Gegenstände stimuliert auch innere Modelle über deren Verhalten. Auf diese Weise ist nur ein kurzer flüchtiger Blick ausreichend, um die Geschwindigkeit und den Kurs eines entgegenkommenden Autos oder das erwartete Verhalten eines Fußgängers zu erfassen, ohne das entsprechende Objekt ständig im Fokus zu haben.

Die Kombination all dieser Informationen gibt uns ein Gefühl der Gegenwart der Situation. Dieses so entstandene innere Bild ist für uns die Wirklichkeit.

Dieses sich aus unserer Entwicklungsgeschichte erklärende Zurechtfinden und Verhalten in der Welt, das angepasst ist an die Geschwindigkeitsbereiche der ursprünglichen natürlichen Umgebung des Homo sapiens, stößt in der von ihm selbst geschaffenen technischen Welt jedoch oftmals an seine Grenzen[51]. In direktem Zusammenhang damit steht die Tatsache, dass die unmittelbar erlebte Gegenwart etwa 2 Sekunden umfasst. Damit sind wir beim Fahren bereit, für diese 2 Sekunden den Blick von der Straße abzuwenden, da die Konstruktion unserer inneren Modelle suggeriert, dass „alles so bleibt" bzw. „sich alles so weiterentwickelt", wie wir es zuvor erfasst haben. So kann es geschehen, dass wir z. B. in den Rückspiegel geblickt haben, dort kein Fahrzeug mit einem entsprechenden Manöver entdeckt haben, aber etwas später (innerhalb der Zweisekundenfrist oder sogar etwas länger) die Spur wechseln in der sicheren Überzeugung, dass sich auf der Nebenspur kein Fahrzeug befinden kann. Da unser Blick nur in einer Folge die Szene scannen kann, ist es natürlich auch möglich, dass relevante Gegenstände nicht beobachtet werden und folglich subjektiv auch nicht vorhanden sind. Sich ändernde Objekte ziehen vor allen dann den fovealen Blick auf sich, wenn sie im peripheren Blickfeld abgebildet werden. Wenn sich also – wie bereits erwähnt – ein objektiv sichtbares Fahrzeug in stehender Peilung hinter der A-Säule befindet (d. h. sich in Relation zu der Säule nicht bewegt), so entsteht, wenn der Blick auf die nahende Kreuzung gerichtet ist, kein abwendender Reiz in die Peripherie und das Fahrzeug bleibt unentdeckt. Wie bereits angesprochen, beziehen sich innere Modelle nicht nur auf statische Gegenstände, sondern auch auf die Erwartung von Bewegungen. So kann es z. B. vorkommen, dass ein Fahrer, der an einer Rechtsabbiegung geradeaus fahren möchte, die Beschleunigung eines abbiegenden Fahrzeugs wahrnimmt, seinen Blick auf die eigene Fahrspur richtet und nicht mehr wahrnimmt, dass das abbiegende Fahrzeug in der Zwischenzeit wegen eines querenden Fußgänger plötzlich wieder abbremst.

Alle die genannten Beispiele zeigen, wie uns die subjektive Gegenwart der Gegenwart mit dem genannten Zeitumfang von 2 Sekunden einen Streich spielen kann, wenn innerhalb dieser Zeitperiode vom Gewohnten Abweichendes geschieht. Es ist deshalb für die Verkehrssicherheit von außerordentlicher Bedeutung, dass plötzliche Änderungen nach Möglichkeit unterlassen werden, weil sie von anderen Verkehrsteilnehmern womöglich nicht erfasst werden. Insbesondere das regelkonforme Verhalten, das vom anderen Verkehrsteilnehmer – von Ausnahmen abgesehen[52] – erwartet wird, stellt einen nicht zu unterschätzenden Beitrag zur Verkehrssicherheit dar (siehe auch die Beobachtungen zum Blickverhalten von Schweigert 2003; ◘ Abb. 3.58)

Innere Modelle entscheiden nicht nur über das, was wir wahrnehmen, sondern auch darüber, wie wir handeln. Die Bedienung eines Fahrzeugs stellt für den geübten Fahrer bezüglich der meisten Interaktionen eine fertigkeitsbasierte, in einigen Fällen auch regelbasierte Handlung dar. Fertigkeiten werden aber erst nach einer langen Übungsperiode erreicht. Das ist zum Teil das Dilemma für die Einführung neuer, die Bedienung verändernder Techniken, auch dann, wenn sie eigentlich eine Verbesserung und Vereinfachung der Bedienung bewirken[53]. Weinberger (2001) konnte in einer ausgedehnten Habituationsuntersuchung zeigen, dass die Gewöhnung an die Handhabung des ACC-Systems (Active Cruice Control = Tem-

51 Die Evolution hat in keinem Bereich perfekte Lösungen gefunden, vielmehr haben sich solche Lösungen, die sich zudem allesamt aus vorhandenen Vorbedingungen entwickeln mussten, durchgesetzt, die eine hinreichend hohe Überlebenswahrscheinlichkeit der Individualwesen bereitstellten, sodass die Fortpflanzung und damit die Erhaltung der Art gewährleistet war (Arten, für die diese Voraussetzungen z. B. unter veränderten Lebensbedingungen nicht mehr gegeben waren, sind wieder verschwunden).

52 Es kann hier auch zu Konflikten kommen: z. B. ist es auf vielen geschwindigkeitsbegrenzten Strecken üblich, die maximal erlaubte Höchstgeschwindigkeit um eine bestimmten Betrag zu überschreiten (z. B. werden Lastkraftwagen auf Strecken mit einem Limit von 80 km/h fast ausnahmslos am technischen Geschwindigkeitsbegrenzer, der meist auf 90 km/h eingestellt ist, gefahren. Der „gesetzestreue" Fahrer wird dann häufig von einem solchen Lastkraftwagenfahrer bedrängt). Womöglich ist es deshalb besser von „erwarteten gewohnten Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer" zu sprechen, als nur von „regelkonformen".

53 Man denke in diesem Zusammenhang nur an die Ablehnung, die bei vielen Fahrern der aus ergonomischer Sicht eigentlich bessere Getriebeautomat erfährt.

pomat mit Abstandsregelung) mehr als 4 Wochen benötigt. Diese Werte fand Gengenbach (1997) auch für das Blickverhalten in Verbindung mit Head-Up-Displays (HUD). Erst nach dieser Zeit wurde Information vom HUD genau so oft wie vom konventionellen Kombiinstrument abgelesen und erst dadurch wurde der Vorteil der geringeren Blickabwendung wirksam. In diesem Zusammenhang steht auch das Problem der sog. Migration, das bei der Einführung neuer Bedienvorgänge zu berücksichtigen ist: eine radikal geänderte Art der Bedienung wird nicht akzeptiert (z. B. Lenkung des Fahrzeugs mit Joystick statt Lenkrad). Wenn eine neuartige Bedienung theoretisch und aufgrund von Experimenten unbestreitbare Vorteile hat, so kann eine Einführung nur durch eine langsame Abwandlung der bisherigen Bedienung hin zu dem Neuen den gewünschten Erfolg versprechen.

3.3.4 Komfort und Diskomfort

Wie bereits in ▶ Abschn. 3.1.2 angedeutet, ist das Erleben des Fahrens nicht nur eine rationale Angelegenheit, sondern ganz Wesentlich auch eine emotionale. In diesem Zusammenhang wird immer wieder die Frage nach dem Komforterleben gestellt. Es ist also die Frage zu beantworten, was man unter Komfort verstehen könnte. Die Definition von Komfort im englischen Wikipedia gibt dazu die Antwort: „Komfort (oder komfortabel sein) ist die Wahrnehmung physischer oder psychologischer Leichtigkeit, häufig charakterisiert als ein Mangel an Härte. Ein gewisses Maß an psychologischem Komfort kann erreicht werden durch Erfahrungen, die mit angenehmen Erinnerungen verbunden sind, durch das Handhaben vertrauter Gegenstände und den Genuss von wohlschmeckenden Nahrungsmitteln. …“ Komfort ist demnach ein eher diffuser Begriff: er bedeutet im heutigen Sprachgebrauch so viel wie *Behaglichkeit, Bequemlichkeit und Zufriedenheit*, bezieht sich aber auch auf die Beurteilung des *Luxus* einer Ausstattung. Im Dritten Internationalen Lexikon der englischen Sprache (1981) wird beispielsweise Komfort definiert als „ein Zustand der Entlastung (relief), der Förderung (encouragement) und des Gefallens (enjoyment)“.

Um jedoch Komfort technisch operabel zu machen, ist genauer festzulegen, welche Bereiche der Begriff Komfort umfasst. Es lohnt dafür, die Gebiete zu betrachten, mit denen sich der Mensch kognitiv-mental auseinandersetzt und die nicht zuletzt schon immer in den hohen Schulen Gegenstand der Betrachtung waren. Es sind dies:

- die *Wissenschaft*: Sie beschäftigt sich unter allen denkbaren Aspekten mit der Funktion und der Bedingtheit, kurz mit dem Gefüge der Welt, einschließlich des menschlichen Seins. Man unterscheidet grob Geisteswissenschaften, die sich unter dem vorgenannten Aspekt – vereinfacht gesagt – mit der Frage des „Wozu?“, bzw. des „Warum?“ beschäftigen und Naturwissenschaften, deren Ziel die Aufdeckung des „Wie?“ ist.
- die *Kunst*: Sie bietet unmittelbare Eindrücke für die Sinnesorgane Auge und Ohr, die auf psychisch/seelischer Ebene gefallen bzw. wachrütteln und emotional auf bestimmte Probleme aufmerksam machen sollen.
- *Sport und Spiel*: Sie geben Regeln und Überlegungen, wie zumindest zeitlich punktuell eine positive Lebenserfüllung erreicht werden kann.

Von diesen Teilaspekten menschlichen Lebens bezieht sich der Komfort auf ein Grenzgebiet zwischen dem naturwissenschaftlichen „Wie“, dem künstlerischen „Gefallen“ sowie der positiven Lebenserfüllung, die durch Sport und Spiel vermittelt wird. Daraus wird die nicht vollständig naturwissenschaftliche Erfassbarkeit des Komforts bereits offensichtlich. Komfort muss jedoch – wie jede andere Empfindung auch – durch unterschiedliche Eindrücke auf die menschlichen Sinnesorgane zustande kommen, wobei das dabei Entstandene mehr ist als die Summe der Teile.

Zhang et al. (1996) haben anhand von Befragungsexperimenten, deren Ergebnisse sie einer Clusteranalyse unterworfen haben (siehe ◘ Abb. 3.71), gezeigt, dass sich Komfort aus zwei unabhängigen Einflussgrößen zusammensetzt: nämlich dem Aspekt des *Gefallens* und dem Aspekt des *Erleidens*. Sie nannten diese beiden Größen – etwas unglücklich – *Komfort* und *Diskomfort*. Man kann den Unterschied am Beispiel eines hart gefederten Sportwagens erkennen: dieser kann zwar stark das „Erleiden“ harter Stöße, geringer Kopffreiheit und

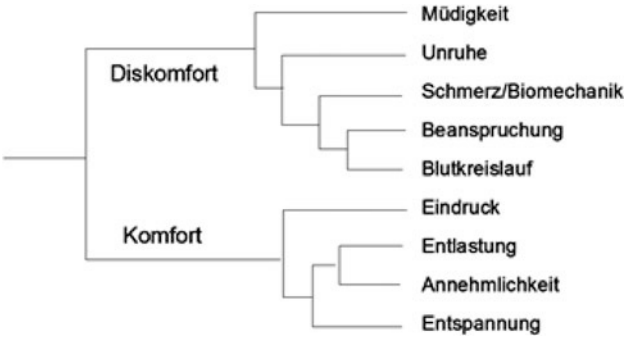


Abb. 3.71 Ergebnis der Clusteranalyse in den Experimenten von Zhang et al. (1996)

womöglich einer ungünstigen Körperhaltung bewirken, aber trotzdem zugleich seiner Form und des Images wegen, das er verspricht, sehr „gefallen".

Das *Gefallen* hat viel mit *Mode und Zeitgeist* zu tun und entzieht sich damit zunächst strengen naturwissenschaftlichen Untersuchungsmethoden. Dennoch wird vermutet, dass es auch objektiven Regeln folgt, die festzulegen die Philosophie der Ästhetik sich seit dem Altertum bemüht. Knoll (2007) begründet, warum die Beschreibung der Gestaltästhetik bei Kant endet: niemand vor ihm hat „Ästhetik" als Wechselwirkung zwischen Subjekt und Objekt charakterisiert, eine Sichtweise, die sich dann bis heute erhalten hat. Die überwiegende Zahl der Philosophen seit Pythagoras haben „Schönheit" auf die Frage nach Ordnung und Proportion zurückgeführt (vgl. „Goldener Schnitt") und sahen diese in der Vollkommenheit der Zusammenstellung der Teile eines Ganzen objektiv begründet. Die Meinung Kants hingegen, dass Schönheit aus der Interaktion von Objekt und betrachtendem Subjekt erwächst, wird bis heute unisono vertreten. Immanuel Kant hat mit seiner Kritik der Urteilskraft als erster in der Geschichte der Ästhetik Bedeutung beigemessen, indem er festgestellt hat, dass das Schöne keiner bestimmten Eigenschaft des Objekts, sondern einem individuellen Urteil entspringt, das sich auf den Geschmack und das Wohlgefallen des urteilenden Subjekts bezieht. Das Geschmacksurteil ist also ästhetisch und nicht logisch, es ist subjektbezogen – im Gegensatz zum Erkenntnisurteil –, denn es gründet sich auf das subjektive Gefühl von Lust und Unlust. Einem Ideal der Schönheit erteilt Kant eine klare Absage. Zusammenfassend ist festzuhalten: bei der Bildung von Geschmacksurteilen ist Form und Inhalt des Gegenstandes strikt zu trennen. Die Form wird („ohne Interesse") durch den Geschmack beurteilt, der Inhalt durch den Verstand („von Interesse geleitet"). Seit Kant hat die Rolle des Subjekts in der Ästhetik an Bedeutung gewonnen und das ästhetische Werturteil hat sich von allgemeingültigen Regeln der Schönheit im Objekt zu Kriterien des subjektiven Erlebens entwickelt.

Dennoch gibt insbesondere seit dem 20. Jahrhundert verschiedene Versuche, Schönheit und Ästhetik mit naturwissenschaftlichen Methoden zu ergründen. Die evolutionäre Ästhetik beispielsweise vermutet, dass sich bestimmte Vorlieben in unserem Erbgut manifestiert hätten. Neurowissenschaftliche Untersuchungen versuchen herauszufinden, was im Gehirn geschieht, wenn wir etwas schön finden. Ein „Schönheitszentrum" wurde allerdings bisher nicht gefunden. In der kognitiven Ästhetik wird argumentiert, dass solche Objekte als schön empfunden würden, die mit einer gewissen – aber nicht zu großen – Komplexität das Gehirn stimulieren und so Musterbildung (Innere Modelle) anregen. Offensichtlich gefällt vor allem das, was einen hohen Wiedererkennungswert hat (Kersten 2006). Das würde zunächst darauf schließen lassen, dass Durchschnittlichkeit höchste Attraktivität besitzt (siehe hierzu Langois und Roggman 1990 und Rhodes und Tremaran 1996). Untersuchungen von Braun et al. (2001) zur Attraktivität von Gesichtern zeigen allerdings, dass gerade systematische Abweichungen von der Durchschnittlichkeit die Attraktivität erhöhen[54].

54 Dieser Effekt kann auch bezüglich des Gefallens von Automobildesign festgestellt werden. Es fällt auf, dass es – natürlich auch bedingt durch die technischen Möglichkeiten der Gestaltung – zeitabhängige Moderichtungen gibt (z. B. Pontonform, Trapezlinie, One-box-Design, SUVs u.v. a.), die einerseits eine hohe Ähnlichkeit der Fahrzeuge bewirken, wobei der Reiz aber gerade in geringfügigen Abweichen vom Mainstream liegt.

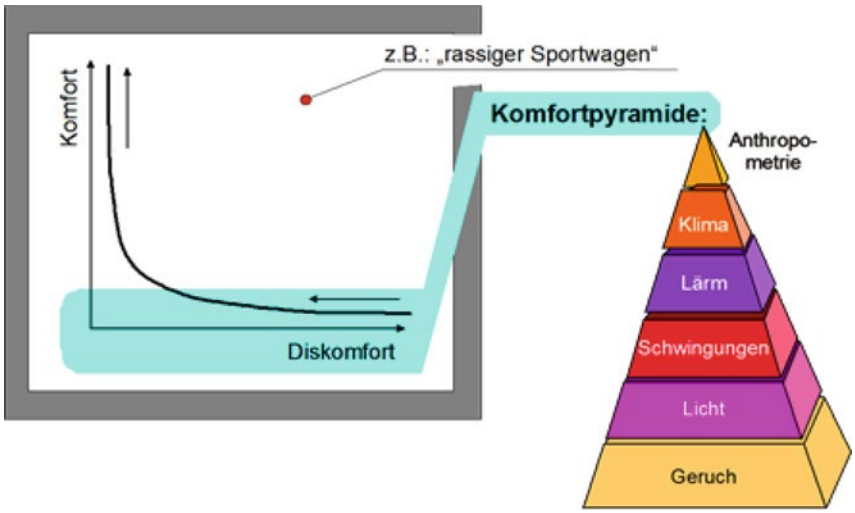


Abb. 3.72 Komfort als ein Paradigma für „Gefallen" und Diskomfort für „Erleiden" in Verbindung mit der Komfortpyramide nach Krist (1993)

Das *Erleiden* kann hingegen mit den *klassischen Methoden der Psychophysik* untersucht werden. Die Psychophysik untersucht den gesetzmäßigen Zusammenhang zwischen einem physikalischen Reiz und der individuellen Empfindung (die meisten Erkenntnisse zur Empfindlichkeit der Sinnesorgane wurden mit den Methoden der Psychophysik erforscht, siehe ▶ Abschn. 3.2.1). Sie stellt für die wissenschaftliche Ergonomie ein grundlegendes Paradigma dar. Bezüglich dieser Reize ist nun weiter zu fragen, welche auf das Erleiden bedeutenden Einfluss haben und welche nicht. Von Krist (1993) wurden Versuchspersonen danach befragt, was nach ihrer Meinung für den Komfort bedeutend ist. Interessanterweise haben sie sehr häufig Dinge genannt wie räumliche Bequemlichkeit und Beengung, was wissenschaftlich unter Anthropometrie zusammenzufassen ist, und dann an zweiter Stelle das Klima, weniger häufig den Lärm, noch seltener die Schwingungen, nur ganz wenig die Beleuchtungsverhältnisse und überhaupt nicht den Geruch. Das macht stutzig: denn die Geruchsnerven sind ohne Umwege mit Gehirnzentren verbunden, die stark emotionale Stimmungen erzeugen. Sie sollten somit für den Komfort besonders wichtig sein. Die Lösung dieses scheinbaren Widerspruchs liegt in Folgendem: die Dinge, die unter (Dis-)Komfortgesichtspunkten in Ordnung sind, werden auch nicht erwähnt. Das lässt in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Zhang et al. (1996) und mit sonstigen Eigenheiten menschlicher Wahrnehmung, die generell auf die Wirksamkeit eines Maskierungseffektes hinweisen, die Komfortpyramide definieren: ganz unten steht die Erfüllung der Bedürfnisse, die ganz wichtig sind. Wenn diese zufriedengestellt sind, bekommen die nächst höheren Bedeutung (siehe auch hierzu ◘ Abb. 3.72).

Die zunehmende Perfektionierung, welche die Elektronifizierung der Produkte mit sich bringt, hat hinsichtlich der ergonomischen Gestaltung die Forderung nach *Handhabbarkeit* hervortreten lassen. Gerade unter dem kommerziellen Gesichtspunkt der Attraktivität eines Produktes ist damit auch die Frage nach dem sog. Bedienkomfort verbunden. Auch er ist unter dem Aspekt des Komfort/Diskomfort-Modells zu sehen. Es kann hier ebenfalls unterstellt werden, dass mit den naturwissenschaftlichen Methoden nur der Diskomfort einer unzureichenden Bedienung abgebaut werden kann, wobei zugleich die Forderung nach ästhetischer Zufriedenstellung erhoben werden muss. Zusammenfassend zeigt somit die Darstellung der ◘ Abb. 3.72 den Zusammenhang von naturwissenschaftlich orientierter *Ergonomie* und künstlerisch orientiertem *Industrial Design*.

Das Konstrukt von Hassenzahl et al. (2007) der User Experience (UX) entspricht im Prinzip dem hier vorgestellten Modell des Komforts: Er spannt für die subjektive Qualitätsbeurteilung von Produkten ein Feld von zwei unabhängigen Dimensionen auf, bestehend aus der sog. hedonistischen Qualität, welche weitgehend dem Gefallen nach Zhang et al. (dort „Komfort" genannt) und pragmatischen Qualität, welche mit dem Zhangschen „Erleiden"

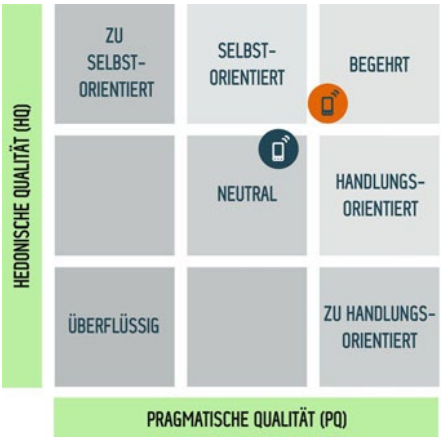
korrespondiert. Speziell die *hedonistische Qualität* unterteilt er wieder in die Untergruppen

- *Stimulation*: „kreativ", „originell", „herausfordernd",
- *Identität*: „bringt mich den Leuten näher", „fachmännisch", „verbindlich",
- *Attraktivität*: „gut", „attraktiv", „angenehm".

Die *pragmatische Qualität* bezeichnet er mit „Die wahrgenommene Fähigkeit eines Produkts, Handlungsziel zu erreichen, indem es nützliche und benutzbare Funktionen bereitstellt". Typische Produktattribute sind: „praktisch", „voraussagbar", „übersichtlich".

Mittels des von ihm und seinen Mitautoren entwickelten Fragebogens AttraktDiff2 kann die Ausprägung der Beurteilung eines Produktes in einer Portfoliodarstellung (siehe ◘ Abb. 3.73) veranschaulicht werden, welche die große Ähnlichkeit mit der ◘ Abb. 3.72 zeigt.

Den beiden Dimensionen „Pragmatische Qualität" (= „Nicht Erleiden" bzw. „Diskomfort") und „hedonistische Qualität" (= „Gefallen" bzw. „Komfort") ist noch eine dritte weitgehend unabhängige Dimension hinzuzufügen, nämlich die des „Haben-Wollens". Es kann nämlich durchaus sein, dass ein Produkt oder die Ausführung eines Teilaspektes eines Produktes „gefällt" und zugleich auch als „praktisch" betrachtet wird, dass man das Produkt aber nicht „haben will", weil es – unabhängig von der wirtschaftlichen Erwerbbarkeit – nicht zu der Sicht der eigenen Persönlichkeit, d. h. dem eigenen Image passt. Umgekehrt ist es durchaus üblich, sich mit einem Objekt zu schmücken, das eigentlich unpraktisch ist und womöglich auch auf längere Sicht nicht besonders gefällt, das aber gegenwärtig „in" ist. Aus der persönlichen Sicht kann also ein Produkt beliebige Positionen in dem so definierten dreidimensionalen Raum einnehmen.



◘ **Abb. 3.73** Portfoliodarstellung des „Vergleichs Produkt A – Produkt B" (Hassenzahl 2007)

3.3.5 Belastung und Beanspruchung

Wie bereits in ▶ Abschn. 1.3 angesprochen, stellt das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept ein grundlegendes Paradigma der Ergonomie dar. Belastung – oft auch im gleichen Sinn mit dem Ausdruck „***Workload***" belegt – charakterisiert dabei die objektive von außen auf den Menschen einwirkende Situation (Arbeitsaufgabe, Umgebungsbedingungen, zur Verfügung stehende Maschine, anthropometrische Bedingungen) und Beanspruchung die individuelle Reaktion darauf. Das Wort Beanspruchung darf nicht in dem Sinn missverstanden werden, dass es sich dabei in jedem Fall um eine negative Reaktion handelt, viel mehr weisen sowohl die subjektive Erfahrung als auch viele wissenschaftliche Untersuchungen (s. u.) darauf hin, dass es eine optimale Belastung/Workload gibt, die zu minimaler Beanspruchung und zugleich höchster Leistung (***Performance***) führt. Während es aufgrund der beschränkten Verarbeitungskapazität des Arbeitsgedächtnisses logisch erscheint, dass ein zu hoher Anspruch zu einer Reduktion der Leistung führt, haben schon frühe Untersuchungen (z. B. Schmidtke 1965) gezeigt, dass auch ein sehr niedriger Anspruch zu geringer Leistung führt. Schmidtke (1965) hat diesem Bereich mit dem Schlagwort ***Überforderung durch Unterforderung*** charakterisiert. Die Bewältigung dieser Situation wird mit dem Begriff ***Vigilanz*** charakterisiert. Man versteht darunter „den Zustand oder den Grad der Bereitschaft, kleine Veränderungen, die in der Umwelt in zufallsverteilten Zeitintervallen auftreten, zu erkennen und auf sie zu reagieren" (Wirtz 2013) bzw. „die Fähigkeit, den Aufmerksamkeitsfokus aufrechtzuerhalten und über längere Zeit wachsam für Stimuli zu sein" (Warm et al. 2008).

De Waard (1996) leitet aus einer umfangreichen Literaturstudie den Zusammenhang zwischen Workload und Performance ab (◘ Abb. 3.74). Danach durchlaufen Workload und Leistung sechs

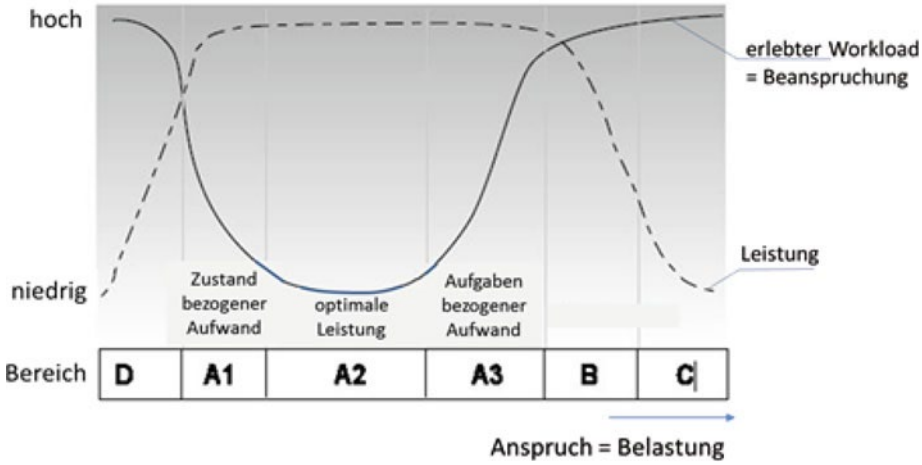


Abb. 3.74 Zusammenhang zwischen Workload (Belastung) und Performance (aufgrund der Beanspruchung mögliche Leistung) nach De Waard (1996)

Regionen. Der Anspruch (= Belastung) nimmt von links nach rechts zu. In der Region D ist die Leistung gering und der *erlebte* Workload (hier = Beanspruchung) hoch, weil der Fahrer Mühe hat, die Aufmerksamkeit aufrechtzuerhalten, obwohl kaum Leistung abverlangt wird. Diese Konstellation ist beispielsweise bei einfachen und monotonen Autofahrten zu finden und entspricht einer Unterforderung des Fahrers. Wird der Anspruch erhöht, nimmt der erlebte Workload ab und die Leistung steigt (Region A1), da der Fahrer sich nun nicht mehr unter Anstrengung konzentrationsfähig halten muss. Durch Erhöhung des Erregungsniveaus kann somit die Leistung gesteigert werden (Helton et al. 2009)[55]. Im mittleren Bereich (A2) ist der Fahrer an die Anforderung, die durch die Aufgabe gestellt wird, angepasst. Hier kann selbst bei ansteigendem Anspruch ein gleichbleibendes Leistungsniveau gehalten werden. Die Beanspruchung bleibt dabei zugleich auf einem niedrigen Niveau. In diesem optimalen Bereich ist der Fahrer also in der Lage, eine gleichbleibend hohe Leistung über längere Zeit aufrechtzuerhalten und leichte Schwankungen in der Anforderung auszugleichen. In der dritten Region (A3) nimmt der erlebte Workload wieder zu, ohne dass es zu Leistungseinbußen kommt. Dies wird durch Mobilisierung der Anstrengung (Aufgaben bezogener Aufwand) ermöglicht. Allerdings kann in diesem Bereich eine gleichbleibende Leistung nur zeitlich befristet aufrechterhalten werden, bevor es zu Erschöpfung kommt. Wenn der Anspruch weiterhin zunimmt, steigt der erlebte Workload nun wieder (Region B), aber das Leistungsniveau bleibt noch erhalten. In Region C ist die Person überfordert und die Leistung sinkt auf ein Minimum. Überforderungseffekte führen u. a. zu Steigerung der Reaktionszeiten (Conti et al. 2013) und zu dem sog. Tunnelblick (Rantanen und Goldberg 1999; siehe hierzu auch die Ergebnisse von Schweigert 2003 und Abb. 3.58). Aber auch Monotonie und Unterforderung haben nachweisbare negative Effekte. Eine gut bekannte Route führt zum Gedankenabschweifen und damit zu längeren Reaktionszeiten (Yanko und Spalek 2013). Dies induziert ebenfalls den Tunnelblick (He et al. 2011). Im Zusammenhang mit der Nutzung von Assistenzsystemen (siehe ▶ Kap. 9) spielen diese Aspekte der Überforderung und Unterforderung eine wichtige Rolle. Einerseits kann man Überforderungssituationen durch Automatikfunktionen auffangen. Andererseits besteht die Gefahr, dass dadurch in reizarmer Umgebung der Effekt der Monotonie noch zusätzlich gesteigert wird. Zudem ist der Workload eine extrem subjektive Angelegenheit. Es ist somit eine Vorhersage, zu welchen Effekt die Nutzung einer bestimmten Automatikfunktion bei dem einzelnen Fahrer führt, kaum möglich,

55 Diesem Effekt entspricht die Beobachtung, dass viele Fahrer die Geschwindigkeit erhöhen, wenn sie eine aufkommende Müdigkeit verspüren.

Abb. 3.75 Endogene und exogene Faktoren, die zu einer Abnahme der Aufmerksamkeitsleistungen führen (Körber 2014)

zumal dies auch intraindividuell starken zeitlichen Schwankungen unterworfen ist. In Zusammenfassung der in der Literatur geschilderten Befunde kann man aber eine grobe Zeitschiene aufstellen, die das Entstehen von mangelnder Aufmerksamkeit beschreiben (Körber 2014, Abb. 3.75). Demnach bewirken endogene Faktoren, wie Erschöpfung, Müdigkeit – womöglich verursacht durch Schlafentzug und zu geringes Erregungsniveau, eher kurzfristig mangelnde Aufmerksamkeit. Exogene Faktoren, die Reizarmut mit sich bringen wie Monotonie, das Fahren in bekannter Umgebung und eine hohe Vorhersehbarkeit der Situation führen langfristig zu Unterforderungssituationen (Bereich D in Abb. 3.74), während lang andauernder stressige Autofahrten bei hoher Verkehrsdichte Überforderungssituationen erzeugen (Bereich B und C in Abb. 3.74). Diese langfristigen Aufmerksamkeitsdefizite lassen sich nur durch eine kurze Schlafphase von ca. 20 Minuten kompensieren.

3.4 Fahrfehler

3.4.1 Menschliche Zuverlässigkeit und Fahrfehler

In den vorangegangenen Kapiteln wurden bereits viele Aspekte angesprochen, die Anlass für fehlerhaftes Verhalten des Fahrers sein können. Wie bereits in ▶ Abschn. 2.6 dargelegt, steht die Vorstellung der Zuverlässigkeit im reziproken Verhältnis zum Fehler. Zuverlässigkeit wird auch als Fehlerfreiheit („Tadellosigkeit“) definiert. Nach Reason (1994) hat man dabei grob zu unterscheiden zwischen beabsichtigten *Verstößen* und unbeabsichtigten *Fehlern*, eine Unterscheidung, die natürlich auch für den Fahrfehler gilt. Die gleiche Unterscheidung findet sich folglich auch bei der Vorstellung der menschlichen Zuverlässigkeit wieder. Man versteht darunter:

1. die individuelle positive Grundeinstellung zur Übernahme von *Verantwortung* für eine den anderen nicht schädigende vielmehr dessen Wohlergehen herbeiführende Handlungsweise,

2. die Vermeidung von zufälligen oder auf ungünstige Gestaltung zurückzuführende *Fehlhandlungen*, welche die Funktionsfähigkeit einer technischen Anlage – hier des Fahrzeugs bzw. des Verkehrssystems – beeinträchtigen.

Während Punkt 1 sich auf die – auch ethisch/moralisch zu bewertende – Einstellung des Einzelnen bezieht, adressiert Punkt 2 unbeabsichtigtes Handeln, das aber inakzeptable Folgen nach sich zieht.

Seitdem Fahrzeugunfälle auftreten und untersucht werden, versucht man zu deren Vermeidung die menschliche Zuverlässigkeit zu verbessern. Im Wesentlichen geschieht dies durch Schulungsmaßnahmen, durch die das Unfall vermeidende Verhalten gelernt und eingeübt und die Einsicht in die Zwecklosigkeit des egoistischen, Verbote übertretenden Verhaltens gefördert werden soll. Dem letzten Aspekt wird durch entsprechenden Sanktionen Nachdruck verliehen[56]. Von der technischen Seite versucht man durch die menschengerechte Gestaltung des Fahrzeugs Fehlhandlungen unwahrscheinlicher zu machen (siehe hierzu ▶ Kap. 9).

Wie in ▶ Kap. 2 dargelegt, wird das Verhältnis des aktuellen Istzustand des Fahrzeugs (Position auf der Straße in Relation zum Straßenrand und stehenden und bewegten Objekten, Fahrtrichtung und Geschwindigkeit) zur Fahraufgabe (Sollzustand) als Qualität bezeichnen. Als Fehler kann somit definiert werden, wenn ein gefordertes Qualitätsniveau nicht erreicht wird. Ist dieser Fehler durch den Fahrer bedingt, so handelt es sich um einen Fahrfehler. Hinsichtlich dieser Fahrfehler sind folgende hierarchisch gestufte Toleranzgrenzen unterscheidbar (frei nach Rigby 1970):

- *Physikalisch vorhandene Akzeptanzgrenzen* stellen reale, physische Barrieren dar, wie Hindernisse, Sperren, Leitplanken, Nagelbänder, der Fahrbahnrand oder der Bordstein, deren Nichteinhaltung deutlich wahrnehmbar ist (Aufprallgeräusch, Kratzen, Schleifgeräusche, Nagelbandrattern, Ruck oder Erschütterungen des Fahrzeuges) und bei ungünstigem Verlauf zu Sachschäden oder ggf. zu Personenschäden führen kann.
- *Warngrenzen* sind Akzeptanzgrenzen, die im Sinne vorbeugenden Schutzes aus physikalisch-technischen Gründen erlassen worden sind. Ihre Überschreitung ist zwar möglich, wird aber aktuell durch Warnsignale aktiv rückgemeldet oder ist eindeutig anhand von Markierungen oder sonstigen Zeichen erkennbar (z. B. Rotlicht einer Lichtsignalanlage, Überholverbote, Parkverbote u. ä.). Dazu gehören auf der fahrzeugtechnischen Seite beispielsweise Reifendruckwarnung oder Abstandswarnungen (z. B. Park Distance Control, PDC).
- *Empirische Akzeptanzgrenzen* beruhen auf der Erfahrung einzelner Fahrer oder auf der Bildung von Normen aufgrund der Erfahrung Vieler als soziale Konventionen. Das Problem ist, dass die Überschreitung dieser Grenzen nicht unmittelbar sinnlich wahrzunehmen ist. Ihre Wahrnehmung setzt die Interpretation der Situation anhand von Erfahrung, Erinnerungsvermögen und Bereitschaft zur Einsicht in die technisch-betrieblichen oder verhaltenspsychologischen Zusammenhänge, mit anderen Worten zum „Mitdenken" und sicherheitsgerichteten Verhalten, voraus.
  Zu diesen Grenzen gehören u. a. empirische „Wenn-dann-Vorschriften" (z. B.: das adäquate Verhalten bei der Vorbeifahrt an Kleinkindern oder alten Personen oder die Regel, den Weg für eine querende Nebenstraße frei zu lassen).
- *Forensische Grenzen* sind Akzeptanzgrenzen die sich vor allem auf Rechtsvorschriften bzw. Vorschriften beziehen, die aus Normen, Regelwerken u. ä. erwachsen (z. B. Geschwindigkeitsgrenzen). Das Problem ihrer Beachtung liegt zum Teil in der mangelnden Einsichtigkeit ihrer Gültigkeit (Handybenutzungsverbot ohne Freisprecheinrichtung) und/oder der Unschärfe ihrer Definition (Geschwindigkeitswahl in Abhängigkeit vom Fahrbahnzustand) zum Teil aber auch darin, dass es oft mehr Aufwand bedeutet, ihnen zu entsprechen, als die Vorschrift zu umgehen. Ein klassisches Beispiel stellt die mangelnde Akzeptanz zum Anlegen des Sicherheitsgurtes (in manchen Ländern) dar, die bekanntlich erst durch eine verschärfte Strafandrohung durchgesetzt werden konnte.

56 Aus pragmatischen Gründen wird hier bei jedem beobachteten Fehler der absichtliche Verstoß unterstellt, was ggf. die Akzeptanz von Sanktionen beeinträchtigt.

Tab. 3.12 Fehlerwahrscheinlichkeiten beim Autofahren abgeschätzt aus den Daten von Rasmussen 1982; Reason 1994; Swain und Guttmann 1983

Art der Aufgabe	Beispiel	Wahrscheinlichkeit eines Fehlers
Hochgeübte Tätigkeiten	Zündschlüssel in Zündschloss einstecken (ohne Drogen/Alkoholisierung), Mit dem Auto dem Straßenverlauf folgen.	$p = 10^{-4} \ldots 10^{-5}$
Geübte einfache Tätigkeiten	Verschalten, Betätigen eines falschen Bedienelements (z. B. Blinker statt Wischer).	$p = 10^{-2} \ldots 10^{-4}$
Regelbasierte Tätigkeiten	Geschwindigkeitsanpassung bei Nässe.	$p = 10^{-1} \ldots 10^{-3}$
Wissensbasierte Tätigkeiten	Normale Ausweichreaktion, Annahme von Zeitlücken.	$p = 10^{-1} \ldots 10^{-2}$
Tätigkeit unter hohem Stress	Ausweichreaktion bei kurz bevorstehendem Unfall.	$p = 0{,}1 \ldots 1$

In vielen praktischen Fällen sind diese Qualitätsforderungen jedoch nicht explizit vorgegeben, sondern nur implizit in Form eines Appells an den Fahrer „…sich so zu verhalten, dass kein anderer geschädigt, gefährdet oder mehr, als nach den Umständen unvermeidbar, behindert oder belästigt wird" (§ 1 Abs. (2) der StVO). Häufig wird dann erst im Nachhinein das menschliche Versagen (gleichbedeutend mit menschlichem Fehler) definiert, wenn es zum Unfall gekommen ist, also der Bereich der Sicherheit objektiv verlassen worden ist. Tatsächlich können fahrerische Fehlhandlungen innerhalb des Wirkungsgefüges des Fahrer-Fahrzeugs prinzipiell nur an zwei Stellen beobachtet werden:

1. Unmittelbar durch Beobachtung der menschlichen Handlung selbst; dies ist z. B. durch Beobachtung des Blickverhaltens und der Betätigung der Bedienelemente möglich. Um hier im obigen Sinne allerdings Fehler zu entdecken, wäre die Kenntnis des „richtigen" Schauens bzw. des „richtigen" Bedienelementeingriffs für jede denkbare Situation notwendig. Mit Ausnahme von artifiziellen Versuchssituationen (z. B. unter anderem auch Simulatorexperimente) scheidet dieser Beobachtungsort in praktischen Fällen aus.
2. Mittelbar am Ergebnis; in diesem Fall wird die Abweichung des Fahrergebnisses von der geforderten Qualitätstoleranz als Fehler bezeichnet. Auch diese Beobachtungsart bringt in der praktischen Fehlerbeurteilung Schwierigkeiten mit sich, die vor allem darin liegen, die richtigen Sollwerte für jede Situation festzulegen. Die Übertretung einer rechtlichen Vorschrift und in extremen Fällen der Unfall stellt eine ganz eindeutige Überschreitung der Akzeptanzgrenzen dar. Unfallforschung ist somit eine wesentliche Ressource für die menschliche Fehlerforschung und damit auch für die menschengerechte Gestaltung des technischen Systems. Zusätzlich gewinnt heute in der wissenschaftlichen Forschung die Beobachtung von „Beinahe-Unfällen" zunehmende Bedeutung.

Eine der Hauptschwierigkeiten in der Zuverlässigkeitsbewertung von Fahraufgaben liegt in der Ermittlung von Situationshäufigkeiten und in der Abschätzung von Fehlerwahrscheinlichkeiten. Situationshäufigkeiten können aus statistischen Daten von Straßenbauämtern gewonnen werden (z. B. Lippold und Mattheß 1994). Die meisten heute bezüglich der menschlichen Zuverlässigkeit verfügbaren Daten wurden im Bereich kerntechnischer Anlagen gesammelt oder beruhen auf der Erfahrung und Abschätzung von Experten (für eine Übersicht siehe Swain und Guttmann 1983). Wie Reichart (2000) zeigte, können diese Daten aber mit Erfolg sinngemäß auf das Verhalten im Straßenverkehr übertragen werden. Auf der Basis der heute vorliegenden Erkenntnisse können die in Tab. 3.12 zusammengefassten Angaben gemacht werden.

3.4.2 Ursachen menschlicher Fehler

Wenn man Unfälle vermeiden möchte, geht es darum, die Ursache menschlicher Fehler zu verstehen. In diesem Zusammenhang ist die oben bereits er-

wähnte Unterscheidung zwischen absichtsvollen Verstößen und unbeabsichtigten Fehlern notwendig, wobei bedacht werden muss, dass zwischen diesen auch fließende Übergänge möglich sind.

3.4.2.1 Verstöße

Auch absichtsvolle Verstöße lassen sich aus dem Modell der Informationsverarbeitung (▶ Abschn. 3.2.2.5, ◘ Abb. 3.48) und insbesondere der Vorstellung, wie es zu Entscheidungen kommt (◘ Abb. 3.50 und 3.48) verstehen. Dabei ist ebenfalls zu unterstellen, dass von dem handelnden Fahrer die Situation (Zustände der Welt) nach seinen Möglichkeiten mehr oder weniger korrekt abgeschätzt wird. Das Problem liegt in der Nutzenzuweisung zu den einzelnen ihm verfügbar erscheinenden Handlungen. Wenn ihm der Nutzen seiner Handlung besonders hoch erscheint (z. B. schnelleres Vorankommen, Spaß an der Handlung, Vermeiden einer teuren Taxifahrt) und zugleich das Risiko, dabei polizeilich erfasst zu werden, gering erscheint, wird er die Handlung durchführen. Dabei ist nach Reason (1994) zusätzlich zwischen Ausnahmeverstößen und Routineverstößen zu unterscheiden. Er schreibt:

> » In diesem weiten Hinterland absichtlicher, aber nicht bösartiger Regelverstöße kann man eine weitere grobe Zweiteilung in Routineverstöße und Ausnahmeverstöße vornehmen. Routineverstöße erfolgen weitgehend gewohnheitsmäßig und bilden einen festgefügten Teil des Verhaltensrepertoires eines Individuums; bei Ausnahmeverstößen handelt es sich um einzelne Verstöße, die unter bestimmten Umständen auftreten. Der Bereich des Straßenverkehrs bietet vielfältige Beispiele für Routineverstöße. (S. 242, zitiert nach Gründl 2005)

Als ein Indikator, welche fehlerhaften Handlungen besonders attraktiv erscheinen, können die Eintragungen in das Verkehrszentralregister des Kraftfahrzeugbundesamtes angesehen werden, wenn auch in Einzelfällen diesen Handlungen entsprechen können, die eher den unbeabsichtigten Fehlern (z. B. Übersehen eines Verkehrszeichens zur Geschwindigkeitsbegrenzung) zuzuordnen wären. Danach waren 2011 von insgesamt fast 4,8 Millionen Eintragungen 61 % Geschwindigkeitsübertretungen, 8 % Vorfahrtsverletzungen, 4 % Fahren unter Alkohol- und/oder Drogeneinfluss, 2 % Fahren ohne Fahrerlaubnis und 7 ‰ unerlaubtes Entfernen vom Unfallort. Insbesondere bei den genannten häufigsten Übertretungen ist von einer extrem hohen Dunkelziffer (nach Schätzung mindesten 1 : 800) auszugehen, so dass die tatsächlich vorkommenden Übertretungen noch wesentlich häufiger sind, als es diese Zahlen suggerieren. Dass es sich bei der Geschwindigkeitsübertretung in den meisten Fällen um absichtliche Handlungen handelt, geht indirekt aus der Tatsache hervor, dass z. B. Vorschläge, die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs technisch zu limitieren (es wäre z. B. möglich, dass der Tempolimiter automatisch das vom Verkehrszeichenerkenner erfasste bzw. das im Navigationssystem gespeicherte lokale Limit übernimmt) sowohl von den Verantwortlichen in den Fahrzeugfirmen (wegen des Bedenkens, dadurch Kunden zu verlieren) als auch von Probanden in entsprechenden Experimenten abgelehnt werden. Hier, wie für viele andere Verstöße (z. B. Telefonieren mit dem Mobiltelefon während der Fahrt, Warten vor einer roten Ampel zu einem offensichtlich verkehrsarmen Zeitpunkt, bzw. vor einer Warnblinkanlage an einem Bahnübergang, wenn sichtbar kein Zug kommt; enges Auffahren, um den Vorausfahrenden dazu aufzufordern, die Fahrbahn freizumachen, verkehrsbehindertes Halten bzw. Parken; u. v. a. m.) gilt, dass der augenblickliche Nutzen (eventuell auch Spaß an der Handlung) als hoch und der mögliche Schaden (polizeiliches Erfasst-werden, Unfall) als gering angesehen wird.

Maßnahmen gegen absichtliche Verstöße sind nur durch verhaltensbezogene Einflussnahme, d. h. pädagogische Maßnahmen möglich. Dies wird im Fahrschulunterricht zwar bewerkstelligt, der Lerneffekt des Alltags bevorzugt aber womöglich ein ganz anderes, als „richtig" erkanntes Verhalten (siehe hierzu ▶ Abschn. 3.2.2.5). Nachdem eine wiederholte Schulung unterbleibt, kann nur durch Sanktionen von beobachteten und beweisbaren Verstößen ein Lerneffekt erzielt werden. Allerdings erfolgen die Sanktionen in den meisten Fällen so zeitversetzt, dass der bezweckte Lernerfolg in Frage zu stellen ist. Zudem werden Verstöße und Fehler, die nicht zu einem Unfall führen, in Relation zu deren Auftreten, wie bereits erwähnt, nur mit geringer Häufigkeit beobachtet. Diese die Psychologie des Lerneffektes von Verhalten

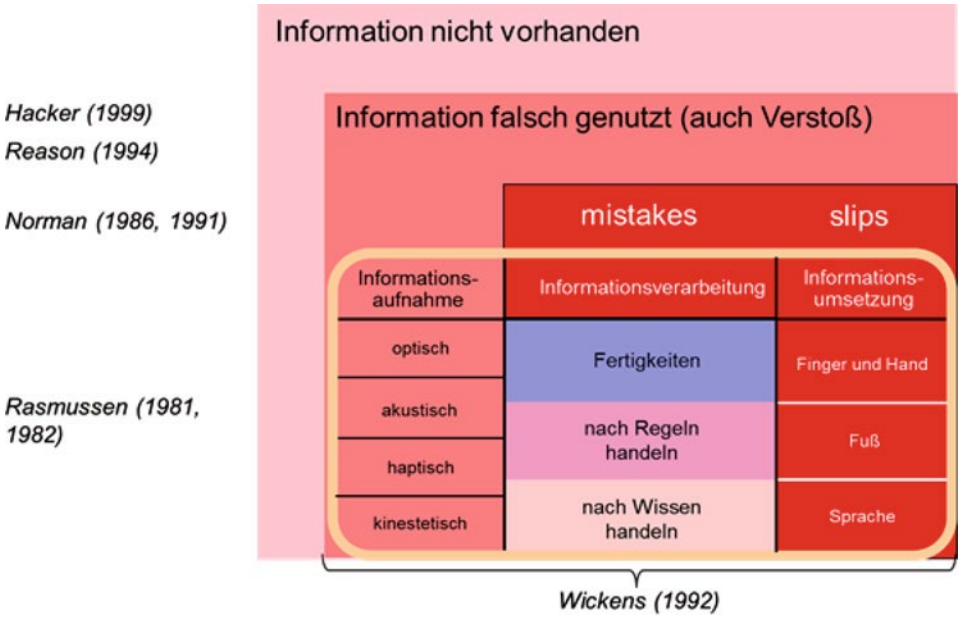


Abb. 3.76 Ursachenorientierte Klassifizierung menschlicher Fehler

zum Vermeiden von Fehlverhalten nicht hinreichend berücksichtigende Vorgehensweise raubt den Sanktionen zum großen Teil den gewünschten Effekt. Allein aus dieser Argumentation wird der Wert von situationsbezogenen regelmäßigen Fernsehspotts oder von kurzen Artikeln in der Zeitung zur korrekten Zielsetzung beim Autofahren offensichtlich.

In das Feld der Verstöße fällt auch der Missbrauch von Assistenzsystemen, der manchmal auch als Argument gegen deren Einführung angeführt wird. Ein prominentes Beispiel dafür ist die Einführung der ABS-Bremse, deren Nutzung wegen des vermuteten Sicherheitsgewinns ursprünglich von den Versicherungsgesellschaften sogar mit einer geringeren Prämie „belohnt" worden ist. Leider hat sich herausgestellt, dass viele Fahrer die vermeintliche „Superbremse" zu einem aggressiveren und damit unfallträchtigeren Fahrstil missbrauchten. Ähnliche Konsequenzen werden für Assistenzsysteme wie adaptiver Geschwindigkeits- und Abstandsautomat (ACC), Spurführungsassistent, Spurwechselassistent usw. befürchtet. Durch die Konzeption der Bedienung solcher Systeme ist folglich solchen Missbrauchsmöglichkeiten vorzubeugen, was eine ganz eigene Herausforderung an die Bedienergonomie darstellt.

3.4.2.2 Fehler

Zum Verständnis des unbeabsichtigten Fehlers ist eine Vielzahl von Modellen entwickelt worden, die eine gewisse Ähnlichkeit zueinander besitzen und die sich zum Teil gegenseitig ergänzen. Gründl (2005) liefert dazu eine sehr anschauliche Übersicht. Die wesentliche Grundlage dafür stellt das Modell von Wickens (1992) dar, welches im Prinzip den unter ▶ Abschn. 3.2 entwickelten Modellvorstellungen entspricht. Während dieses Modell jedes, d. h. auch erfolgreiches Handeln erklären kann, adressiert das Modell von Rasmussen (1982) speziell internale Fehler. Bereits Norman (1981, 1986) hat darauf hingewiesen, dass zwischen unbeabsichtigten Handlungsfehlern in der Informationsumsetzung (so genannte „slips") und den eigentlichen „mistakes" zu unterscheiden ist, die in der Informationsverarbeitung geschehen. Dieser Fehlermodellkomplex wird durch die Überlegungen von Hacker (1987) ergänzt, der zwischen den Hauptzweigen „objektives Fehlen von Information", wie es durch Verdeckung, schlechte Sicht und ähnlichem zustande kommen kann, und „Nutzungsmängel von objektiv vorhandener Information" trennt, wobei dieses dann gemäß der Rasmussen'schen Kategorisierung beschrieben werden kann. Abbildung 3.76 gibt einen Überblick über diese verschiedenen Fehlerursachenmodelle.

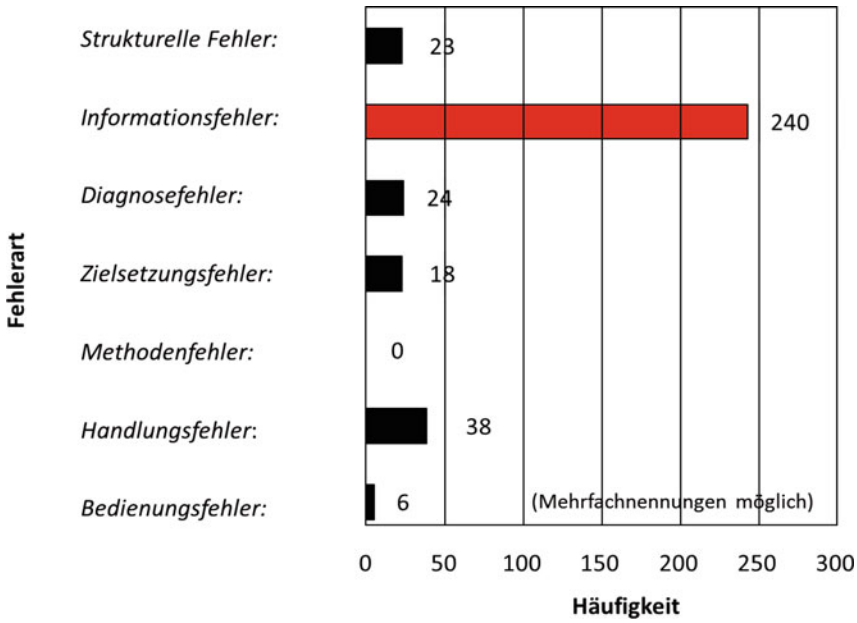


Abb. 3.77 Häufigkeit von internalen Unfallursachen bei insgesamt 312 analysierten Unfällen (Gründl 2005)

Gründl (2005) nutzt das Rasmussen Modell, das dieser ursprünglich für Flugzeugunfälle entwickelt hat und das von Zimmer (2001) für das Führen von Fahrzeugen adaptiert worden ist, bei seiner In-Depth-Unfallanalyse[57], um die Häufigkeit von Fehlerursachen zu spezifizieren (siehe Abb. 3.77). Im Einzelnen sind auf der Grundlage der zuvor genannten Fehlermodelle folgende Kategorien zu nennen:

Strukturelle Fehler: zum Zeitpunkt des Eintritts des Handlungsfehler besteht keine unmittelbare Handlungsmöglichkeit mehr. Allerdings liegt der Fehler hier meist im Vorfeld der Handlung, z. B.: Nichtanpassen der Geschwindigkeit bzw. zu geringer Sicherheitsabstand.

Informationsfehler: verkehrsrelevante Information wird nicht oder zu spät wahrgenommen.

Diagnosefehler: falsche Einschätzung der Situation z. B. von Zeitlücken, falsche Interpretation der Handlungsabsicht anderer u. ä.

Zielsetzungsfehler: nicht situationsadäquate Intention z. B. Ausweichen vor einem kleinen Tier.

Methodenfehler: falsche Wahl der Handlung bei gegebenen Handlungsalternativen (dieser Fall kommt wegen der geringen Zahl von Handlungsalternativen, die sich letztlich auf Bremsen, Beschleunigen und Lenken reduzieren, im Straßenverkehr normalerweise kaum vor).

Handlungsfehler: unzureichenden Umsetzung der gewählten Vorgehensweise in eine Handlung; z. B. Verreißen des Lenkrads.

57 Bei dieser Form der Analyse informierte die Polizei, die zu einem Unfall gerufen wurde, ein Team von Wissenschaftlern, bestehend aus Technikern, Psychologen und Medizinern, die ihre Untersuchungen unabhängig von der Polizei machten. Den Verunfallten, die sich für ein Interview bereit erklärten, war zuvor zugesichert worden, dass die Aussagen vertraulich sind und den öffentlichen Unfallaufnahmeorganen oder den späteren Verhandlungspartnern vor Gericht nicht vermittelt werden. So konnten Äußerungen aufgezeichnet und Beobachtungen gemacht werden, die näher an dem wirklichen Geschehen sind als die offiziellen Polizeierfassungen.

Bedienungsfehler: der gewählten Handlung nicht angemessene Betätigung der Bedienelemente; z. B. Abrutschen vom Bremspedal.

Die zuletzt genannten Handlungs- und Bedienungsfehler werden von Norman zu dem Begriff „slips" zusammengefasst (s. o.).

Wie aus ◘ Abb. 3.77 zu entnehmen ist, stellen *Informationsfehler* die mit Abstand häufigste Unfallursache dar. Der Informationsfehler kann auf unterschiedliche Weise zu Stande kommen. Die Hauptursache dafür ist die Tatsache, dass das menschliche Auge nur einen kleinen Winkelbereichvon 2°–3° auf der so genannten zentralen Sehgrube wirklich scharf abbildet (▶ Abschn. 3.2.1.1 und 3.2.2.1). Nur Objekte, die in diesem Bereich abgebildet werden, können kognitive erfasst und gedächtnismäßigen Inhalten zugeordnet werden. Die Wahrnehmung in der Peripherie dient, wie unter ▶ Abschn. 3.2.2.2 dargestellt, eher dem Erfassen von Bewegung, der Geschwindigkeit und auch der Bewegungsrichtung. Um sich quasi ein inneres Bild der Außenwelt zu verschaffen, ist das Auge gezwungen, durch ständige Bewegung – den Sakkaden – die Umgebung abzutasten. Was dabei zufällig nicht erfasst wurde, ist in dem inneren Bild der Außenwelt auch nicht vorhanden. Deshalb sind Abwendungen, wie sie durch die Betätigung von fahrzeuginternen Bedienvorgängen entstehen (z. B. Radio, CD-Player, Klimaanlage, Suchen von Orten auf der auf dem Beifahrersitz liegenden Karte, Eingabe von Zielen in das Navigationssystem, Betätigung des Handys usw.), auch die Hauptquelle für Informationsfehler. Aber auch Verdeckungen durch Objekte in der Außenwelt (z. B.: falsch geparkte Fahrzeuge an Einmündungen, Büsche, Bäume, Plakattafeln u. ä.) können die Ursache für den Fehler „Information (temporär) nicht vorhanden" bilden.

Die nächst häufigsten Fehler sind *Handlungsfehler.* Die meisten davon kommen durch eine Schreckreaktion auf eine plötzlich eintretende Gefahrensituation zustande (nach Gründl fast 90 % aller Handlungsfehler). In über der Hälfte geht diesen Handlungsfehlern ein Informationsfehler voraus. Der mit Abstand häufigste Handlungsfehler ist dabei das Verreißen des Lenkrades (nach Abkommen auf das Bankett oder Berühren des Randsteins, nach Abkommen auf die Gegenfahrbahn, nach Erwachen aus einem Sekundenschlaf, nach Wildwechsel auf der Fahrbahn oder zu starkes Gegenlenken bei seitlicher Windböe). Es wird aber auch zu schwaches Lenken, so starkes Bremsen und zu frühes oder zu starkes Beschleunigen beobachtet.

In der Rangreihe der Fehler stehen nach den Untersuchungen von Gründl an 3. Stelle die *Diagnosefehler*. Sie kommen im Wesentlichen durch falsche Einschätzung von Entfernungen und Geschwindigkeiten sowie falsche Interpretation der Intention anderer Verkehrsteilnehmer zustande, Fehler, die besonders häufig an Kreuzungen und Einmündungen zustande kommen, aber auch beim Spurwechsel und bei Überholvorgängen mit Gegenverkehr. Es wird in diesem Zusammenhang auf ◘ Abb. 2.22 verwiesen, aus der hervorgeht, dass viele Anforderungen an den Fahrer nur durch Schätzungen nicht aber durch den Abgleich mit konkreten Informationen bewältigt werden können.

Strukturelle Fehler liegen vor, wenn der Fahrer in der jeweiligen Situation keine Möglichkeit mehr hat, durch eigenes Handeln den Unfall zu vermeiden. Dies ist der Fall, wenn für ihn objektiv entweder keine Anzeichen für eine Fremdgefährdung vorliegen oder diese Anzeichen so unmittelbar kurz vor dem Eintreten der kritischen Situation auftreten, dass er selbst bei höchster Aufmerksamkeit und schnellster Reaktion nicht mehr reagieren kann. Solche Fehler werden unter anderen durch technische Mängel veranlasst (z. B. Reifenplatzer). Allerdings liegt in den meisten Fällen im Vorfeld ein Fehler des Fahrers vor, indem er eine für die Straßenverhältnisse zu hohe Geschwindigkeit (z. B. bei Glatteis, Aquaplaning) oder einen zu geringen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug gewählt hat (Diagnosefehler).

Zielsetzungsfehler sind dadurch charakterisiert, dass ein nicht situationsgerechtes Ziel der Handlung (z. B. Ausweichen zum Schutz des Lebens eines Tiers oder Angst vor einer Kollision mit einem breiten Lastkraftwagen, obwohl genügend Fahrbahnbreite vorhanden ist u. ä.) gesetzt wird. Sie entstehen häufig aus einer plötzlich entstehenden Situation, die nicht dem Handlungsrepertoire entspricht, das der Fahrer im Laufe seiner Erfahrung aufgebaut hat.

Bedienungsfehler werden vor allem in Form des Abrutschens des Fußes vom Bremspedal (wegen

nasser Schuhsohle) beobachtet. In diesem Zusammenhang ist aber auch auf die spektakulären Fälle der „unexpected acceleration" zu verweisen, wo ausschließlich in Verbindung mit einem Rangiermanöver der Fahrer (nur Automatikfahrzeuge!) plötzlich beschleunigte, obwohl er davon überzeugt war, dass er den Fuß fest auf der Bremse hielt. Es konnte gezeigt werden, dass es sich dabei um eine Pedalverwechslung handelte (Wierwille 1991), die offensichtlich durch eine Kombination der unlogischen Betätigung des Getriebewählhebels (Rückwärtsfahrt durch Wählhebel nach vorne – Vorwärtsfahrt durch Wählhebel nach hinten) und Bremsen bzw. Beschleunigen jeweils durch Betätigung eines Pedals durch Bewegung nach vorne zu Stande kam (in diesem Zusammenhang wird auf die Überlegungen zur Kompatibilität in ▶ Abschn. 6.1.3 verwiesen).

Literatur

Verwendete Literatur

Benzinger, T.H.: The Physiological Basis for Thermal Comfort. INDOOR CLIMATE (1979)

Bergmeier, U.: Methode zur kontaktanalogen Visualisierung von Fahrerassistenzinformationen unter automotive-tauglichen Gesichtspunkten. Jahresdokumentation 2008. Bericht zum 54. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, München, 9.-11. April 2008. GFA-Press, Dortmund (2008)

Bergmeier, U.: „Kontaktanalog markiertes Nachtsichtsystem - Entwicklung und experimentelle Absicherung". Dissertation an der Technischen Universität München (2009)

Bergmeier, U., Bubb, H.: Augmented Reality. In: Vehicle - Technical realisation of a contact analogue head-up-display under automotive capable aspects; usefulness exemplified through night vision systems. FISITA 2008 World Automotive Congress (2008)

Beyer, L., Weiss, T.: Elementareinheiten des somatosensorischen Systems als physiologische Basis der taktil-haptischen Wahrnehmung. In: Grunwald, M., Beyer, L. (Hrsg.) Der bewegte Sinn. Birkhäuser, Basel (2001)

Braun, C., Gründl, M., Marberger, C., Scherber, C.: Beautycheck - Ursachen und Folgen von Attraktivität. Projektabschlussbericht. [pdf-Dokument] (2001). http://www.beautycheck.de/bericht/bericht.htm

Bubb, H., Wohlfahrter, M.: Eye-tracking Data Analysis and Neuroergonomics. In: Fafrowicz, M., Marek, T., Karwowski, W., Schmorrow, D. (Hrsg.) Neuroadaptive Systems, S. 255–311. CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, Boca Raton, London, New York (2012)

Bubb, H.: The Influence of Braking Distance Indication on Driver's Behaviour. Human Factors in Transport Research, Ed.: D.J. Oborne and J. A. Levis. Academic Press London and New York, Vol. II, 388–346, 1981

Bundesministerium für Verkehr Bau und Straßenentwicklung (2008): Mobilität in Deutschland MID 2008. Bonn, Berlin

Chatziastros, A.: Visuelle Kontrolle der Lokomotion. Dissertation. Justus-Liebig-Universität Gießen (2003)

Chatziastros, A., Wallis, G.M., Bülthoff, H.H., et al.: The effect of view and surface texture on driver steering performance. In: Gale, A.G. (Hrsg.) Vision in Vehicles VII, S. 83–91. Elsevier Science Publisher B.V. (North Holland), Amsterdam (1999)

Cohen, A.: Augenbewegungen des Autofahrers beim Vorbeifahren an unvorhersehbaren Hindernissen und auf freier Strecke. Zeitschrift für Verkehrssicherheit **22**, 68–76 (1976)

Conti, A., Dlugosch, C., Vilimek, R., Keinatz, A., Bengler, K.: An Assessment of Cognitive Workload Using Detection Response Tasks. In: Stanton, N.A. (Hrsg.) Advances in human factors and ergonomics series. Advances in human aspects of road and rail transportation, S. 735–743. CRC Press, Boca Raton, FL (2013)

David, E.: Elektronisches Analogmodell der Verarbeitung akustischer Information in Organismen. Habilitationschrift, Erlangen (1972)

De Waard, D.: The Measurement of Driver's Mental Workload. Proefschrift, Dissertationsschrift an der Rijksuniversiteit Groningen (1996)

Donges, E.: Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug. Zeitschrift für Verkehrssicherheit **24**, 98–112 (1978)

Drittes Internationales Lexikon der englischen Sprache (1981)

Dornhöfer, S., Pannasch, S.: Risky Business: Der Gefahr ins Auge geblickt! In: Preisträgerbroschüre des zweiten Deutschen Studienpreises der Körber-Stiftung (2000)

Dudel, J.: Allgemeine Sinnesphysiologie. In: Schmidt, R.F., Thews, T. (Hrsg.) Einführung in die Physiologie des Menschen. Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1976)

Fanger, P.O.: Thermal Comfort. Robert E. Krieger publishing company, Malabar, Florida (1992)

Fastenmeier, W.: Autofahrer und Verkehrssituation. (Band-Hrsg. In: Häcker, H. (Hrsg.) Reihe Mensch-Fahrzeug-Umwelt, Bd. 33, Verlag TÜV Rheinland, Deutscher Psychologen-Verlag, Bonn (1995)

Foerster, O.: Sensible corticale Felder. In: Bunke, O., Foerster, O. (Hrsg.) Handbuch der Neurologie, Bd. 6, Soringer, Berlin (1936)

Funk, G.: Digital Media for Artists. [Online] Kunst Universität Linz, 12. Mai 2008. [Zitat vom: 23. Juni 2008.] (2008). http://www.dma.ufg.ac.at

Gengenbach, R.: Fahrerverhalten im Pkw mit Head-Up-Display. Gewöhnung und visuelle Aufmerksamkeit VDI Fortschrittsberichte Reihe 12: Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, Bd. 330 (1997)

Gibson, J.J.: The perception of the visual world. Houghton-Mifflin, Boston (1950)

Gibson, J.J.: Visually controlled locomotion and visual orientation in animals. British Journal of Psychology **49**, 182–194 (1958)

Gibson, J.J.: The senses considered as perceptual systems. Houghton-Mifflin, Boston (1966)
Gillet, G.: Ergonomische Optimierung eines Aktiven Stellteils. Dissertation, Lehrstuhl für Ergonomie, TU München (1999)
Goldberg, J.M., Fernandez, C.: Physiology of Peripheral Neurons Innervating Semicircular Canals of the Squirrel Monkey. I-II. Journal of Neurophysiol **34**, 635 (1971)
Goldstein, E.B.: Wahrnehmung und aktive Motorik. In: Wahrnehmungspsychologie, S. 327–343. Spektrum Akademischer Verlag, (2002)
Gründl, M.: Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen. Inauguraldissertation Universität Regensburg (2005)
Guan, H., Gao, Z., Guo, K., et al.: An Optimal Preview Acceleration Model for Velocity Control in DriverVehicle-Environment System. In: Proceeding of AVEC 2000, S. 525–530. Taylor & Francis, Ann Arbor (2000)
Gundry, A.J.: Experiments on the Detection of Roll Motion. Aviation, Space and Environmental Medicine **57**(5), (1978)
Guzmán, A.: Decomposition of a Visual Scene into Three-Dimension Bodies. In: Gresselli, A. (Hrsg.) Automatic Interpretation and Classification of Images. New York (1969)
Hacker, W.: Grundlagen der Regulation von Arbeitsbewegungen. Probl. Erg. Psychol (Beiheft 1), (1967)
Hacker, W.: Fehlhandlungen und Arbeitsfehler. In: Hacker, W. (Hrsg.) Arbeitspsychologie, Schriften zur Arbeitspsychologie, Nr, Bd. 41, H. Huber, Stuttgart (1987)
Hale, A.R., Stoop, J., Hommels, J.: Human error models as predictor of accident scenarios for designer in road transport systems. Ergonomics **33**, 1377–1387 (1990)
Handwerker, H.O.: Somatosensorik. In: Schmidt, R.F. (Hrsg.) Neuro- und Sinnesphysiologie (1993)
Hartmann, E.: Beleuchtung und Sehen am Arbeitsplatz. Goldmann, München (1970)
Hassenzahl, M., Burmeister, M., Koller, F. (2007): Der Unser experience (UX) auf der Spur. Zum Einsatz von www.attrakdiff.de
He, J., Becic, E., Lee, Y.-C., McCarley, J.S.: Mind Wandering Behind the Wheel: Performance and Oculomotor Correlates. Human Factors. The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society **53**(1), 13–21 (2011). doi:10.1177/0018720810391530
Heißing, B., Kudritzki, D., Schindlmaister, R., Mauter, G.: Menschgerechte Auslegung des dynamischen Verhaltens von Pkw. In: Bubb, H. (Hrsg.) Ergonomie und Verkehrssicherheit. Beiträge der Herbstkonferenz der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, S. 1–31. Herbert Utz Verlag, München (2000)
v Helmholtz, H.: Anatomische Beschreibung des Auges Handbuch der physiologischen Optik, Bd. 1. Voss, Hamburg (1866)
v Helmholtz, H.: Die Lehre von den Gesichtswahrnehmungen Handbuch der physiologischen Optik, Bd. 3. Voss, Hamburg (1910)
Helton, W.S., Matthews, G., Warm, J.S.: Stress state mediation between environmental variables and performance: The case of noise and vigilance. Acta Psychologica **130**(3), 204–213 (2009). doi:10.1016/j.actpsy.2008.12.006
Hofmann, J.: Raumwahrnehmung in virtuellen Umgebungen - Der Einfluss des Präsenzempfindens in Virtual Reality - Anwendungen für den industriellen Einsatz. Deutscher Universitätsverlag Kognitionswissenschaft, Wiesbaden (2002)
v Holst, E.: Aktive Leistungen der menschlichen Gesichtswahrnehmung. Studium Generale **10**(4), 232 (1957)
Iggo, A.: Somatosensory System. Handbook of Sensory Physiology Bd. 2. Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1973)
Intersafe, (2009): INTERSAFE. Subproject of PReVENT (Preventive and Active Safety Applications Integrated Project).
Israel, B.: Potenziale eines kontaktanalogen Head-up Displays für den Serieneinsatz. Dissertation an der Technischen Universität München (2012)
Joos, M., Rötting, M., Velichkovsky, B.: Psycholinguistik/Psycholinguistics. Ein internationales Handbuch/An International Handbook. In: Die Bewegungen des menschlichen Auges - Fakten, Methoden, innovative Anwendungen, S. 142–168. de Gruyter, Berlin & New York (2003)
Kaufman, L., Richards, W.: Spontaneous fixation tendencies for visual forms. Perception and Psychophysics (5), 85–88 (1969)
Keidel, W.D.: Physiologie, 4. Aufl. (1975)
Kersten, B.: Was uns gefällt. Gehirn und Geist, 3. Aufl. Verlag Spektrum der Wissenschaften, S. 50–57 (2006)
Knoll, C.: Einfluss des visuellen Urteils auf den physisch erlebten Komfort am Beispiel von Sitzen. Dissertation an der Technischen Universität München (2007)
Körber, M.: Hypovigilanz durch automatisiertes Fahren (2014). Seminarvortrag am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München am 24.01.2014
Kreitler, H., Kreitler, S.: Psychologie der Kunst. Kohlhammer, Stuttgart, S. 88 (1980)
Krist R.: Modellierung des Sitzkomforts, eine experimentelle Studie. Katholische Universität Eichstätt. Dissertation (1993)
Kühner, M., Wild, J., Bubb, H.: Haptische Konstanzleistung bei Drucktastern. Ergonomie Aktuell 012, 28–32 (2011)
Lachenmayer, B., et al.: Sehstörungen als Unfallursache Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit, Bd. M65. (1996)
Lamb, T.D.: Das Auge – Organ mit Vergangenheit. Spektrum der Wissenschaft **12**(2), 23–28 (2012)
Langham, M.: What Do Drivers Do at Junctions? 71st RoSPA Road Safety Congress, 2006 (2006)
Langois, J.H., Roggman, L.A.: Attractive faces are only average. Psychological Science **1**, 115–121 (1990)
Lappe, M.: Visuelle Wahrnehmung von Bewegung. Universität Münster (2009). http://www.Psy.uni-muenster.de/imperia/md/content/psycologie_institut_2/ae_lappe/freie_dokumente/einführung1.pdf
Lindsay, P.H., Norman, D.A.: Human Information Processing. An Introduction to Psychology. Academic Press, New York, London (1972)
Lippold, C., Mattheß, V.: Anwendung von Risikoanalysen, Anwendungsbeispiel „Hindernis auf der Fahrbahn" Forschung

Straßenbau und Verkehrstechnik, Bd. 689. Bundesminister Für Verkehr, Bonn (1994)
Liu, A.: What the Driver's Eye Tells the Car's Brain. In: Eye Guidance in Reading and Scene Perception, S. 431–452. Elsevier Science Ltd, Kidlington, Oxford (1998)
Martinez-Conde, S., Macknik Hubel, S.D.: The Role of Fixational Eye Movements in Visual Perception. Nature Reviews - Neuroscience **5**, 229–240 (2004)
Maycock, G., Lockwood, C., Lester, J.: The accident liability of car drivers Department of Transport TRL report RR, Bd. 315. Transport Research Laboratory, Crowthorne (1991)
Mayer, E.: Tagesgang für thermisches Behaglichkeitsempfinden. Gesundheits-Ingenieur – gi **107**(3), 173–176 (1986)
Mayer, E.: Ist die bisherige Zuordnung von PMV und PPD noch richtig? KI Luft- und Kältetechnik **34**(12), 575–577 (1998)
Mayer, E., Schwab, R.: Untersuchung der physikalischen Ursachen von Zugluft. Gesundheits-Ingenieur – gi **111**(1), 17–30 (1990)
McCarley, J.S., Vais, M., Pringle, H., Kramer, A.F., Irwin, D.E., Strayer, D.L.: Conversation disrupts visual scanning of traffic scenes. In: Gale, A.G. (Hrsg.) Vision in Vehicles IX. Elsevier North Holland Press, Amsterdam (2002)
Miller, G.A., et al.: The Magical Number Seven Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information. Psychological Review **63**, 81–97 (1956)
Müller-Limmroth, W.: Sinnesorgane. In: Schmidtke, (Hrsg.) Lehrbuch der Ergonomie, 2. Aufl. Carl Hanser Verlag, München, Wien (1981)
Muragushi, Y., Fukui, K., Asaga, Y., Ono, E.: Development of Human Sensitivity Evaluation System for Vehicle Dynamics 31. International Congress FISITA, Yokohama, 22. – 27. Oktober, 2006 (2006)
Norman, D.A.: Categorization of Action Slips. Psychological Review **88**, 1–15 (1981)
Norman, D.A.: New Views in Information Processing: Implications for Intelligent Decision Support Systems. In: Hollnagel, E., Manchini, G., Woods, D.D. (Hrsg.) Intelligent Decision Support in Process Environments. Springer-Verlag, Berlin (1986)
O'Neill, B.: A Decision-theory Model of Danger Compensation. Acc. Anal. & Prev. **9**, 157–165 (1977)
Palm, G.: Assoziatives Gedächtnis und Gehirntheorie. Gehirn und Kognition. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, Heidelberg (1990)
Palmer, S.E.: Common region: A new principle of perceptual grouping. Cognitive Psychology **24**, 436–447 (1992)
Plavšic, M.: Analysis and Modelling of Driver's Behavior for Assitance Systems at Road Intersections. Dissertation an der Technischen Universität München (2010)
Plavsic, M., Bengler, K., Bubb, H.: Analysis of Glance Movements in Critical Intersection Scenarios 3rd International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, ami, Flori. Juli. 2010 (2010)
Plavšic, M., Duschl, M., Tönnis, M., Bubb, H., Klinker, G.: Ergonomic Design and Evaluation of Augmented Reality Based Cautionary Warnings for Driving Assistance in Urban Environments The 17th World Congress on Ergonomics (International Ergonomics Association, IEA), Beijing, China, Aug. 9 - 14, 2009 (2009)
Pöppel: Grenzen des Bewußtseins - Wie kommen wir zur Zeit und wie entsteht Wirklichkeit? Insel Taschenbuch, Frankfurt a.M. und Leipzig (2000)
Rantanen, E.M., Goldberg, J.H.: The effect of mental workload on the visual field size and shape. Ergonomics **42**(6), 816–834 (1999)
Rasmussen, J.: Human Errors: A Taxonomy for Describing Human Malfunction in Industrial Installations. Journal Of Occupational Accidents **4**, 311–333 (1982)
Rasmussen, J.: Information processing and human-machine interaction. An approach to cognitive engineering. North-Holland, New York (1986)
Rasmussen, J., et al.: The definition of human error and a taxonomy for technical system design. In: Rasmussen, J. (Hrsg.) New technology and human error (1987)
Rassl, R.: Ablenkungswirkung tertiärer Aufgaben im Pkw – Systemergonomische Analyse und Prognose. Dissertation an der Technischen Universität München (2004)
Reason, J.: Menschliches Versagen: Psychologische Risikofaktoren und moderne Technologien. Spektrum, Heidelberg (1994)
Reichart, G.: Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen – Möglichkeiten der Analyse und Bewertung. Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie der TU München (2000)
Reinprecht, K.: Blicke in der Nacht - Ist das real? Tagung experimentell arbeitender Psychologen, Halle (Saale) (2011)
Reisinger, J.: Parametrisierung der Haptik von handbetätigten Stellteilen. Dissertation an der Technischen Universität München (2009)
Remington, R.W.: Attention and saccadic eye movements. Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance **6**, 726–744 (1980)
Remlinger, W.: Analyse von Sichtverdeckungseffekte im Fahrzeug. Dissertation an der Technischen Universität München (2013)
Rensink, R.A., O'Regan, J.K., Clark, J.J.: To See or Not to See: The Need for Attention to Perceive Changes in Scenes. Psychological Science **8**(5), 368–373 (1997)
Revesz, G.: Psychology and art of the blind. Longmans green, New York (1950)
Rhodes, G., Tremaran, T.: Averageness, exaggeration and facial attractiviness. Psychological Science **7**, 105–110 (1996)
Rigby, L. V.: The Nature of Human Error, Sandia National Laboratories Report Sc-R70-4318, Albuquerque (1970)
Rock, I.: The Basis of Position-Constancy during Passive Movement. American Journal of Psych **81**, 262–265 (1968)
Rockwell, T.H.: Eye Movement Analysis of Visual Information Aquisition in Driving: An Overview. North Carolina State University, Raleigh (1971)
Sachse, H.: Einführung in die Kybernetik. Uni-Text. Vieweg, Braunschweig (1971)
Schierz, C.: Sehen und Bildschirm. Vorlesungsmanuskript, Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie. ETH Zürich, Zürich, S. 23 (2001)

Schmidt, R.F.: Integrative Funktion des Nervensystems. In: Schmidt, R.F., Thews, G. (Hrsg.) Physiologie des Menschen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1976)
Schmidt, R.F. (Hrsg.): Grundriß der Neurophysiologie. Springer, Berlin (1979)
Schmidt, R.F.: Physiologie des Menschen, 26. Aufl. Springer-Verlag, Berlin (1995)
Schmidtke, H.: Die Ermüdung. Symptome – Theorien – Meßversuche. Huber Verl., Bern und Stuttgart (1965)
Schmidtke, H., Schober, H.: Sehanforderungen bei der Arbeit. Geutner-Verlag, Stuttgart (1967)
Schweigert, M.: Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben Dissertation an der Technischen Universität München (2003)
Sheridan, T.B., Ferrell, W.R.: Man-Machine-Systems, Information, Control and Decision. Models of Human Performance. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London (1974)
Sperry, R.: A Modified Concept of Consciousness. Physiol. Rev. 76, 532 (1969)
Steward, J.D.: Human perception of Angular Acceleration and Implications in Motion Simulator. J. Aircraft **8**(4), 248 (1971)
Summala, H., Nieminen, T., Punto, M.: Maintaining Lane Position with Peripheral Vision during In-Vehicle Tasks. Human Factors **38**(3), 442–451 (1996)
Swain, A.D., Guttmann, H.E.: Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications Sandia National Laboratories, Bd. Nureg/Cr-1278. Washington DC (1983)
Tomaske, W., Fortmüller, T.: Der Einfluss von Wahrnehmungsschwellwerten auf die Auslegung von Bewegungssystemen in der Fahrsimulation. In: Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e.V. (DGLR), Bonn (2001)
Totzke, I., Huth, V., Krüger, H.-P., Bengler, K.: Overriding the ACC by keys at the steering wheel: Positive effects on driving and drivers' acceptance. In: Human Factors for Assistance and Automation, S. 153–164. Shaker, Maastricht (2008)
Trendelenburg, W., Schütz, E.: Der Gesichtssinn. Springer-Verlag, Berlin Göttingen, Heidelberg (1971)
Underwood, G., Chapman, P., Brocklehurst, N., Underwood, J., Crundall, D.: Visual Attention While Driving: Sequences of Eye Fixations Made by Experienced and Novice Drivers. Ergonomics **46**(6), 629–646 (2003)
Wann, J.P., Wilkie, M.: How Do We Control High Speed Steering. In: Vaina, L.M., Beardsley, S.A., Rushton, S.K. (Hrsg.) Optic Flow and Beyond, S. 401–417. Kluwer, Dordrecht (2004)
Warm, J.S., Parasuraman, R., Matthews, G.: Vigilance Requires Hard Mental Work and Is Stressful. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics. Society **50**(3), 433–441 (2008). doi:10.1518/001872008X312152
Warren, W., Kay, B., Zosh, W., Duchon Sahuc, A.S.: Optic flow is used to control human walking. Nature Reviews - Neuroscience **4**, 213–216 (2001)
Weinberger, M.: Einfluss von ACC-Systemen auf das Fahrverhalten, Dissertation. Technische Universität München (2001)
Werblin, F., Roska, B.: Wie das Auge die Welt verfilmt. Spektrum der Wissenschaft 5, 41–47 (2008)
Wicken, C.D., Hollands, J.G.: Engineering Psychology and Human Performance, 3. Aufl. Prentice Hall, Upper Saddle River (NJ) (2000)
Wickens, C.D.: Engineering Psychology and Human Performance. Harper Collins Publishers, New York (1992)
Wierwille, W.W.: Driver error in using automotive pedals. In: Peters, G.A., Peters, B.J. (Hrsg.) Automotive Engineering and Litigation. John Wiley & Sons, New York (1991)
Wilde, G.J.S.: The Theory of Risk Homeostasis: Implications for Safety and Health. Risk Analysis **2**(2), 209 (1982)
Wirtz, M.A.: Lexikon der Psychologie: Dorsch - 2014/2015. Dorsch Lexikon der Psychologie, Hans Huber-Hogrefe AG, Bern (2013)
Wittling, W.: Hemisphäreninteraktion, Leistung und Belastung. Was „nutzt" die Hirnforschung der Arbeitswissenschaft? In: Bubb, H., von Eiff, W. (Hrsg.) Innovative Arbeitsgestaltung – Mensch, Organisation, Information und Technik in der Wertschöpfungskette. Wirtschaftsverlag Bachem, Köln (1992)
Wolf, H.: Ergonomische Untersuchung des Lenkgefühls von Personenkraftwagen. Dissertation an der Technischen Universität München (2009)
Yanko, M.R., Spalek, T.M.: Route familiarity breeds inattention: A driving simulator study. Accident Analysis & Prevention **57**, 80–86 (2013). doi:10.1016/j.aap.2013.04.003
Yuhara, N., Tajima, L., Sano, S., et al.: Steer-by-Wire-Oriented Steeling System Design: Concept and Examination. Vehicle System Dynamics Supplement **33**, 692–703 (1999)
Zhang, L., Helander, M.G., Drury, C.G.: Identifying Factors of Comfort and Discomfort in Sitting. Human Factors **38**(3), 377–389 (1996)
Zichenko, V.P., Virgiles, N.Y.: Formation of visual images: studies of stabilized retinal images. In: Gale, A.G. (Hrsg.) Vision in Vehicles II, S. 335–344. Elsevier North Holland Press, Amsterdam (1972). Translated by Consultants Bureau, New York, Plenum Press
Zimmer, A.: Wie intelligent darf/muss ein Auto sein? Anmerkungen aus ingenieurspsychologischer Sicht. In: Jürgensohn, T., Timpe, K.-P. (Hrsg.) Kraftfahrzeugführung. Springer, Berlin (2001)
Zimmermann, M.: Somato-viscerale Sensibilität; Die Verarbeitung im Zentralnervensystem. In: Schmidt, R.F., Thews, G. (Hrsg.) Physiologie des Menschen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1976)
Zwahlen, H.T., Adams Jr., C.C., DeBald, D.P.: Safety aspects of CRT touch panel controls in automobiles. In: Gale, A.G. (Hrsg.) Vision in Vehicles II, S. 335–344. Elsevier North Holland Press, Amsterdam (1988)
Zwicker, E., Feldkeller, R.: Das Ohr als Nachrichtenempfänger. 2. Neubearbeitete Auflage. Hirzel-Verlag, Stuttgart (1967)

Weiterführende Literatur

Bubb, H., Schmidtke, H.: Physiologische und Psychologische Grenzen menschlichen Leistungsvermögens. Kap. 38. In: Masing, M. (Hrsg.) Handbusch der Qualitätssicherung. Carl Hanser Verlag, München, Wien (1988)

Fikus, M.: Visuelle Wahrnehmung und Bewegungskoordination. Deutsch, Frankfurt am Main (1989)
Goldstein, E.B.: In: Ritter, M. (Hrsg.) Wahrnehmungspsychologie, 2. Aufl., S. 190. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford (2002)
Ilgmann, W.: Ergonomische Untersuchungen über die Einwirkung rotatorischer Schwingungen Forschungsberichte aus der Wehrtechnik, Bd. 79-33. Dokumentationszentrum der Bundeswehr, Bonn (1979)
Liao, J., Moray, N.: A simulation study of human performance deterioration and mental workload. Le Travail Humain **56**, 321–344 (1993)
Mühlendyck, H.: Augenbewegung und visuelle Wahrnehmung. Enke, Stuttgart (1990)
Sanders, M.S., McCormick, E.J.: Human factors in engineering and design, 7. Aufl. McGraw-Hill, New York (1993)
Schmidtke, H.: Mentale Beanspruchung. In: Schmidtke, H. (Hrsg.) Lehrbuch der Ergonomie, 2. Aufl. Carl Hanser Verlag, München, Wien (1981)

Anatomische und anthropometrische Eigenschaften des Fahrers

Rainer E. Grünen, Fabian Günzkofer, Heiner Bubb

4.1 Anatomische Grundlagen – 164
4.1.1 Der Bewegungsapparat – 164
4.1.2 Muskulatur – 173

4.2 Anthropometrie – 179
4.2.1 Längen- und Umfangsmaße – 179
4.2.2 Gewicht – 197
4.2.3 Kräfte – 199
4.2.4 Beweglichkeit – 208

Literatur – 216

H. Bubb et al., *Automobilergonomie,* ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-8348-2297-0_4, © Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

4.1 Anatomische Grundlagen

Rainer E. Grünen und Fabian Günzkofer

Für die ergonomische Auslegung von Kraftfahrzeugen ist die Kenntnis des Körperbaus des Menschen notwendig, weil sich auf diesem Wege viele Lösungsansätze zur Beantwortung konstruktiver Fragestellungen ergeben. Die *Anatomie als Lehre vom Aufbau des menschlichen Körpers* liefert hierzu die notwendigen Begriffe und Zusammenhänge. Sie ist auch bei allen Modellen und Simulationen für die korrekte Wiedergabe der mechanischen Verhältnisse von besonderer Bedeutung.

Der menschliche Körper mit seinen unterschiedlichsten Funktionen und Aufgaben stellt eine komplexe Einheit dar, die zusammenhängend und unteilbar ist, und deren mechanische und biologische Prozesse eng verflochten sind. Morphologisch werden die folgenden Komponenten unterschieden: Der **Bewegungsapparat** mit Knochen, Gelenken und der Muskulatur, das **Nervensystem**[1] und die Stoffwechselorgane, wie **Atmung**s- und **Verdauung**ssystem. Die **Sinnesorgane** haben für die Informationsaufnahme einen besonderen Stellenwert. Darüber hinaus werden noch **Haut**, **Gewebe**, **Herz** und **Gefäßsystem**, **Blut**, das **Lymphsystem** und das **Endokrine System, Harn-** und **Geschlechtsapparat** anatomisch beschrieben.

Dieses Kapitel beschränkt sich auf die Organe und Funktionen, die für die anthropometrische Auslegung des Kraftfahrzeugs von Bedeutung sind.

4.1.1 Der Bewegungsapparat

Unter dem Bewegungsapparat versteht man in der Anatomie die Bestandteile und das Wirkgefüge aus Knochen und Gewebe, welche die Fortbewegung des Menschen aus eigener Kraft ermöglichen. Der Bewegungsapparat ist aber aufgrund seiner Stützfunktion auch für alle ruhenden Haltungen, insbesondere das Sitzen verantwortlich. Das Knochengerüst ist durch die Gelenke gegliedert und stützt den gesamten Körper. Die Muskulatur erzeugt die Körperkräfte und überträgt diese auf die stützende Struktur des Skeletts. Die Sehnen übertragen die Zugkräfte der Muskulatur auf das Knochengerüst, während die Bänder eine Stabilisierung der lose aufeinanderliegenden Gelenkflächen bewirken. Das Weichgewebe zwischen den Gelenkflächen sorgt für eine Dämpfung der Stöße und die Druckverteilung in den Gelenken. Die Versorgung der Gelenke mit Nährstoffen wird durch die Gelenkflüssigkeit gewährleistet.

4.1.1.1 Terminologie

Achsen und Ebenen

Zur Bezeichnung der Orientierungen an den Gliedmaßen werden meist drei Hauptachsen definiert, die senkrecht aufeinander stehen (Abb. 4.1): Die **Längsachse** (Vertikal- oder Longitudinalachse) des Körpers steht bei aufrechter Haltung senkrecht zur Standebene. Die **Querachse** (Transversal- oder Horizontalachse) verläuft von der linken zur rechten Körperhälfte und steht senkrecht auf der Längsachse. Die **Pfeilachse** (Sagittalachse) verläuft von der hinteren zur vorderen Körperhälfte und steht senkrecht auf den beiden anderen Achsen. Diesen drei Hauptachsen lassen sich die drei Hauptebenen zuordnen: Die **Medianebene** (Sagittalebene) ist entlang der Pfeilachse ausgerichtet und teilt den Körper in eine rechte und eine linke Körperhälfte. Die **Frontalebene** verläuft in Richtung der Längsachse und ist parallel zur Stirn ausgerichtet. Die **Transversalebene** verläuft quer zum Körper und steht damit senkrecht zur Längsachse.

Lage und Richtung

Zur genauen Beschreibung der Lage und der Richtungen sind die folgenden Bezeichnungen üblich: Körperteile, die zum Kopfende hin ausgerichtet sind, werden mit **kranial** (*superior*) bezeichnet, während zum Steißende hin ausgerichtete mit **kaudal** (*inferior*) bezeichnet werden. Eine Ausrichtung zur Bauchseite hin wird mit **ventral** (*anterior*), zur Rückenfläche hin als **dorsal** (*posterior*) bezeichnet. An den Extremitäten bezeichnet man als **distal** Körperteile, die zum Ende der Gliedma-

1 Das Nervensystem wird in die folgenden Teilbereiche unterteilt: Zentrales Nervensystem (Gehirn, Rückenmark), Peripheres Nervensystem (Nervengeflecht) und Vegetatives Nervensystem.

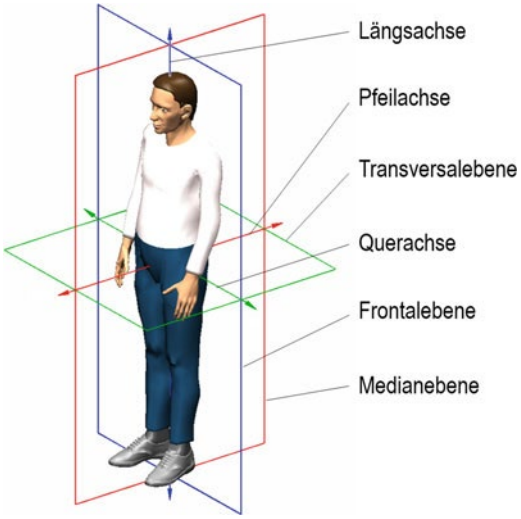


Abb. 4.1 Körperachsen

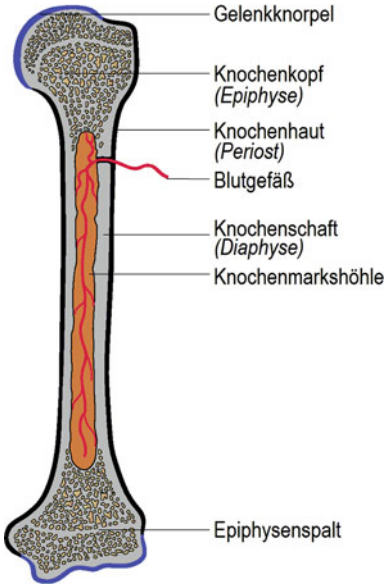


Abb. 4.2 Röhrenknochen

ßen liegen, während **proximale** zum Rumpf hin orientiert sind.

Allgemeine Anatomie des Bewegungsapparates

Die vielfältigen und komplexen Bewegungen, die zur Fortbewegung, aber auch zur Verrichtung mechanischer Arbeit und damit auch zum Führen und Bedienen von Kraftfahrzeugen möglich sind, werden durch das Zusammenspiel von Skelett und Muskeln dargestellt. Das Knochengerüst mit seinen knöchernen Stützelementen, den durch Bindegewebe verbundenen Gelenken wird als passiver Bewegungsapparat bezeichnet, während die Muskeln den aktiven Teil darstellen. Die Skelettelemente bilden gemeinsam mit den Gelenken und der Muskulatur die Fortbewegungsorgane, die auch für die aufrechte Haltung im Sitzen verantwortlich sind.

4.1.1.2 Das Skelettsystem

Knochen

Zu Beginn seines Lebens hat der Mensch etwa 300 Einzelknochen, die im Laufe des fortschreitenden Wachstums teilweise zu den 206 bis 214 Knochen des Erwachsenen zusammenwachsen. Sieht man von den Knochen mit einer Schutzfunktion ab, wie den Schädelknochen und den Rippen des Brustkorbes, ergeben die mit Gelenken verbundenen Knochen durch ihre Stütz- und Hebeleigenschaft den passiven Bewegungsapparat. Nach Art der äußeren Form werden *lange*, *kurze*, *flache* und *unregelmäßige* Knochen unterschieden, deren Größe hauptsächlich von der mechanischen Beanspruchung und Funktion im Bewegungsapparat abhängig ist. Die Knochen der freien Extremitäten (Arme und Beine) sind mit Ausnahme der Hand- und Fußwurzelknochen lange Knochen (*Ossa longa*) und damit Röhrenknochen (siehe Abb. 4.2). Der längliche Schaft (*Diaphyse*) wird beiderseitig von den Knochenenden (*Epiphysen*) begrenzt, die durch die funktionalen Wirkflächen der Gelenke gekennzeichnet sind. Zwischen Epiphyse und Diaphyse befindet sich bis zum Ende der Wachstumsphase die Epiphysenfuge, in der das Längenwachstum des Röhrenknochens und damit des Körpers stattfindet, indem sich die Zellen immer wieder teilen und anschließend wachsen. Der Schaft ist mit Knochenmark gefüllt, dessen primäre Funktion die Bildung der Blutzellen des menschlichen Körpers ist. Aus diesem Grund befinden sich gut durchblutete Blutgefäße

Abb. 4.3 Prinzipieller Aufbau eines Gelenkes

an und in den Knochen. Die flachen Knochen (*Ossa plana*) wie die Schädelknochen, das Schulterblatt oder das Becken zeichnen sich durch eine flache und gewölbte Form aus und haben vor allem Schutzfunktionen. Die kurzen Knochen, wie die Hand- und Fußwurzelknochen sind klein und unregelmäßig geformt und haben mehrere Gelenkflächen. Die Sesambeine, wie die Kniescheibe oder das Erbsenbein an der Außenseite der Handkante, sind in eine Sehne eingelagert und sorgen damit für einen größeren Abstand des Muskelbandes zum Gelenk, wodurch sich ein größeres Kraftvermögen oder eine erweiterte Beweglichkeit ergeben. Darüber hinaus werden unregelmäßige Knochen, wie die Wirbel der Wirbelsäule oder der Unterkiefer unterschieden, die einen speziellen Aufbau aufgrund ihrer besonderen Funktion aufweisen.

Gelenke

Die Einzelknochen des passiven Bewegungsapparates sind durch sogenannte echte und unechte Gelenke miteinander verbunden. Als **unechte Gelenke** werden solche Knochenpaarungen bezeichnet, die mit einem Füllgewebe aus Knorpel oder Bindegewebe miteinander in Verbindung stehen. Die unechten Gelenke[2] (*Synarthrosen*) werden je nach Art des Füllgewebes unterschieden.

Bei den **echten Gelenken** (*Diarthrosen*) sind die benachbarten Knochen über einen Gelenkspalt getrennt und durch eine mit Gelenkflüssigkeit (*Synovia*) gefüllte Gelenkkapsel umschlossen. Die Gelenkkapsel wird aus der Fortsetzung der den Knochen umgebenden Knochenhaut gebildet. Die jeweiligen Kopfenden der Knochen sind zu konkaven oder konvexen Gelenkflächen ausgebildet und mit einem hyalinen Gelenkknorpel überzogen. Dieser etwa 2 bis 8 mm dicke Gelenkknorpel weist eine glatte Oberfläche auf und wirkt stoßdämpfend und zusammen mit der Gelenkflüssigkeit gleitend. Da der Gelenkknorpel keine Gefäße aufweist, muss die Gelenkflüssigkeit durch regelmäßige Bewegung in den Knorpel gepresst werden. Bewegungsarmut und Ruhigstellung der Gelenke hemmt somit die Versorgung des Gelenkknorpels mit Nährstoffen und gleichzeitig verliert die umschließende Gelenkkapsel an Flexibilität, wodurch sich der Gelenkspalt verengt. Dies führt vor allem in fortschreitendem Alter zu eingeschränkter Beweglichkeit und schmerzenden Gelenkbewegungen. Tendenziell sind diese Erscheinungen bereits schon bei längerer sitzender Haltung beim Führen von Kraftfahrzeugen festzustellen, weshalb nach etwa zwei Stunden Fahrtzeit eine Pause mit Haltungswechsel und vor allem Bewegung angeraten ist, um einerseits den Stoffwechsel und die Blutzirkulation anzuregen und die Gelenke wieder in Bewegung zu setzen, um dadurch die Versorgung zu gewährleisten.

Der prinzipielle Aufbau der Gelenke (Abb. 4.3) zeigt, dass in der Regel einem ballig erhabenen (konvexen) Gelenkkopf eine muldenartig vertiefte (konkave) Gelenkpfanne gegenübersteht. Die Ausformung der Gelenkflächen ist von der Aufgabe des Körperteils bestimmt und legt die Freiheitsgrade der Bewegung fest. Die im Folgenden näher beschriebenen Gelenktypen sind in Abb. 4.4 und Tab. 4.1 den einzelnen Gelenken

2 Die Anatomie unterscheidet drei Arten von unechten Gelenken (Synarthrosen): Syndesmosen (Bindegewebe), Synchondrosen (Knorpel) und Synothosen (Knochengewebe).

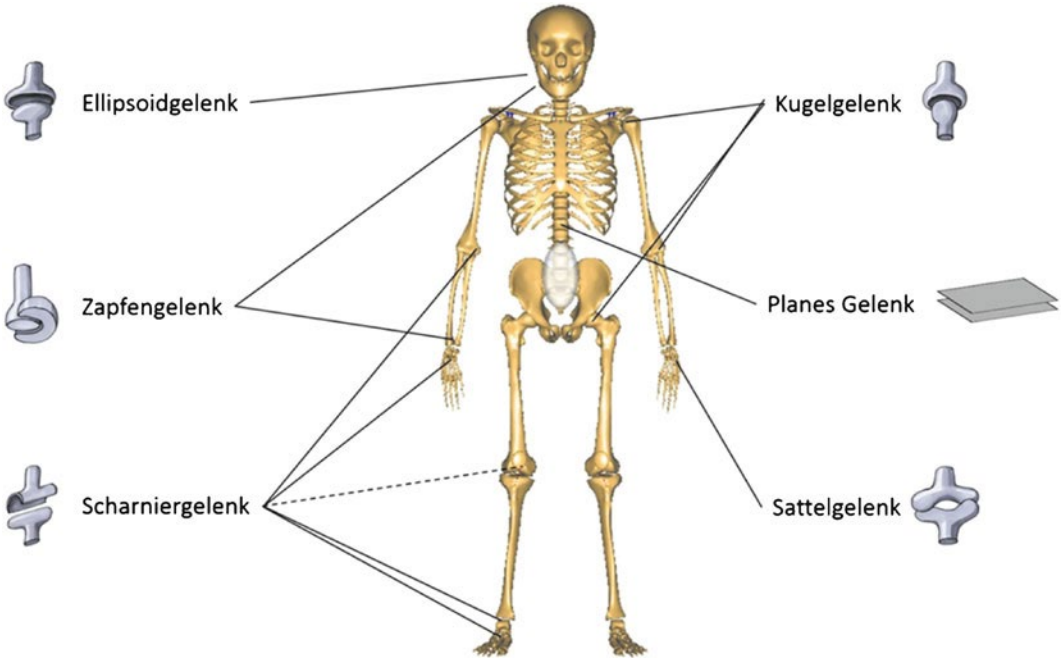


Abb. 4.4 Zuordnung von Gelenktypen zu ausgewählten Gelenken des menschlichen Körpers. Darstellung der Gelenktypen by Produnis [GFDL (▶ http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html) or CC-BY-SA-3.0 (▶ http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)], via Wikimedia Commons

des menschlichen Körpers zugeordnet. **Kugelgelenke** haben bezeichnenderweise einen nahezu kugelförmig ausgeformten Gelenkkopf und dementsprechend eine ebenso ausgeführte Gelenkpfanne. Damit besitzen sie drei senkrecht zueinander stehende Hauptachsen und mit sechs Hauptbewegungen. Die vielfältigen Bewegungsmöglichkeiten des Hüft- und des Schultergelenkes ergeben sich aus den Eigenschaften des Kugelgelenkes. Dem Kugelgelenk ähnlich ist das **Ellipsoidgelenk** (oder Eigelenk), das ellipsenförmig deformiert ist und somit eine Hauptachse weniger aufweist. Eine Drehung um die Normalachse ist nicht möglich. Ein typischer Vertreter dieses Typs ist das erste Kopfgelenk zwischen Schädel und Atlaswirbel der ein Nicken („Ja"-Sagen) des Kopfes erlaubt. Beim **Scharniergelenk** greift ein walzenförmiger Gelenkkörper in eine hohlzylinderförmige Vertiefung, die aus einem rinnenförmigen Skelettelements gebildet wird. Ein Beispiel hierzu ist das Ellenbogengelenk, das nur zwei Hauptbewegungsrichtungen kennt. Die Drehung der Hand und des Unterarms findet nicht im Ellenbogengelenk statt, sondern wird durch die Verdrillung von Elle (*Ulna*) zu Speiche (*Radius*) ermöglicht. Bei **Rad- oder Zapfengelenken** ist der eine Gelenkpartner vom anderen ringförmig umschlossen, so dass eine Beweglichkeit nur in zwei entgegengesetzten Hauptrichtungen möglich ist. Ein Beispiel hierzu ist das proximale Ellen-Speichen-Gelenk, das durch das Ringband nur Drehbewegungen zulässt. Damit ist das Ellenbogengelenk ein zusammengesetztes Gelenk, das aus drei Teilgelenken mit jeweils unterschiedlichen Typen besteht. Ein weiteres Beispiel für ein Zapfengelenk ist das zweite Kopfgelenk zwischen Atlas- und Axiswirbel. Der ausgebildete Zapfen im Axiswirbel greift in eine Grube im Atlaswirbel und lässt somit hauptsächlich Drehbewegungen des Kopfes („Nein"-Sagen) zu. Ca. 70 % der seitlichen Kopfdrehbewegungen werden allein aus diesem Gelenk heraus ermöglicht. **Sattelgelenke** zeichnen sich dadurch aus, dass die eine Gelenkseite eine konkave, die andere aber eine konvexe Gleitfläche aufweisen, die sich aufeinander be-

Tab. 4.1 Aufstellung der wichtigsten Gelenke des Bewegungsapparates und ihrer Freiheitsgrade

Gelenk	Partner		Form	Freiheitsgrade
Oberes Kopfgelenk	Schädel (Occiput)	Erster Halswirbel (Atlas)	Ellipsoidgelenk	4
Unteres Kopfgelenk	Erster Halswirbel (Atlas)	Zweiter Halswirbel (Axis)	Zapfengelenk	2
Wirbelsäule	Kleine Wirbel	Kleine Wirbel	Planes Gelenk	4
Schultergelenk	Schulterblatt (Scapula)	Oberarmknochen (Humerus)	Kugelgelenk	6
Ellenbogengelenk 1	Oberarmknochen (Humerus)	Elle (Ulna)	Scharniergelenk	2
Ellenbogengelenk 2	Oberarmknochen (Humerus)	Speiche (Radius)	Kugelgelenk (eingeschränkt)	2
Ellenbogengelenk 3	Elle (Ulna) proximal	Speiche (Radius) proximal	Radgelenk	2
Proximales Handwurzelgelenk	Speiche (Radius) distal	3 Handwurzelknochen (Os scaphoideum, Os lunatum, Os triquetrum)	Ellipsoidgelenk	4
Distales Handwurzelgelenk	2 Handwurzelknochen (Os scaphoideum, Os lunatum)	3 Handwurzelknochen (Os trapezium, Os trapezoideum, Os capitatum)	Scharniergelenk	2
Fingergrundgelenk(e) „Knöchel“	Handwurzelknochen	Fingergliedern (Phalanges)	Kugelgelenk (eingeschränkt)	4
Fingermittelgelenk(e)	Fingergrundglieder (Phalanx proximalis)	Fingermittelglied (Phalanx media)	Scharniergelenk	2
Fingerendgelenk(e)	Fingermittelglied (Phalanx media)	Fingerendglied (Phalanx distales)	Scharniergelenk	2
Daumensattelgelenk	Erster Mittelhandknochen	Großes Vieleckbein (Os trapezium)	Sattelgelenk	4
Hüftgelenk	Becken (Pelvis)	Oberschenkelknochen (Femur)	Kugelgelenk	6
Kniegelenk	Oberschenkelknochen (Femur)	Schienbein (Tibia) Kniescheibe (Patella)	Kombiniertes Gelenk	4
Oberes Sprunggelenk	Schienbein (Tibia) Wadenbein (Fibula)	Sprungbein (Talus)	Scharniergelenk	2
Unteres Sprunggelenk	Sprungbein (Talus)	Fersenbein (Calcaneus) Kahnbein (Os naviculare)	Scharniergelenk	2
Zehengrundgelenk(e)	Mittelfußknochen (Ossi metatarsi)	Zehenknochen (Phalanges proximalis)	Kugelgelenk(e)	6
Zehenendgelenk(e)	Zehenknochen (Phalanges proximalis)	Zehenknochen (Phalanges media/distales)	Kugelgelenk(e)	6

wegen können. Damit haben Sattelgelenke zwei Hauptbewegungsachsen die senkrecht aufeinander stehen und somit vier Bewegungsfreiheitsgrade zulassen. Ein solches Sattelgelenk ist beispielsweise das Daumensattelgelenk, das es dem Daumen ermöglicht, sich von der Hand abzuspreizen und von einer planen Lage neben der Handfläche sich den anderen vier Fingern gegenüberzustellen (*Opposition* und *Reposition*). **Plane Gelenke** haben keine ausgeprägten Gelenkmulden und erlauben somit translative Verschiebungen parallel zum Gelenkspalt. Damit ist ein solches Gelenk hauptsächlich ein druckaufnehmendes Stützelement, das kleine seitliche Bewegungen der Gelenkpartner zulässt. Die kleinen Wirbelgelenke der Wirbelsäule fallen unter diesen Typus.

Gelenkmechanik

Die Freiheitsgrade eines Gelenkes und die Ausformung der Gelenkflächen geben nur die prinzipielle Beweglichkeit der Gliedmaßen vor. Die Gelenkbewegungen werden von den vorhandenen Muskeln und Bändern beeinflusst, die Richtung und Relation der Beweglichkeit vorgeben. So lassen sich die Zehenglieder zwar passiv von außen beeinflusst entlang der Zehenlängsachse verdrillen, jedoch ist diese Beweglichkeit alleine aus der Aktivierung durch die vorhandene Muskulatur nicht möglich. Somit sind keine echten Scharnierbewegungen oder ganze Drehungen möglich, sondern nur eingeschränkte Pendelbewegungen zwischen den hemmenden Begrenzungen. Die Beweglichkeit der Gelenke reicht von wenigen (1–2°) Graden bei den kleinen Wirbeln bis zu großen Bereichen (>100°) beim Schultergelenk. Bei einfachen Scharniergelenken mit prinzipiell zwei Freiheitsgraden sind um die Bewegungsachse zwei entgegengesetzte Richtungen möglich: Beugung (*Flexion*) und Streckung (*Extension*), Spreizen (*Abduktion*) und Heranführen (*Adduktion*), sowie Innen- und Außen*rotation*. So wird das Eindrehen des Unterarms zum Körper hin mit *Pronation* bezeichnet, während die Außenrotation vom Körper weg als *Supination* bezeichnet wird. Bei den vier Freiheitsgraden umfassenden Sattel- und Ellipsoidgelenken kombinieren sich die Bewegungen und können sich überlagern. Bei manchen Gelenken sind die Freiheitsgrade

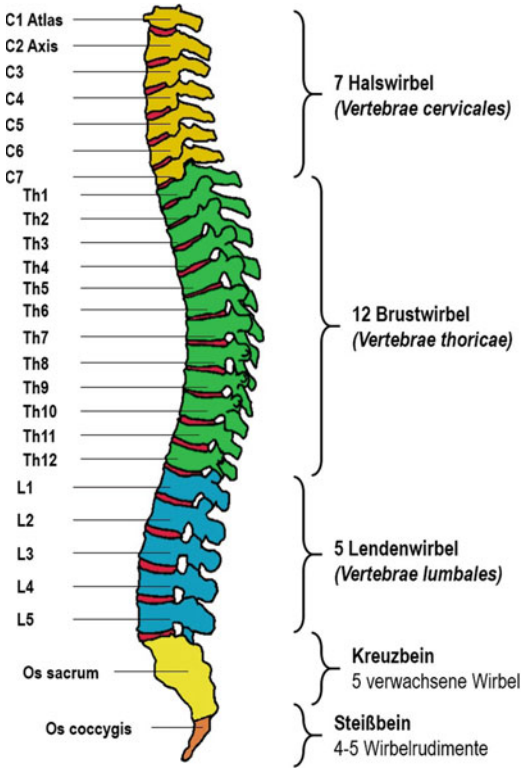


Abb. 4.5 Wirbelsäule

von der Stellung des Gelenkes anhängig. So lässt sich der Zeigefinger ausgestreckt auch seitlich abspreizen, während diese Bewegung in eingerolltem Zustand nicht mehr möglich ist. Wenn auch die Kugelgelenke in Schulter und Hüfte mit sechs Freiheitsgraden am beweglichsten erscheinen, so sind doch durch die vielen kombinierten Gelenke im Fuß und vor allem in der Hand sehr komplexe Bewegungen möglich. Alleine in einer Hand vereinigen sich 27 Knochen (8 Handwurzelknochen, 5 Mittelhandknochen, 14 lange Fingerknochen), die untereinander mit Bändern verbunden sind und somit die vielfachen Bewegungsmöglichkeiten und Manipulationen der Hand ermöglichen.

Wirbelsäule

Die Wirbelsäule (Abb. 4.5) bildet die verbindende und tragende Zentralstruktur des Bewegungsapparates. Die Wirbelkörper der einzelnen Wirbelsäulenabschnitte sind prinzipiell ähnlich aufgebaut, Ausnahme bildet hier der Atlaswirbel

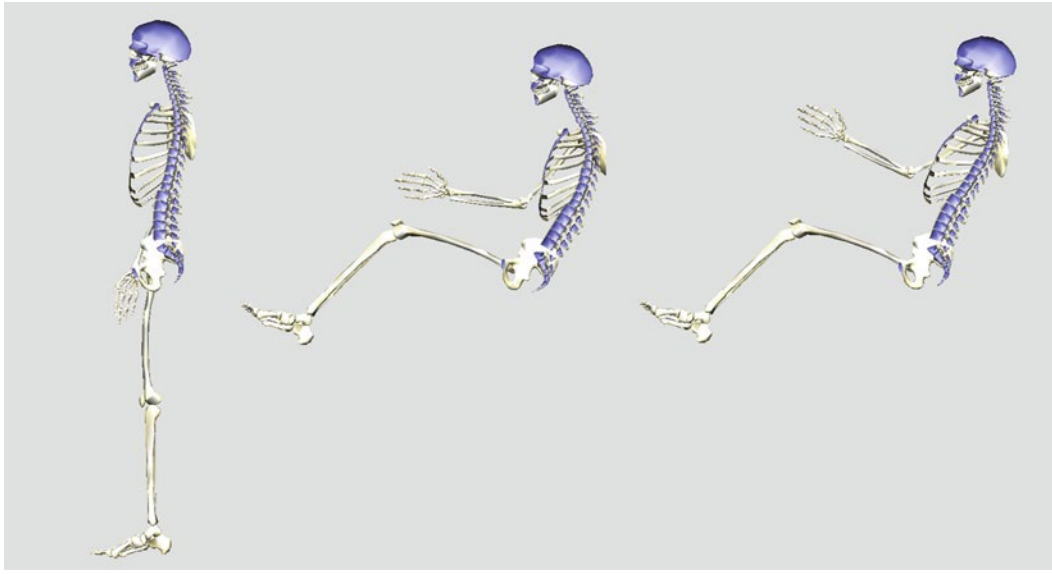


Abb. 4.6 Vergleich der stehenden und sitzenden Haltung

mit seiner besonderen Aufgabe als Teil des Kopfgelenks. Die Wirbelsäule wird in 5 Teilbereiche unterteilt: Die Halswirbelsäule mit 7 *Zervikalwirbeln* (C1–C7), die Brustwirbelsäule mit 12 *Thorakalwirbeln* (Th1–Th12) und die Lendenwirbelsäule mit 5 *Lumbalwirbeln* (L1–L5). Diese 24 Wirbel bilden die sogenannte freie (*präsakrale*) Wirbelsäule, deren Wirbel jeweils mit Zwischenwirbelscheiben (*Discus intervertebralis*) verbunden sind. Die freie Wirbelsäule entspricht etwa 35 % der Körperlänge und ist deshalb bei Erwachsenen 53–70 cm lang. Unterhalb der freien Wirbelsäule schließt sich das Kreuzbein (*Os sacrum*) an, das sich aus 5 verwachsenen *Sakralwirbeln* zusammensetzt, sowie das Steißbein (*Os coccygeum*), das aus 4–5 rudimentären *Coccygealwirbeln* besteht. Bei aufrechter Stehhaltung weist die Wirbelsäule in der Sagittalebene einen doppelt S-förmig gekrümmten Verlauf auf. Wobei die Hals- und Lendenwirbelsäule konvex nach vorne gekrümmt sind (*Lordose*) während die Brust- und Sakralwirbelsäule konkav nach hinten gewölbt sind (*Kyphose*). Diese Krümmungstendenz bleibt prinzipiell auch in sitzender Haltung erhalten, jedoch zeigt sich insbesondere im Bereich der Lendenwirbelsäule – vor allem nach längerer Fahrtzeit – eine Tendenz zur Kyphose, wodurch sich die Beanspruchung im Bereich der Wirbel L3/L4 und L4/L5 stark erhöht.

Ein Vergleich der Wirbelsäule im Stehen (Abb. 4.6 links) und Sitzen (Abb. 4.6 Mitte) zeigt deutlich den doppelt S-förmigen Verlauf, mit einer stärkeren Krümmung im Nackenbereich (Halswirbelsäule) im Sitzen und einer flacheren Lordose im Bereich der Lendenwirbelsäule[3]. Hierbei werden insbesondere die unteren Wirbel der Lendenwirbelsäule und das Kreuzbein beansprucht, sodass es zu Schmerzen oder sogar zu einem Bandscheibenvorfall (*Nucleus-pulposus-Prolaps*) kommen kann. Die Unterstützung der Lendenwirbelsäule im Sitzen mit einer Lordosenstütze, wie sie in vielen Fahrzeugsitzen verfügbar ist, führt zu einer Wiederherstellung der Lordose und entlastet den einseitigen Druck auf die Bandscheiben der Lendenwirbelsäule (Abb. 4.6 rechts). Die steilere Lage der Sitzrückenlehne sowie die Verwendung der Lordosenstütze hat damit eine Vielzahl an positiven und gesundheitsfördernden Effekten, die die körperlichen Nachteile der im Grunde ungesunden Sitzhaltung lindern (s. u. und die Abhandlung in ▶ Abschn. 7.2.2.1).

Der Aufbau der freien Wirbel (Abb. 4.7) ist gekennzeichnet durch den zentralen Wirbelkörper (*Corpus Vertebrae*) der in seiner Mulde (*Incisura vertebralis*) die Bandscheibe aufnimmt und an dessen Rand der Faserring (*Anulus fibrosus*) verwachsen ist. Dorsal

3 Die Lendenwirbelsäule wird mit LWS abgekürzt.

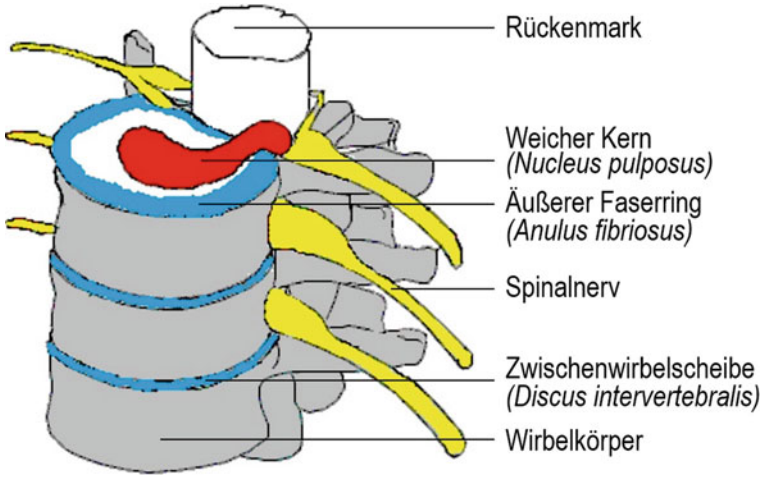


Abb. 4.7 Aufbau eines Wirbels

schließen sich außen je ein Querfortsatz (*Prozessus transversus*), der die gelenkige Verbindung zu den Rippenbögen darstellt, und zentral der Dornfortsatz (*Prozessus spinosus*) an, der sich äußerlich als deutlich sichtbarer Rückenkamm abzeichnet. Diese Fortsätze sind durch den Wirbelbogen (*Arcus Vertebrae*) verbunden, der mit dem Wirbelkörper das Wirbelloch (*Foramen vertebrae*) öffnet, dessen Gesamtheit über alle Wirbel als Rückenmarkskanal bezeichnet wird und das Rückenmark aufnimmt. An dem Wirbelbogen befinden sich noch die vier (zwei obere und zwei untere) Gelenkfortsätze (*Processus articularis*). Zwei benachbarte Wirbel bilden durch den oberen Einschnitt am Wirbelbogen (*Incisura vertebralis superior*) das Zwischenwirbelloch, aus dem seitlich Spinalnervenstränge austreten. Die außerordentlich bedeutsame Aufgabe der Wirbelsäule ist an der komplexen Beweglichkeit seiner Elemente ablesbar. So sind die Gelenkflächen der Fortsätze echte Gelenke (*Diarthrosen*) und erlauben als plane Gelenke seitliche Verschiebungen und sehr hohe Lastaufnahmen in Normalwirkrichtung. Die die Wirbelkörper verbindende Bandscheibe stellt mit dem Faserring, der jeweils mit den angrenzenden Wirbelkörpern verwachsen ist, ein unechtes Gelenk (*Synarthrose*) dar, lässt geringfügig Winkeländerungen zu und fixiert die Lage der Wirbelkörper zueinander. Der Zwischenwirbelscheibe mit ihrem gallertartigen inneren weichen Kern (Nucleus pulposus) kommt die Aufgabe der Stoßdämpfung in vertikaler Richtung zu. Die große Flexibilität der Wirbelsäule mit allen Möglichkeiten des Beugens und Streckens des Oberkörpers und auch der seitlichen Rotation des Torsos gegenüber dem Becken erzeugt stark unterschiedliche und einseitige Belastungen der Wirbelgelenke, deren ausgleichende Wirkung durch die homogene Verteilung der Auflagekräfte nur durch ein viskoses Medium erbracht werden kann. Eine besondere Belastungssituation für die Bandscheiben sind sprunghafte Bewegungsänderungen (plötzliches Bücken oder Drehen oder Heraufreißen einer zu großen Last) oder dauerhafte Winkelstellungen an der Beweglichkeitsgrenze (Sitzen oder Kauern bei gleichzeitiger Belastung des Schultergürtels), bei dem der Faserring außerordentlich belastet wird, so dass es zu Rissen kommen kann, durch die es, wegen des zusätzlichen inneren Druckes im weichen Kern, zu einem Herausquetschen des Nucleus kommen kann. Man spricht hier von einem Bandscheibenvorfall (*Prolapsus nuclei pulposi*), der sehr schmerzhaft sein kann, wenn durch den austretenden Nucleus Nervenstränge abgedrückt werden. Dies kann sogar zu lokalen Lähmungen der unteren Extremitäten führen.

Eine ungünstige Fahrerhaltung kann eine Ursache für die übermäßige Belastung der Bandscheiben im Lendenwirbelbereich sein. Wenn auch das Autofahren mit seiner sitzenden Haltung nicht der alleinige Grund für einen Bandscheibenvorfall sein kann, ist eine dauerhafte Fehlhaltung der Wirbelsäule durch die Fahrhaltung bei einer entsprechenden Vorschädigung der Bandscheibe durch Unterversorgung mit Nährstoffen (Austrocknung)

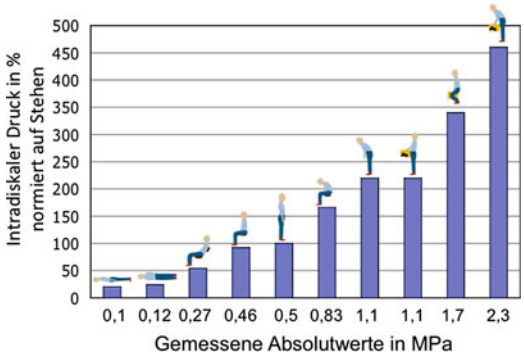


Abb. 4.8 Darstellung des intradiskalen Bandscheibendrucks in Abhängigkeit der Haltung. Entnommen aus Wilke et al. (1999)

eine häufige Situation, bei der es zu einem Prolaps kommen kann. Da die Bandscheiben, wie auch die Gelenkknorpelflächen nicht aus dem Blutkreislauf heraus, sondern durch Diffusion mit Nährstoffen versorgt werden, ist eine ausreichende wasser- und nährstoffreiche Versorgung durch eine ständige Bewegung der Wirbel notwendig. Im Umkehrschluss sind zu geringe Wasseraufnahme und Bewegungsmangel verantwortlich für die Vorschädigung der Gelenk- und Knorpelflächen und damit auch der Bandscheiben. Viele Fahrzeugnutzer neigen zu einer zu flachen Lehnenneigung einhergehend mit der starken Wölbung der Wirbelsäule im Lendenbereich. Diese kyphotische, „lässige" Haltung dehnt jedoch die Bandscheiben der Lendenwirbelsäule stark und kann zu einer Schädigung führen. Sie kann langfristig ein Kriechen der Bänder bewirken, wodurch die Stabilität des Bewegungsapparates abnimmt und die Rückenmuskulatur die Aufgabe der Bänder übernehmen muss. Weiterhin kann über eine lang andauernde Hyperflexion (sehr starke Beugung) durch die starken Zugspannungen in der Kollagenmatrix des Faserrings ein Bandscheibenvorfall begünstigt werden. Andererseits konnte Wilke (2004) zeigen, dass mit einer moderaten Flexion der Lendenwirbelsäule eine Reduktion der Lastübertragung über die Facettengelenke sowie eine deutliche Druckreduktion in den Bandscheiben einhergeht (siehe Abb. 4.8). Somit konnte gezeigt werden, dass die sogenannte „lässige Lümmelhaltung" zu Unrecht einen so schlechten Ruf genossen hat. Früher galt als gesund, stattdessen eine aufrechte Körperhaltung einzunehmen, welche allerdings nach Abb. 4.8 mit einem deutlich höheren Bandscheibeninnendruck einhergeht. Dies hängt damit zusammen, dass ohne äußerliche Unterstützung die Rumpfmuskulatur allein für die Aufrechterhaltung des Oberkörpers verantwortlich ist. Somit besteht eine konstante Anspannung der Muskulatur vor (Bauchmuskulatur) und hinter (Rückenmuskulatur) der Bandscheibe. Folglich wird die Bandscheibe noch mehr als bereits durch die Gravitation bedingt komprimiert (Wilke 2004; Dolan 2006). Andererseits wird einer aufrechten Sitzhaltung mit einer steilen Lehne und guter Unterstützung im Lendenwirbelbereich (Lordosenstütze) eine entlastende Wirkung für die Bandscheiben zugeschrieben. Zumindest wird dadurch der Oberkörper aufgerichtet, wodurch der Augenpunkt ebenfalls ansteigt, was der besseren Übersicht im Straßenverkehr dient. Gleichzeitig wird der Druck auf die inneren Organe reduziert, wodurch die Atmung erleichtert und die Blutzirkulation gefördert wird (Faller 1999). Die Entfernung zum Lenkrad wird verringert, was die Beherrschbarkeit des Fahrzeuges fördert. Diese Haltung wird üblicherweise im Fahrsicherheitstraining professioneller Fahrtrainer empfohlen und eingeübt.

Die Bandscheiben selbst besitzen keine Schmerzrezeptoren. Schmerzen im Bereich des Rückens können also im Wesentlichen nur durch den einklemmenden Druck eines austretenden Nucleus auf einen Nervenstrang oder die Schmerzrezeptoren in der Rückenmuskulatur entstehen. Offensichtlich können bereits leichte durch ungünstige Haltung hervorgerufene Muskelspannungen bei längerem Andauern zu solchen Schmerzen führen. Der individuell korrekten Körperhaltung, durch die ungünstige Minimal-Muskelspannungen vermieden werden, ist also zur Vorbeugung von Rückenschmerzen neben der Möglichkeit der Bewegung besondere Beachtung zu schenken (siehe hierzu auch ▶ Abschn. 7.2.2.1).

Gerade im Bereich der Wirbelsäule sind häufig starre Ansichten (schlechte Lümmelhaltung, Überlegenheit einer aufrechten Haltung, korrekte Einstellung einer Lordosenstütze) vorzufinden. Wilke (2004) konstatiert: „Dogmen sollten in der Rückenschule nicht existieren. Was für den einen Patienten

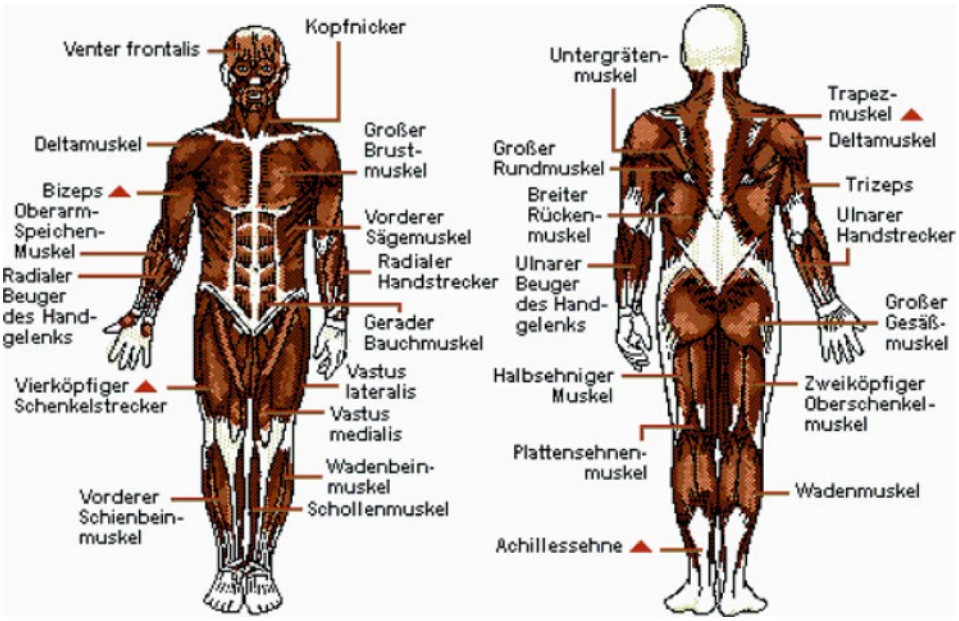


Abb. 4.9 Die Skelettmuskulatur

mit Bandscheibenproblemen gut ist, mag für den anderen mit Arthrose in den kleinen Wirbelgelenken schlecht sein". In jedem Fall ist von einer zu langen statischen Sitzposition ohne Haltungswechsel abzuraten. Hierdurch wird die gesamte Flüssigkeit aus der Bandscheibe herausgepresst und es ist keine effiziente Lastenaufnahme mehr möglich (Pope 2006; Adams 2006).

4.1.2 Muskulatur

Fabian Günzkofer

Neben dem passiven Bewegungsapparat mit seinen Knochen und Gelenken ist die quergestreifte[4] Skelettmuskulatur zusammen mit ihren Hilfsorganen wie Sehnen, Bändern und Sesambeinen[5] als aktiver Bewegungsapparat für die Mobilität entscheidend (siehe Abb. 4.9). Generell ist der Muskelbauch, der die Ansammlung einzelner Muskelzellen (Muskelfasern) darstellt über eine oder mehrere Sehnen an das Skelett angebunden. Im Unterschied zu dem rhythmisch arbeitenden Herzmuskel und der vom vegetativen Nervensystem gesteuerten glatten Muskulatur des Darmes ist die Skelettmuskulatur bewusst und willkürlich vom Menschen steuerbar. Diese Steuerung ist jedoch immer aufgaben- und zweckgebunden und kann gezielte Bewegungen herbeiführen, wenn auch die isolierte zweckfreie Kontraktion singulärer Muskelfasern nicht möglich ist. Die Aufgabe der Muskeln besteht einerseits aus dynamischen Kontraktionsvorgängen, um mit dem passiven Bewegungsapparat mechanische Arbeit zu verrichten, sowie statische Versteifungsvorgänge, um bevorzugte Haltungen zu stützen.

4.1.2.1 Muskelkräfte

Ein Muskel besitzt über Sehnen Ursprung und Ansatz an unterschiedlichen Knochen und überzieht mindestens ein Gelenk. Somit resultieren aus Muskelkräften, welche Drehmomente auf die Gelenke ausüben, relative Rotationen der Knochen zueinander. Um die Funktionsweise eines Muskels zu verstehen, ist ein Grundverständnis über den prinzipiellen Aufbau erforderlich. Eine mit bloßen Augen sicht-

4 Von der quergestreiften, der Willkür zugänglichen Muskulatur des aktiven Bewegungsapparates ist die glatte Muskulatur der inneren Hohlorgane (außer dem Herz) als kontraktiles Gewebe zu unterscheiden.

5 Sesambeine sind in Sehnen eingelagerte Knochen.

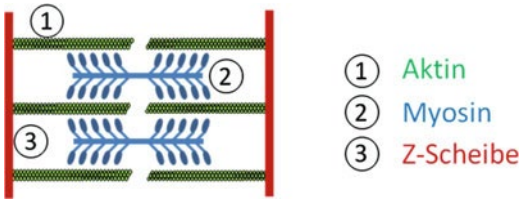


Abb. 4.10 Illustration der Bestandteile eines Sarkomers

bare Muskelfaser setzt sich mikroskopisch aus einzelnen Myofibrillen zusammen, welche eine durch z-Scheiben getrennte Aneinanderreihung einzelner Sarkomere darstellt (Campbell und Reece 2005; Tittel 2003). Sarkomere bestehen aus den zwei Proteinsträngen Aktin und Myosin und stellen die eigentliche kontraktile Einheit dar (siehe Abb. 4.10). Jeweils sechs dünne Aktinfilamente, welche an den z-Scheiben befestigt sind, umgeben ein dickes Myosinfilament. Die Myosinfilamente sind lange Proteinstränge mit Myosinköpfchen, welche in Richtung der Aktinfilamente ausgerichtet sind.

4.1.2.2 Muskelkontraktion

Eine Muskelkontraktion wird durch ein Aktionspotential des Nervensystems initiiert, wodurch Ca2+ in das Innere der Muskelzelle (Cytosol) ausgeschüttet wird (Sherwood 2012). Hierdurch werden die Anbindestellen des Aktins für die Myosinköpfchen freigelegt. Für die eigentliche Kontraktion ist Energie in Form von Adenosintriphosphat (ATP) nötig, welches an die Myosinköpfchen bindet. Durch eine Hydrolyse des ATP zu Adenosindiphosphat (ADP) und zu einem anorganischen Phosphat wird das Myosinköpfchen gekippt und bildet eine Querbrücke zum Aktinfilament aus. Unter Freisetzung der Reaktionsprodukte kippt der Kopf zurück, wodurch eine relative Bewegung zwischen Aktin und Myosin entsteht (Campbell und Reece 2005). In Summe ergeben mehrere sequentiell ablaufende mikroskopische „Ruderbewegungen" eine makroskopisch wahrnehmbare Muskelverkürzung. Die zuvor beschriebene Kontraktion ergibt eine Muskelkraft in Längsrichtung der Muskelfaser. Hierbei korrespondiert die Höhe der resultierenden Kraft mit der Anzahl der involvierten Querbrücken.

Abbildung 4.11 veranschaulicht, dass die Muskelkraft mit zunehmender Muskellänge anfänglich zunimmt, auf einem Plateau ihr Maximum erreicht

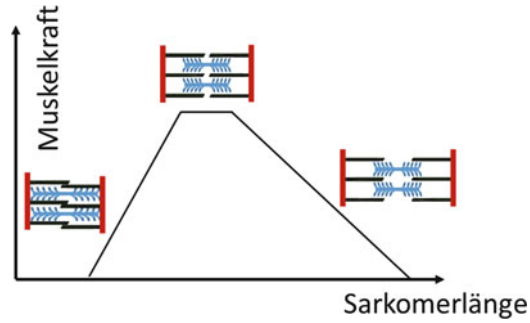


Abb. 4.11 Qualitative Darstellung der Muskelkraft-Muskellängen-Relation

und schließlich wieder abnimmt. Dies hängt mit der geometrischen Interaktion der Proteine Myosin und Aktin zusammen. Bei sehr kurzer Muskellänge überlagern sich die einzelnen Aktinfilamente selbst und behindern somit zum Teil ein Anbinden der in Frage kommenden Myosinköpfchen. Im Extremfall stoßen die Myosinfilamente an die z-Scheiben, wodurch eine weitere Verkürzung verhindert wird. Im Bereich des Plateaus spricht man von idealer Muskellänge, da die höchste Anzahl an Querbrücken ausgebildet und somit auch die höchste Muskelkraft erzeugt werden kann. Bei weiterer Zunahme der Sarkomerlänge beginnt die Abnahme der Fläche sich überschneidender Proteinfilamente. Als Folge nimmt die Muskelkraft wieder idealisiert linear ab. Betrachtet man nicht nur ein einzelnes Sarkomer, lässt sich im Gesamtsystem Muskel jedoch feststellen, dass die Gesamtkraft des Muskels mit weiterer Dehnung zunimmt. Dies liegt an den passiven Rückstellkräften der überdehnten parallel-elastischen Komponenten in Form von Bindegewebe und Muskelfasermembran (Winter 2005; Knudson 2007).

Neben der Muskellänge hängt die Muskelkraft weiterhin von der Kontraktionsgeschwindigkeit ab (Hill 1938). Bei dynamischer Muskelarbeit muss zwischen konzentrischer und exzentrischer Kontraktionsart unterschieden werden (Chaffin et al. 1999). Im Falle einer Muskelverkürzung unter Kraftaufbringung, z. B. beim Anheben einer Last, spricht man vom konzentrischen Lastfall. Der exzentrische Fall tritt ein, falls sich der Muskel unter Belastung verlängert, z. B. beim feinmotorischen Absetzen einer Last.

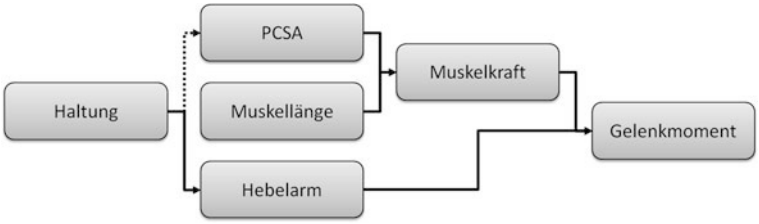


Abb. 4.12 Darstellung des Zusammenhangs zwischen Haltung, PCSA und Gelenkmoment

Im konzentrischen Fall wird davon ausgegangen, dass die Kraft im Vergleich zum isometrischen Fall parabolisch mit der Winkelgeschwindigkeit der Gelenkdrehung abnimmt. Zu erklären ist dies damit, dass zum gleichen Zeitpunkt weniger Querbrücken aktiv sein können. Weiterhin werden in der Fachliteratur Reibungseffekte durch Viskositätszunahme genannt (Winter 2005). Im Falle des exzentrischen Lastfalls herrscht weiterhin Uneinigkeit in der Wissenschaft. Der Großteil vorhandener Studien beschreibt eine Maximalkrafterhöhung um das bis zu zweifache im Vergleich zur isometrischen Situation. Dies könnte dadurch erklärbar sein, dass das Aufbrechen der Querbrücken mehr Energie als die Aufrechterhaltung im isometrischen Fall erfordert (Winter 2005). Jedoch gibt es andere Studien, die von keiner Kraftpotenzierung im exzentrischen Fall ausgehen. Neuronale Inhibitionseffekte könnten zum Schutz des Bewegungsapparates die Kraft auf ein isometrisches Niveau begrenzen (Hahn 2008). Der Fokus der bisherigen Betrachtung lag auf der Struktur und Funktionsweise einzelner Sarkomere. An dieser Stelle sollen nun die Zusammenhänge aufgezeigt werden, wie hierdurch ein globales Gelenkmoment entsteht (Abb. 4.12). Wie bereits diskutiert hängt die produzierbare Muskelkraft signifikant von der Muskellänge ab. Übertragen auf den gesamten Bewegungsapparat wird dies durch den jeweiligen Gelenkwinkel beeinflusst. Weiterhin hängt die Kraft von der Gesamtzahl der parallel geschalteten Sarkomere aller beteiligten Muskelfasern ab. Dies wird durch den physiologischen Muskelquerschnitt (PCSA) angegeben, welcher in Abhängigkeit der Fiederung nicht zwangsläufig mit dem anatomischen Muskelquerschnitt übereinstimmen muss. Verlaufen die Muskelfasern in einem Winkel zur Muskellängsachse und setzen schräg an den Sehnen an, so wird bei gleichem anatomischem Muskelquerschnitt die Anzahl parallel liegender Sarkomere erhöht. Hierdurch wird die Kraft im Vergleich zu ungefiederten Muskeln erhöht, die Kontraktionsgeschwindigkeit jedoch reduziert. Der PCSA hängt somit vom Fiederungswinkel ab, welcher sich wiederum in geringem Maße mit der Haltung verändert (punktierte Abhängigkeit in Abb. 4.12).

Die erzeugte Muskelkraft wird schließlich über Sehnen an die anliegenden Knochen übertragen. Über den virtuellen Hebelarm zwischen Muskel-Sehnen-Einheit und Gelenkdrehachse entsteht ein korrespondierendes Gelenkmoment. Mit dem Gelenkwinkel wird sich folglich der Betrag des Hebelarmes ändern.

Das globale Gelenkmoment entsteht in Summe aus den Muskelkräften sowie Hebelarmen sämtlicher an der Bewegung beteiligten Synergisten. Zusammenfassend hängt das Gelenkmoment also in zweierlei Hinsicht von dem Gelenkwinkel ab. Zum einen durch den Einfluss auf die Muskellänge und zum anderen durch den Einfluss auf den Hebelarm.

Eine Besonderheit von Muskeln besteht darin, dass sie nur kontrahieren und sich nicht wieder aktiv verlängern können. Somit kann eine feinmotorische Einstellung von Haltungen und Bewegungen nur durch Gegenspieler erfolgen, welche durch ihre Kontraktionsfähigkeit diese fehlende Möglichkeit der Spieler kompensieren. Erst das Zusammenspiel aus Agonist und Antagonist ermöglicht somit eine Feinjustierung von Haltungen und Bewegungen (siehe hierzu ▶ Abschn. 3.2.3). Die Modellierung von Gelenkmoment-Gelenkwinkel-Funktionen erfolgt üblicherweise basierend auf empirischen Probandenversuchen, in welchen Probanden Maximalkräfte in unterschiedlichen Messhaltungen aufbringen. So wird unter Berücksichtigung der Kraft-Längen-Relation beispielsweise zur Messung von Knieextensionsmomenten der Knieflexionswinkel in diskreten Abstufungen variiert.

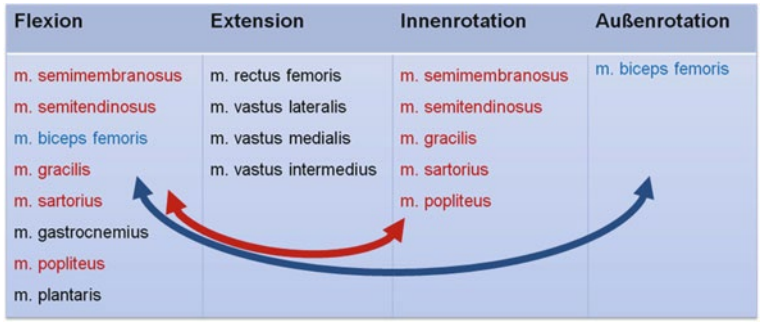


Abb. 4.13 Beteiligte Muskeln an verschiedenen Bewegungsrichtungen des Kniegelenks (rot = multifunktionale Muskeln, blau = biartikulare Muskeln)

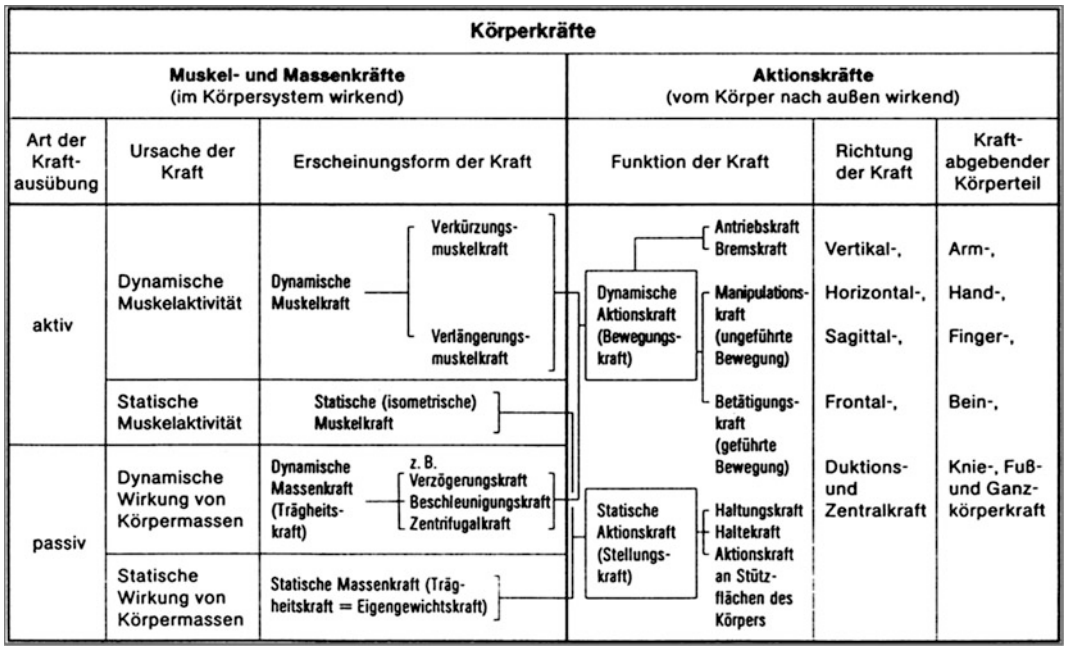


Abb. 4.14 Übersicht der Muskelkräfte (nach DIN 33 411, Teil 1)

Um den ganzheitlichen Zusammenhang zwischen Gelenkwinkeln und Gelenkmomenten zu verstehen, sind jedoch weiterhin Multifunktionalität und Zweigelenkigkeit von Muskeln zu beachten. Um diese Problematik anschaulich nachvollziehen zu können, sind in Abb. 4.13 beispielhaft die Muskeln des Kniegelenks zusammengestellt.

Da willkürlich dosierte Muskelkräfte aufgebracht werden können, verzeichnet man für eine wissenschaftliche Darstellung der Muskelkräfte grundsätzlich die maximalen Muskelkräfte. Abbildung 4.13 zeigt, dass bestimmte Muskeln (z. B. m. semimembranosus) nicht nur flektierende, sondern auch eine innenrotierende Wirkung haben. Folglich verändert sich deren Muskellänge nicht nur durch Flexion, sondern auch durch Innenrotation. Das heißt, bei gleichem Flexionswinkel kann ein unterschiedlicher Innenrotationswinkel zu einer anderen Muskellänge bestimmter Flexoren führen. Somit kann generell geschlossen werden, dass das maximale Moment eines Freiheitsgrades im Falle multifunktionaler Muskeln auch von weiteren Freiheitsgraden des gleichen Gelenks abhängt. Darüber hinaus ist weiterhin die Beteiligung zweigelenkiger (biartikularer) Muskeln zu berücksichtigen. Beispielsweise entspringt der musculus biceps femoris dem Sitzbein des Beckens (tuber ischiadicum) und setzt am Wadenbein (caput fi-

Belastung durch	Faustschluß um einen Zylinder von 40 mm Durchmesser	Druck des Daumens gegen vier Finger	Betätigung einer Druckleiste durch den Daumenballen	Druck des Daumens gegen die Zeigefingerseite
Maximalkraft in N	410	190	180	120

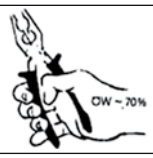
Belastung durch	Betätigen eines Daumenschalters, Zeigefinger gegenhalten	Betätigen eines Druckknopfes mit dem Daumen	Betätigen eines Einfingerdruckknopfes (Zeigefinger)	Schließen von Zangengriffen
				
Maximalkraft in N	100	100	60	316 (Frauen) 613 (Männer)

Abb. 4.15 Betätigungsarten der Hand und durchschnittlich mögliche Kräfte

bulae) an. Somit überspannt dieser Muskel gleich zwei Gelenke und bewirkt im Knie eine Beugung sowie in der Hüfte eine Streckung. Folglich ist die Muskellänge nicht nur von der Knieflexion, sondern auch vom Hüftflexionswinkel abhängig. Um insgesamt maximale Knieflexionsmomente für beliebige Haltungen zu prognostizieren sind also Probandenversuche notwendig, welche theoretisch unter verschiedenen Knieflexions-, Knieinnenrotations- und Hüftflexionswinkel durchgeführt werden. Die Ergebnisse von Günzkofer et al. (2011a) zeigen, dass in der Praxis die Betrachtung unterschiedlicher Flexionswinkel von Knie und Hüfte ausreicht. Abbildung 4.14 zeigt eine Zusammenstellung des komplexen Zustandekommens von Körperkräften.

Ähnliche Effekte treten bei der äußerst komplexen Beweglichkeit der Hand auf. In Abb. 4.15 sind für verschiedene Betätigungsarten die möglichen Maximalkräfte dargestellt. Diese Zusammenstellung ist als Illustration für die betätigungsabhängige Variabilität der Kräfte zu verstehen; denn tatsächlich ergeben sich gegenüber den dort wiedergegebenen Angaben erhebliche individuelle Variationen.

4.1.2.3 Individuelle Variabilität

Körperkräfte unterliegen in hohem Maße interindividueller Variabilität. Dazu gehören vor allem Motivation, Händigkeit und Trainingszustand. Für die Fahrzeuggestaltung sind dabei insbesondere Einflüsse durch Alter und Geschlecht zu beachten.

Geschlecht

Frauen weisen im Durchschnitt geringere Körperkräfte als Männer auf. Diverse Quellen belegen, dass diese Unterschiede je nach Gelenk unterschiedlich sein können. Gemäß Churchill et al. (1978) besitzen Frauen 70 % der Kraft von Männern im Bereich der unteren Extremitäten, 63 % im Bereich des Rumpfes und 55 % im Bereich der oberen Extremitäten. Diese Ergebnisse decken sich gut mit den Angaben von Hosler und Morrow (1982). Diese beschreiben ein Verhältnis von 60 % bei Armkräften und 74 %

bei Beinkräften. Sehr ähnlich berichten Lee und Bruckner (1991), dass Frauen 49–55 % der Armkraft von Männern aufweisen. Auch D'Souza et al. (2011) verzeichnen in ihren Versuchen ein Verhältnis von 60 % für Knieextensionsmomente und 49 % für Ellbogenflexionsmomente. Folglich kann festgehalten werden, dass unterschiedliche Studien zu dem Resultat kommen, dass die Unterschiede bei den oberen Extremitäten (wesentlich) größer als bei den unteren Extremitäten sind (Hafez et al. 1982). Auf Grund dieser deutlichen Unterschiede drängt sich die Frage auf, ob diese Unterschiede rein durch das Geschlecht determiniert sind oder diese Korrelation nicht eher durch weitere Variablen kausal beeinflusst werden. In der Tat konnten Hosler und Morrow (1982) zeigen, dass die signifikanten Kraftunterschiede marginal wurden, sobald anthropometrische Effekte abgezogen wurden. Schließlich konnten nur noch 2 % der Varianz bei den Armkräften und 1 % der Varianz bei den Beinkräften durch den Faktor Geschlecht erklärt werden. In gleicher Weise belegen Schantz et al. (1983); Bishop et al. (1987) sowie Holzbaur et al. (2007), dass die Kraftunterschiede vielmehr auf unterschiedliche Muskelvolumen zurückzuführen sind.

Unabhängig davon, worin diese Unterschiede begründet liegen, führt Wakula et al. (2009) als einfache Faustformel an, dass Frauen durchschnittlich die halbe Kraft von Männern aufbringen können. Daams (1994) fasst den Bereich etwas weiter und erhöht das Intervall auf Grund der starken Heterogenität vorliegender Studien auf 0,5 bis 0,75.

Alter

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist der Kraftverlust auf Grund des Alterns (Samuel und Rowe 2009; Hurley 1995; Goodpaster et al. 2001; Herzog 2004). Es ist generell anerkannt, dass Körperkräfte bis zu einem Alter zwischen 25 und 30 Jahren ansteigen und anschließend wieder abfallen (Hettinger 1968; Rohmert und Hettinger 1963; Hurley 1995; Morgan et al. 1963; VanCott und Kinkade 1972). Morgan et al. (1963) sowie VanCott und Kinkade (1972) beschreiben, dass die Kräfte nach dem erreichten Peak bis zu einem Alter von ca. 40 Jahren nahezu konstant bleiben. Mit 50 Jahren sind noch ca. 85 % und mit 60 Jahren noch ca. 80 % der ursprünglichen Kräfte erhalten (Morgan et al. 1963). Hurley (1995) quantifiziert den Kraftverlust vereinfacht mit 12–15 % pro Dekade, beginnend mit dem 50. Lebensjahr. Verschiedene Studien zeigen, dass die unteren Extremitäten stärker vom Alterungsprozess als die oberen Extremitäten betroffen sind (Thompson 1994; Bemben et al. 1991; Frontera et al. 1991; VanCott und Kinkade 1972).

Der Grund für die Abnahme der Maximalkräfte liegt hauptsächlich in einer Atrophie der Muskulatur begründet (Herzog 2004; Goodpaster 2001). Darüber hinaus könnte auch ein erhöhter Anteil an Kokontraktionen der Antagonisten für die Reduktion der resultierenden Kräfte verantwortlich sein (Duchateau et al. 2006). Weiterhin sind neuromuskuläre Funktionen vom Altern betroffen (Bassey u. Short 1994).

In der Literatur ist eine enorme Fülle an Studien erhältlich, welche sich für jedes Gelenk mit Alterseffekten auf Maximalkräfte beschäftigen. Für ein tiefergehendes Studium sei exemplarisch auf Daams (2004) und Kulig et al. (1984) verwiesen. An dieser Stelle sollen lediglich zwei Werke erwähnt werden. Stoll et al. (2000) haben an 290 Frauen (20–82 Jahre) und 253 Männern (21–79 Jahre) die Kräfte aller Gelenke des Körpers gemessen. Basierend auf den Ergebnissen wurden Regressionsgleichungen veröffentlicht, mit deren Hilfe für ein beliebiges Alter die Kraft eines Gelenks prognostiziert werden kann. Weiterhin sei auf eine der aktuellsten Reihenmessungen von Ellbogenflexions- und Knieextensionsmomenten von D'Souza et al. (2011) verwiesen. In dieser Studie wurden 141 männliche und 142 weibliche Probanden zwischen 50 und 79 Jahren mit dem isokinetischen Testgerät IsoMed 2000 vermessen. Mit Hilfe der resultierenden Gelenkmomente wurden lineare Regressionsgleichungen gebildet, welche mit Hilfe der Prädiktoren Geschlecht, Alter und Unterarmmasse bzw. Oberschenkelmasse die maximalen Gelenkmomente für Knieextension und Ellbogenflexion angeben (siehe auch ► Abschn. 4.2.3.3).

4.2 Anthropometrie

Ergänzend zur Anatomie liefert die Anthropometrie[6] die Maße des Körpers und die Methoden zur deren Ermittlung. Die ergonomischen Ziele der Anthropometrie bestehen in einer nutzerzentrierten Auslegung von Arbeitsplätzen und Produkten sowie einer Festlegung von Sicherheitsmaßnahmen. Hierzu werden als Maße Längen- und Umfangsmaße, Körperteilgewichte, Bewegungsräume, Greifräume, visuelle Daten (Sehachsen, Gesichtsfelder) und Kräfte betrachtet. Besonderer Schwerpunkt der Anthropometrie ist die Ermittlung der Abmaße der Extremitäten sowie deren Lage zueinander. Ebenfalls werden die Beweglichkeit und Reichweiten der Extremitäten sowie deren Kraftvermögen betrachtet. Von besonderem Interesse sind natürlich die Lage und Bewegungen der Gelenke sowie die Kinematik lebender Menschen. Hier lässt sich aber nur die Wirkung am äußerlich sichtbaren Körper beobachten und leider nicht die exakte Lage der Gelenkpartner in der Bewegung, da diese Orte von Gewebe, Muskel und Haut verdeckt sind. Zur Messung der geometrischen anthropometrischen Maße haben sich zwei Methoden etabliert, die je nach technischem Aufwand und Verfügbarkeit zur Anwendung kommen.

4.2.1 Längen- und Umfangsmaße

Rainer E. Grünen, Fabian Günzkofer

4.2.1.1 Erfassung von Körpermaßen

Eine entscheidende Anforderung an die Messung von Körpermaßen besteht in einer abgesicherten Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messreihen. Martin (1914) hat eine Standardisierung etabliert, in welcher Längenmaße grundsätzlich als Strecken von Knochenpunkt zu Knochenpunkt erfasst werden. Als Knochenpunkte werden prominente knöcherne Stellen nahe der Körperoberfläche bezeichnet, welche leicht auffindbar sind und im Gegensatz zu Weichteilen nicht vom Anlagedruck des Messinstruments abhängen. Weitere Messregeln sind in der DIN 33402 Teil 1 zusammengestellt. Diese besagen, dass Messungen in vorgeschriebenen Haltungen am nackten Menschen nur an der rechten Körperseite durchgeführt werden. Es ist jedoch anzumerken, dass die Forderung der Nacktheit eine eher theoretische Anforderung darstellt, welche in der Praxis keine häufige Berücksichtigung findet. Für die praktische Erfassung von Körpermaßen hat sich die händische Methode mithilfe des Martin'schen Messbestecks weltweit etabliert. Andererseits sind in jüngster Zeit optische Methoden entstanden, sog. Bodyscanner, die ein berührungsfreies Messen der Probanden erlauben.

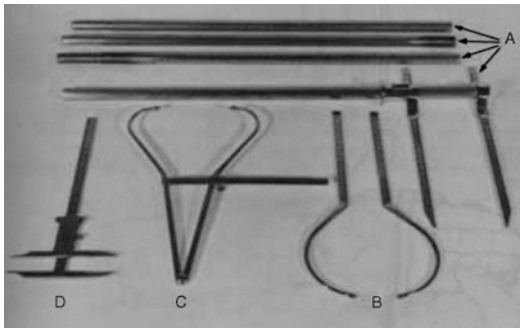


Abb. 4.16 Martin'sches Messbesteck

Messmethode nach Martin

Das Martin'sche Messbesteck besteht aus einer Sammlung von steckbaren Maßstäben und Tastzirkeln mit denen äußerlich Maße abgenommen werden können. Enthalten ist eine vierteilige steckbare Röhrenskala von 0–1950 mm, mit der sich Längenmaße wie Körperhöhe und Stammlänge bestimmen lassen. Des Weiteren sind ein Tastzirkel mit 450 mm Messweite sowie gerade und gebogene Maßstäbe enthalten. Ein Gleitzirkel zur Dickenmessung bis 200 mm sowie ein 2000 mm langes Bandmaß ergänzen das Set (Abb. 4.16).

6 Anthropometrie ist ein zusammengesetztes Kunstwort aus den altgriechischen Wörtern anthropos = Mensch und metrein = messen. Sie wird als Wissenschaft der menschlichen Maße u. a. als ein Teilgebiet der Anthropologie betrachtet. Die naturwissenschaftliche Anthropologie befasst sich mit der Abstammung des Menschen, seiner Entwicklung, Differenzierungen und Ausbreitung. Die philosophische Anthropologie sucht das Wesen und die Bestimmung des Menschen zu erhellen.

Abb. 4.17 Bodyscanning (Beispiel Vitus von Human Solutions GmbH)

Die Erfassung der Körperhöhe erfolgt gemäß Messvorschrift in einer maximal gestreckten Haltung, wobei der Kopf in der „Frankfurter Horizontalen" zu halten ist (horizontale Ausrichtung der Verbindungslinie vom höchsten Punkt des Gehörganges sowie tiefstem Punkt der knöchernen Augenhöhle). Es ist anzumerken, dass der Praxisbezug sämtlicher Maße nicht aus den Augen verloren werden darf. Die Vorgabe der maximalen Streckung ermöglicht zwar eine reproduzierbare Maßerfassung, entspricht jedoch meist nicht den eher physiologisch bedingten Arbeitshaltungen. Folglich würde beispielsweise die Augenhöhe im Stehen bei lockerem Stand durch eine stringent anthropometrische Vermessung deutlich überschätzt werden. Die Martin'sche Methode wurde bei vielen klassischen Körpervermessungen angewandt und ist stark von der Erfahrung und der Sorgfalt des messenden Personals abhängig. Oftmals wurden die Daten aus Gründen des Persönlichkeitsschutzes nur an bekleideten Personen vorgenommen, was die Identifikation der entsprechenden Messpunkte zusätzlich erschwert. So sind Messwerte von unterschiedlichen Instituten oftmals nicht oder nur eingeschränkt miteinander vergleichbar. Eine Nachvollziehbarkeit oder Zweitprüfung ist hierbei nicht möglich, da die Daten alleine eine Momentsituation darstellen. So sind bei einer zeitnahen Zweitvermessung derselben Person oftmals erhebliche Abweichungen festzustellen. Diese manuelle Maßerfassung wird heute in den meisten Fällen nur noch eingesetzt, falls pro Proband lediglich eine geringe Anzahl an Körpermaßen zu erfassen ist. Andernfalls ergibt sich ein enorm hoher personeller und zeitlicher Aufwand. Darüber hinaus stellt die manuelle Messung auf Grund der Anforderung nach wenig Bekleidung einen starken Eingriff in die Persönlichkeit der Probanden dar.

Bodyscanning

Der aktuelle Stand der Technik besteht im Einsatz von sog. Bodyscannern (Abb. 4.17). Hierbei wird die Körperoberfläche mit Hilfe von Laserstrahlen dreidimensional erfasst (siehe hierzu auch ▶ Abschn. 11.2.1). Der Einsatz entsprechender Software erlaubt die Extraktion von relevanten Körpermaßen. In Deutschland wurde mit dieser Technologie in den Jahren 2007–2009 eine großangelegte Reihenvermessung namens SizeGERMANY durchgeführt, bei der über 13.000 Männer, Frauen und Kinder im Alter von sechs bis 87 Jahren an ca. 30 Standorten in ganz Deutschland vermessen wurden (Seidl et al. 2009). Die so gewonnenen Daten haben zu neuen Erkenntnissen geführt, die für die zukünftige Entwicklung von Bekleidungen, aber auch für die Automobilindustrie von großer Bedeutung ist. Verglichen mit den Daten früherer Vermessungen können Aussagen zur Bevölkerungsentwicklung und zu zukünftigen Tendenzen der Körperform getroffen werden. Die Genauigkeit der Datenaufnahme ist mit 1–2 mm um ein Vielfaches höher als mit manuellen Messmethoden und erlaubt eine eingehende und wiederholbare Analyse der Körperdaten. So lassen sich berührungsfrei und sehr detailliert Umfangs- und Längenmaße bestimmen, ohne die Person in ihrer Haltung oder Lage zu beeinflussen. Es lassen sich sogar automatisiert Datenpunkte abnehmen, wodurch eine einheitliche Vorgehensweise sichergestellt ist.

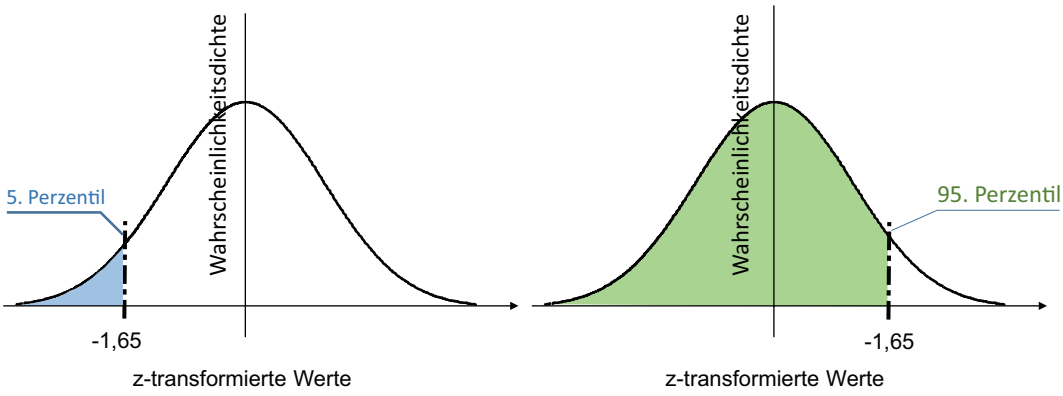


Abb. 4.18 Darstellung von 5. und 95. Perzentil in Standardnormalverteilungen

4.2.1.2 Charakterisierung von Körpermaßen

Perzentile

Um valide Aussagen zur Verteilung von Körpermaßen innerhalb einer Population treffen zu können, wird eine repräsentative Stichprobe von geeignetem Umfang gezogen. Die Lokalisierung einzelner Körpermaße innerhalb der Verteilung geschieht über das sog. Perzentil. Hierbei bedeutet ein Körpermaßwert des x. Perzentils, dass x % der Bevölkerung dieses Maß unterschreiten. Beispielsweise bedeutet eine Länge des 5. Perzentils, dass nur 5 % der Bevölkerung ein kleines Maß, aber 95 % ein größeres Maß aufweisen. Das 50. Perzentil entspricht dem Median sowie im besonderen Fall der Normalverteilung auch dem arithmetischen Mittelwert der Stichprobe. Als Vorteil für die anschließende Berechnung erweist sich, dass Körpermaße zumeist normalverteilt sind (Geuß 1994). Somit reichen die Angabe von Mittelwert $\bar{x}$ und Standardabweichung s aus, um die gesamte Verteilung eines Maßes innerhalb der Population beschreiben und berechnen zu können. Abbildung 4.18 zeigt eine graphische Darstellung des 5. und 95. Perzentils.

Eine einfache Zuordnung zwischen Körpermaß und zugeordnetem Perzentil erfolgt über die z-Transformation, welche die Verteilung in eine Standardnormalverteilung überführt (Gl. 4.1).

$$x_{perz} = \bar{x} + z_{perz} \cdot s \text{ (z-Transformation)} \quad (4.1)$$

mit:
$z_{95\,\%} = 1{,}645$ und $z_{5\,\%} = -1{,}645$ bzw.
$z_{97{,}5\,\%} = 1{,}9600$ und $z_{2{,}5\,\%} = -1{,}9600$.

Schließlich werden in der Auswertung jedes Körpermaßes typischerweise das 5., 50. und 95. Perzentil nach Geschlecht und Altersgruppen differenziert in Tabellenform abgelegt (siehe DIN 33402 Teil 2). Besondere Aufmerksamkeit muss der Tatsache geschuldet werden, dass sämtliche Körpermaße einzeln perzentiliert werden und somit kein Zusammenhang mehr zu den Individuen der Maßerfassung besteht. Menschen bestehen in der Regel nicht aus Körpermaßen des exakt gleichen Perzentilmaßes. Dies wird durch häufig wahrnehmbare Proportionsunterschiede von Körperstamm (Kopfspitze bis Gesäßauflagefläche im Sitzen) zu Beinen deutlich. Somit ist es nicht zielführend, einzelne Maße des gleichen Perzentils zu einem synthetischen Menschen eines bestimmten Gesamtperzentils zu addieren.

Anwendung von Körpermaßen

Nach erfolgter statistischer Auswertung wird häufig der Fehler begangen, dass nur noch der Mittelwert zur Beschreibung des Datensets verwendet wird. Eine reine Verwendung des 50. Perzentils führt jedoch zu deutlichen Problemen, wie das folgende Beispiel aus der Bautechnik zeigt. Würde für die Auslegung eines Türrahmens der Mittelwert der Körperhöhe verwendet werden, könnte als Konsequenz die Hälfte des Zielkollektivs die Türe nicht

mehr aufrechten Ganges passieren. Folglich ist es entscheidend, den Mittelwert nur in Zusammenhang mit einem Dispersionsmaß zu nennen, um die Form der Verteilung zu berücksichtigen. In der Ergonomie werden hierzu häufig das 5. Perzentil Frau und das 95. Perzentil Mann als Grenzperzentile verwendet. Eine weitere Ausdehnung würde zu unvertretbar hohen ökonomischen Mehraufwänden führen. Die restlichen 5 % der Bevölkerung werden auf Sonderlösungen verwiesen. Lediglich für sicherheitsrelevante Auslegungen werden das 1 % und 99 % Perzentil bzw. die üblichen Perzentile mit Sicherheitszuschlägen verwendet (u. a. auch bei dem obigen Beispiel des Türrahmens).

Neben der zumeist fehlerhaften Auslegung nach Mittelwerten tritt häufig ein anderes Problem in der Produktauslegung auf. Der Konstrukteur bzw. Designer passt das Produkt durch Ausprobieren an seine eigene Anthropometrie an, macht sich somit zum Zentrum der Auslegung und vernachlässigt die Wirkung auf andere Körpermaßausprägungen.

Um diese Probleme zu umgehen, wurde in der Anthropometrie die designbedingte Klassifizierung in sogenannte innere und äußere Maße vorgenommen. Inneres Maß bedeutet hierbei, dass der Mensch mit seinen Abmaßen Platz innerhalb der Produktes finden muss. Dies können die Unterschenkellänge unter einem Tisch sowie die Stammlänge unterhalb des Daches im Fahrzeug sein. Hiervon differenzieren sich äußere Maße, welche üblicherweise Erreichbarkeitsmaße darstellen, wie beispielsweise die maximale Höhe eines Bücherregals oder maximale Entfernung eines Bedienelements. Um die anthropometrische Produktanpassung an alle zu berücksichtigenden Perzentile zu gewährleisten, orientieren sich innere Maße an der größten Person (z. B. 95. Perzentil Mann) und äußere Maße an der kleinsten Person (z. B. 5. Perzentil Frau).

Die Anwendung von Tabellenmaßen stellt die einfachste Form für eine Produktauslegung dar. Diese kann jedoch nur für eindimensionale Fragestellungen verwendet werden, z. B. Türhöhe, Türbreite, Stuhlhöhe. Im Falle einer komplexeren Auslegung wie eines Fahrzeuginterieurs können Tabellen nur eingeschränkt verwendet werden. Für die Auslegung der Lenkradposition reicht es somit nicht aus, in einer Tabelle die kürzeste Armlänge nachzuschlagen. Hierfür müsste man wissen, wo sich die Schulter befindet und somit der Arm beginnt. Die Schulterposition hängt jedoch bei festem Torsowinkel vom H-Punkt ab, welcher sich wiederum durch Beinlänge, Kniewinkel und Pedallage ergibt (siehe hierzu ▶ Abschn. 7.2.2). Somit werden schließlich nicht nur Armlänge, sondern auch Schulterhöhe im Sitzen, Oberschenkellänge usw. benötigt. Wie oben erwähnt, ist es jedoch nicht erlaubt, einzelne Körpermaßperzentile aufzuaddieren. Dieser Bedarf nach einer sinnvollen, realistischen Aggregation von Körpermaßen hat zur Entwicklung von menschlichen Schablonen geführt, welche leicht anzuwenden und günstig in der Herstellung waren (siehe ▶ Abschn. 5.2.1). Diverse Nachteile sowie der verbreitete Einsatz von Computern hat schließlich zum Einsatz von digitalen Menschmodellen geführt, welche den Stand der Technik bei der Produktauslegung darstellen.

4.2.1.3 Differenzierungen

Die Anschauung legt nahe, dass sich Menschen in den Absolutmaßen sowie in den Proportionen ihrer Körpermaße zum Teil stark unterscheiden. Viele dieser Unterschiede liegen in Faktoren wie Geschlecht, Lebensalter und Region begründet. Die Kenntnis über die wichtigsten Differenzierungsmerkmale erlaubt eine Abgrenzung von Nutzergruppen, um marktspezifische Testkollektive festzulegen.

Körperbautypen

In der Konstitutionsbiologie als einem weiteren Zweig der Anthropologie (Grimm 1966) wird klassisch nach *somatischen Konstitutionstypen* unterschieden. Sheldon (1954) hat drei Kategorien der Somatotypen erstellt, die rein nach der äußerlichen Körperform unterschieden werden. Beim *Pyknischen Typ* ist der Körperbau eher klein mit kurzen Armen und Beinen, rundlichem Gesicht und weicher Muskulatur. Diese auch als *endomorph* bezeichneten Menschen stellen etwa 7 % der deutschen Bevölkerung dar. Der *Leptosome Typ* ist gekennzeichnet durch einen kurzen Oberkörper mit langen Beinen und Armen, schlanken Händen und Füßen. Diese *ektomorphen* Menschen sind meist hochwüchsig und stellen ca. 9 % der deutschen Bevölkerung. Der *Athletische Typ* mit seinem mächtigen Brustkorb, breiten Schultern und starker Muskulatur entsprechender Muskelkraft wird auch als *mesomorph* bezeichnet und repräsentiert

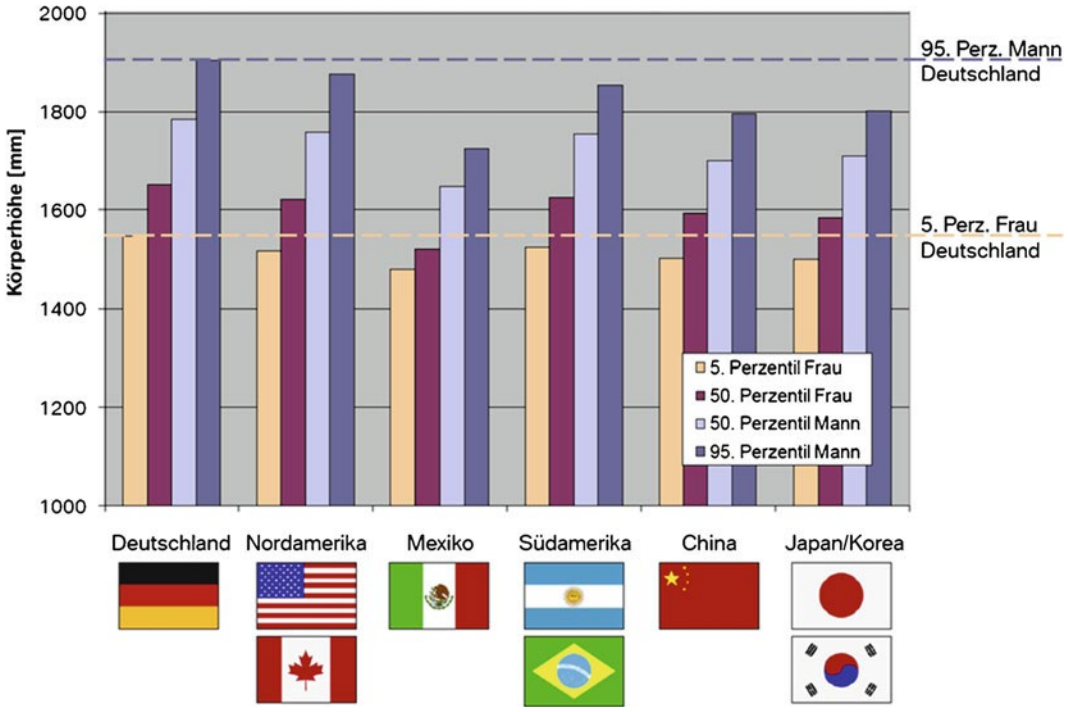


Abb. 4.19 Beispielhafte Gegenüberstellung diskreter Körperhöhenperzentile ausgewählter Nationen (Kaiser 2011)

12 % der Deutschen. Die verbleibenden ca. 70 % sind Mischformen, die sich durch Kombinationen aus den Reinformen ergeben. Dabei wird vor allem nach Skelettbau, Muskelmasse und Fetteinlagerung im Gewebe unterschieden. Rückschlüsse auf Verhaltensweisen sind aufgrund des Somatotypus nicht möglich und eine Anwendung dieser Differenzierung in der Ergonomie unüblich. Auch die überholte Klassifizierung der Menschen in drei (oder vier) Hauptgruppen nach Boyd (1950) in Europiden, Negriden und Mongoliden (sowie Australiden), die lediglich auf Hautfarbe, Behaarung und Schädelform fußt, ist für die Ergonomie nicht tauglich. Eine Einteilung in ethnische Gruppen sollte zugunsten einer detaillierten Zielgruppendefinition und der markspezifischen Kundenanforderung ersetzt werden. So sind die einzelnen Regionen des automobilen Weltmarktes von einer ethnischen Durchmischung geprägt, die jedoch durch regionaltypische Verhaltensmuster und Gepflogenheiten stärker beeinflusst werden als von der ethnischen Herkunft. Gerade für die Gestaltung von Innen- und Außenmaßen von Automobilen hat sich die in dem Menschmodell RAMSIS realisierte Typologie nach Geuß (1994) als sehr praktikabel erwiesenen, die von den drei bestimmenden Größen Körperlänge, Proportion (Stammlänge zu Körperlänge) und Korpulenz ausgeht (siehe Abschnitt Proportionsunterschiede).

Regionale Unterschiede

Der Körperbau und damit auch dessen Abmaße variieren sehr stark in den einzelnen Regionen. Dies trifft bereits auf Regionen im gleichen Land (z. B. Nord- zu Süddeutschland, oder Tirol und Sizilien) zu. Im besonderen Maße zeigt sich ein signifikanter Unterschied in Absolutmaßen und Proportionen jedoch im globalen Vergleich. Abbildung 4.19 zeigt hierzu einen beispielhaften Vergleich des 5., 50. und 95. Perzentils Körperhöhe ausgewählter Nationen für beide Geschlechter. Allein die Unterschiede beim Durchschnittswert zwischen Deutschland und Mexiko liegen bei ca. 14 cm. Eine sehr kleine Frau in Deutschland ist mit ca. 1,55 m größer als die Hälfte aller mexikanischen Frauen. Abbildung 4.20 gibt die mittlere Körpergröße der Männer in verschie-

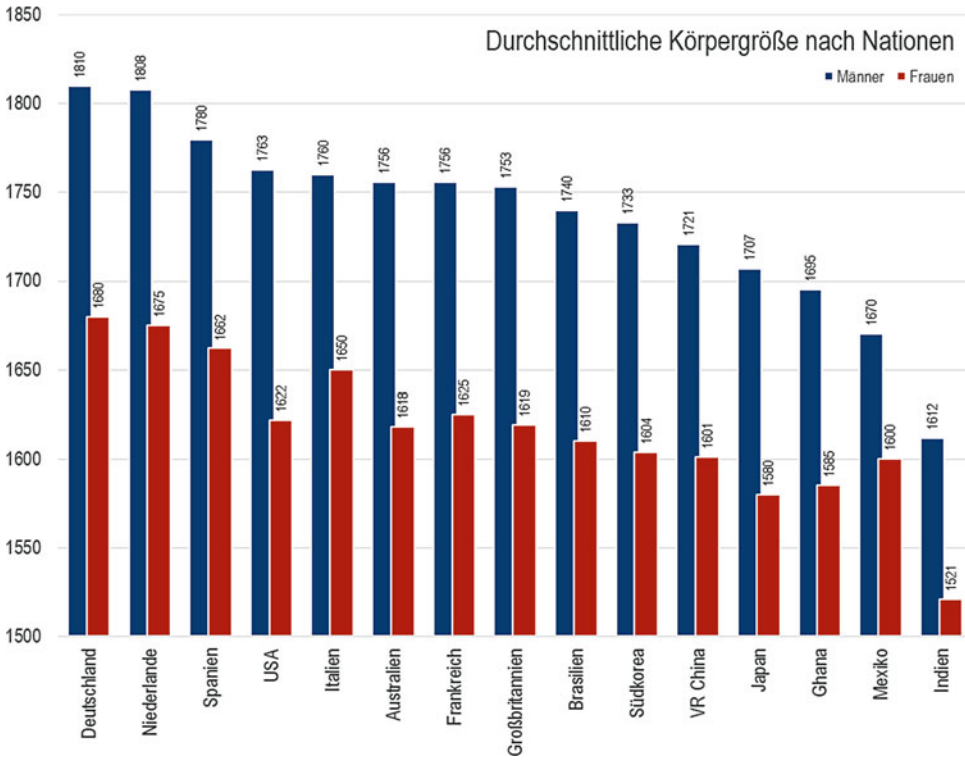


Abb. 4.20 Mittlere Körpergröße (50. Perzentil) von Männern und Frauen in verschiedenen Nationen

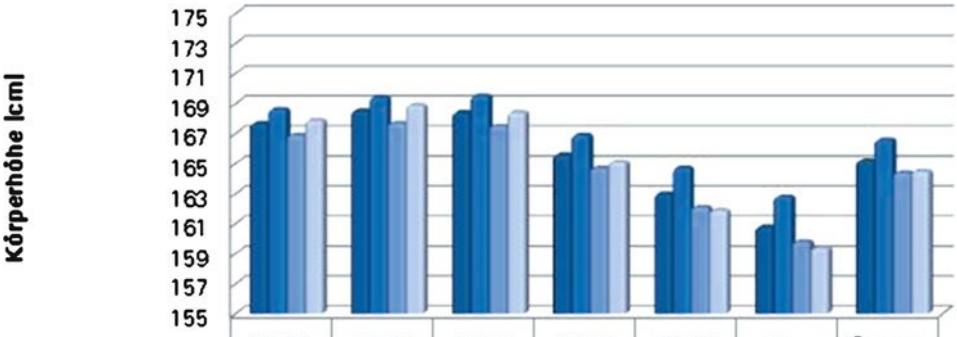
denen Nationen wieder. Auch innerhalb von Europa zeigt sich ein großer Unterschied der Körperhöhe zwischen den kleinen Südeuropäern und den großen Nordeuropäer (die größten Personen werden in Holland gefunden).

Die Hauptgründe für das Erreichen der vollen – genetisch möglichen – Körpergröße hängen in erster Linie von soziokulturellen Faktoren ab. So ist die Verfügbarkeit von energiereicher Nahrung (adäquate Kalorienaufnahme) und sauberem Wasser ebenso wichtig wie die medizinische Grundversorgung und eine vorpubertäre Wachstumsphase, die vor allem frei von schwerer körperlicher Belastung und Krankheiten ist. Aber selbst in einer Region mit relativ homogenen Lebensbedingungen zeigen sich regionale Unterschiede, wie die Messergebnisse aus SizeGERMANY (2009) ausweisen (Abb. 4.21 und 4.22).

Proportionsunterschiede

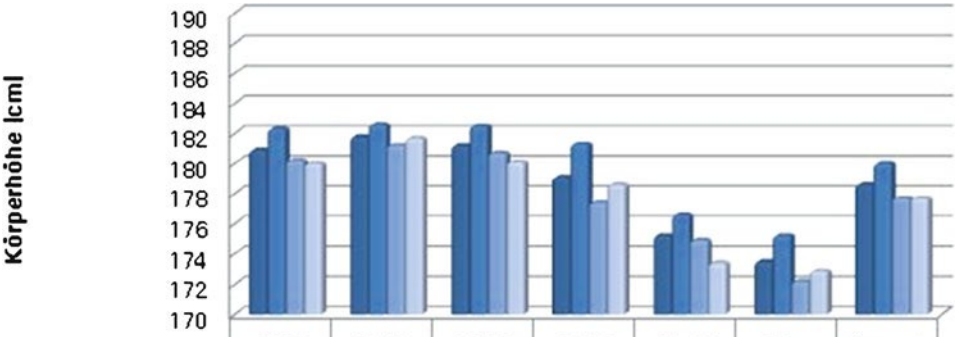
Im Alltag wird die Körperhöhe häufig als primäres anthropometrisches Unterscheidungsmerkmal zwischen Menschen angesehen. Greil (1972) hat Korrelationsanalysen zu diversen Längen- und Umfangsmaßen durchgeführt. Es zeigt sich, dass vor allem Höhen- und Längenmaße einen großen Zusammenhang aufweisen. Augenfällig ist jedoch, wie stark die Zusammensetzung einer bestimmten Körperhöhe aus Stammlänge und Beinlänge variieren kann (siehe auch die Untersuchungen von Jürgens et al. 1971). Dieses Phänomen ist allgemein unter den Bezeichnungen *Sitzriese* (langer Stamm, kurze Beine) und *Sitzzwerg* (kurzer Stamm, lange Beine) bekannt (Abb. 4.23). „Unter praktischen Gesichtspunkten ist somit die Körperhöhe als Indikatormerkmal geeignet, wenn es um die Festlegungen geht, die den Beinbereich oder […] den Armbereich betreffen. Dagegen ist es zweckmäßig für die Bestimmung von Maßen für den sitzenden Menschen, von der Stammlänge als Indikatormaß auszugehen“ (Bullinger et al. 2013).

Bemerkenswert sind diese Proportionsunterschiede bereits innerhalb einer weitgehend homogenen Population, aber besonders im globalen



	18-25	26-35	36-45	46-55	56-65	66...	Gesamt
Deutschland	167,7	168,5	168,4	165,6	163	160,8	165,2
Nord	168,6	169,4	169,5	166,9	164,7	162,8	166,6
Süd	166,9	167,7	167,5	164,7	162,1	159,8	164,4
Neue Bundesländer	167,9	168,9	168,4	165,1	161,9	159,4	164,5

Abb. 4.21 Mittelwert der Körperhöhe aller weiblichen Probanden nach Altersgruppen in Deutschland und Regionen (aus SizeGERMANY 2009)



	18-25	26-35	36-45	46-55	56-65	66...	Gesamt
Deutschland	180,9	181,8	181,2	179,1	175,2	173,5	178,6
Nord	182,3	182,6	182,5	181,3	178,6	175,2	180
Süd	180,2	181,2	180,7	177,4	174,9	172,2	177,7
Neue Bundesländer	180	181,7	180,1	178,6	173,4	172,9	177,7

Abb. 4.22 Mittelwert der Körperhöhe aller männlichen Probanden nach Altersgruppen in Deutschland und Regionen (aus SizeGERMANY 2009)

Vergleich. Ein beispielhafter Maßvergleich von durchschnittlichen deutschen und chinesischen Männern zeigt eindrucksvoll den enormen Proportionsunterschied. Ein deutscher Mann des 50. Perzentils ist 1,78 m groß und hat im 50. Perzentil eine Stammlänge von etwa 92 cm. Damit beträgt der Anteil des Oberkörpers an der Gesamtgröße weniger als 52 %. Der durchschnittliche chinesische Mann ist zwar absolut gesehen kleiner, nämlich 1,68 m, seine Stammlänge im gleichen Perzentil beträgt jedoch 91 cm (GB10.000–88). Damit ist er im Stehen 10 cm, jedoch im Sitzen nur noch einen Zentimeter kleiner. Sein Oberkörper macht über 54 % seiner Gesamtkörperhöhe aus. Diese prinzipiellen Proportionen sind typisch für abgegrenzte Regionen und in populationsreichen Gebieten wie Indien, China und Russland auch gebietsabhängig. Übersteigt bei der Betrachtung von Stammlänge und Körpergröße

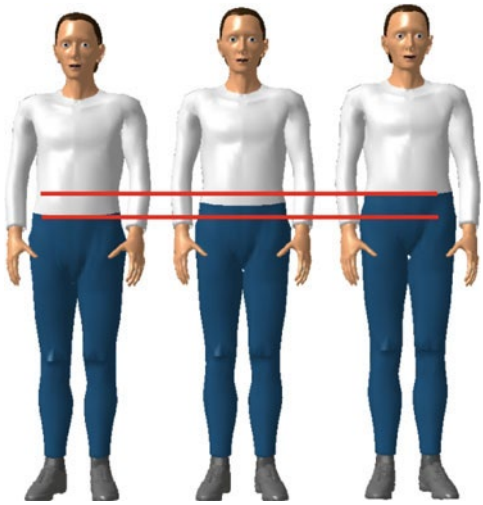


Abb. 4.23 Darstellung der Variation der Beinlänge bzw. der Stammlänge bei gleicher Körperhöhe für Sitzriese (*links*), normal proportionierte Person und Sitzzwerg (*rechts*)

die Proportion eines Individuums um mehr als 1 % den Durchschnittswert, so spricht man von einem tendenziellen Sitzriesen, unterschreitet das Maß um 1 % den Mittelwert, bezeichnet man die Person als tendenziellen Sitzzwerg (s. o.). Für deutsche Frauen liegt der normalperzentilierte Bereich zwischen 52 und 54 %, während er für Männer zwischen 51 und 53 % liegt. Damit wird deutlich, dass selbst bei gleich großen Männern und Frauen die Männer kürzere Oberkörper und infolgedessen längere Beine haben. Begründet ist dieser Unterschied zum Teil mit den starken Unterschieden zwischen dem männlichen und weiblichen Becken und der unterschiedlichen Stellung des Hüftgelenkes (CCD-Winkel[7]), der bei Frauen kleiner ist als bei Männern. Gegenüber Europäern erscheinen Asiaten aufgrund der zu längeren Oberkörpern verschobenen Proportionen ebenfalls als Sitzriesen. So beträgt der normalproportionierte Bereich bei chinesischen Männern 53–55 % und bei chinesischen Frauen 53,5–55,5 %. Dies hat zur Folge, dass aufgrund der zwangsläufig kürzeren unteren Extremitäten ein Sitzposition nahe am Lenkrad gewählt werden muss, um die Pedale erreichen zu können, während der lange Oberkörper hoch im eingeschränkten Kopfraumes des Dachrahmens aufragt. Eine auf den Zielmarkt ausgerichtete Gestaltung des Innenraumes berücksichtigt hier die anthropologischen Bedürfnisse der Kunden.

Geschlecht

Neben den beschriebenen Proportionsunterschieden zwischen Männern und Frauen bezüglich der Statur sind generell weitere Attribute zwischen den Geschlechtern zu unterscheiden. In der Regel beträgt der Größenunterschied von Männern zu Frauen absolut ca. 10 cm im gleichen Perzentil, was vor allem dem unterschiedlichen Wachstumsverlauf während der Pubertät geschuldet ist (siehe auch Abb. 4.22). Während bei Mädchen das Längenwachstum mit Einsetzen der Menstruation im Alter von 12 bis 14 Jahren annähernd zum Stillstand[8] kommt, wachsen junge Männer noch bis zu einem Alter von über 20 Jahren. Der Körperbau unterscheidet sich in vielfältiger Weise. So ist die geschlechtstypische Ausformung des Beckens neben der unterschiedlichen Proportion vor allem für gravierend abweichende Sitzhaltungen und anders wahrgenommene Unterstützungsbedürfnisse verantwortlich. Während bei Männern die Lordosenunterstützung der Sitzlehne teilweise als unangenehm hart und störend wahrgenommen wird, kann für Frauen eine noch darüber hinausreichende Unterstützung wünschenswert sein. Die Stellung des Beckens in der Sitzhaltung und die erforderliche Unterstützung der Lendenwirbelsäule bis zu einer spürbaren Entlastung des Rückens umspannen einen großen Bereich[9], der technisch zu realisieren ist. Da das breitere Becken der Frau mit der Hüftbreite im Sitzen zusammenhängt, ist die Ausformung der Sitzschale, des –kissens und der -lehne entscheidend für die Akzeptanz und die Komforteinschätzung des gesamten Fahrzeugs.

7 Centrum-Collum-Diaphysen-Winkel ist der projizierte Winkel zwischen Hals und Schaft des Oberschenkelknochens. Er beträgt beim Mann ca. 130–140° und bei Frauen etwa 120–130°. Mit zunehmendem Alter wird der CCD-Winkel aufgrund der nachlassenden Knochenfestigkeit (Osteoporose) immer spitzer (bis zu 115°).

8 Die Wachstumsphase nach der Pubertät kann als abgeschlossen angesehen werden, wenn das jährliche Wachstum weniger als 1 cm beträgt. Das ist bei Mädchen in Deutschland mit 14 bis 17 Jahren der Fall und bei Jungen mit 16 bis 20 Jahren.

9 Der Verstellbereich der Lordosenstütze kann je nach Fahrzeugtyp und Sitz bis zu 80 mm betragen.

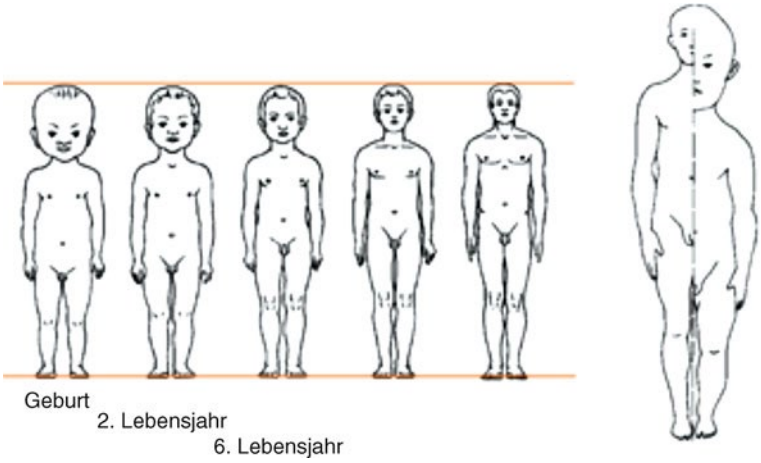


Abb. 4.24 Vergleich der Körperproportionen bei Neugeborenen, Heranwachsenden und Erwachsenen (aus Schmidtke 1993 und Vorlesungsmanuskript Rühmann, Produktionsergonomie)

Während ein enger[10] Sitz von Männern als sportlich anliegend und angenehm bewertet werden kann, können schon durchschnittlich perzentilierte Frauen den gleichen Sitz als inakzeptabel eng ablehnen, da sich die Proportionen von Männern und Frauen im Oberschenkelbereich teils drastisch unterscheiden. Die Kontur des Sitzes ist nicht alleine im Hüftbereich entscheidend, sondern bis in den Oberschenkelbereich hinein zu betrachten. Der Grund hierzu liegt vor allem in der andersartigen Verteilung der Korpulenz. Während bei korpulenten Männern vor allem lokal der Bauch zunimmt, lagert der weibliche Körper Fett bevorzugt an Gesäß, Hüften und Oberschenkel ein. Weiterhin weisen Frauen in der Regel schmalere Schultern und kürzere Extremitäten (Arme, Beine und Finger) auf. Auf die daraus resultierende Notwendigkeit der weitgehend individuellen Anpassbarkeit eines Sitzes wird speziell in ▶ Abschn. 7.2.2.1 eingegangen. Mit dem kleineren Körperbau der Frau geht auch eine reduzierte Muskelmasse einher, die zu einem reduzierten Kraftvermögen von ca. 40 % führt (siehe ▶ Abschn. 4.2.3).

Altersveränderungen

Während der Wachstumsphase, die bei Männern im Wesentlichen nach dem 20. und bei Frauen nach dem 17. Lebensjahr endet, erfolgen deutliche Veränderungen der Körperproportionen (Bullinger et al. 2013). ◘ Abbildung 4.24 zeigt die Veränderung der Körperproportionen vom Embryo/Säugling bis zum Erwachsenen. Es ist deutlich ersichtlich, wie der Anteil des Kopfes abnimmt und der Anteil der Beine zunimmt. So gilt es zu beachten, dass Körperproportionen von Kindern und Jugendlichen nicht basierend auf Daten von Erwachsenen über einfache Skalierung zurückgerechnet werden können (Bullinger et al. 2013).

Aus dem Alltag bekannt ist die Abnahme der Körperhöhe mit zunehmendem Alter. Dies ist hauptsächlich auf einen flacheren Centrum-Collum-Diaphysen-Winkel (CCD-Winkel zwischen Oberschenkelknochen und Oberschenkelhals), eine Absenkung des Fußgewölbes und eine Dickenabnahme von Knorpeln inklusive der Zwischenwirbelscheiben zurückzuführen (Faller 1999). Im Gegensatz hierzu steht eine häufig deutliche Zunahme von Körpergewicht und Umfangsmaßen (z. B. Brustumfang, Taillenumfang). Vor allem in Bezug auf innere Maße (siehe ▶ Abschn. 7.8.1) bzgl. des Raumbedarfs von Personen spielt demnach das Alter eine entscheidende Rolle für eine korrekte anthropometrische Auslegung.

Säkulare Akzeleration

Neben der Betrachtung der individuellen Entwicklung während der pubertären Wachstumsphase ist eine gesellschaftstypische Veränderung des Bevölkerungsdurchschnitts festzustellen. Die Weiterentwicklung des Längenwachstums ist vor allem in prosperierenden Entwicklungszonen feststellbar, wo

10 Ein Fahrzeugsitz wird als „eng" wahrgenommen, wenn die Oberschenkel seitlich von den Sitzwangen spürbar geführt werden.

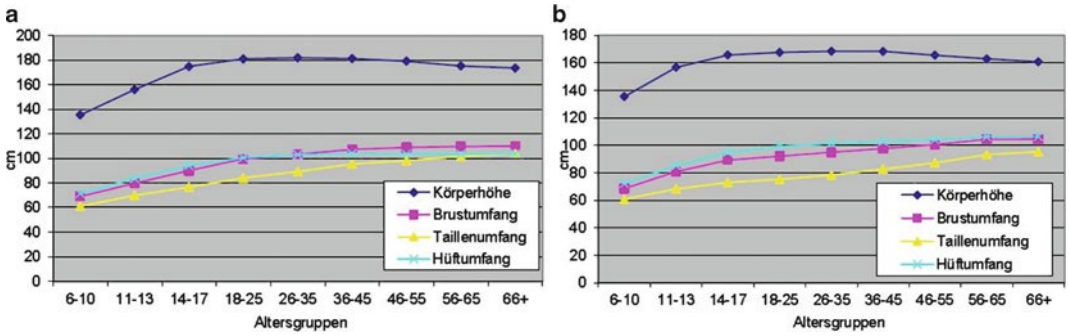


Abb. 4.25 Körperhöhe, Brust-, Taillen- und Hüftumfang vom Männern (**a**) und Frauen (**b**) nach den Erhebungen von SizeGERMANY (2009)

sich die Verbesserung der gesamtwirtschaftlichen Zustände auf die überwiegende Zahl der Bevölkerung auswirkt. Mit Säkularer Akzeleration wird die Zunahme der Körperlänge erwachsener Personen in Abhängigkeit vom Erhebungszeitpunkt bezeichnet. Neben der Verfügbarkeit von adäquater Nahrung und sauberem Wasser ist auch die medizinische Versorgung und eine belastungsfreie Wachstumsphase im Kindesalter ein Zeichen für die Verbesserung der allgemeinen Lebensumstände, die sich auf die anthropometrischen Kennzahlen einer Population auswirken. Üblicherweise wird eine Zunahme des Längenwachstums (Akzeleration) von 1 cm auf einen Zeitraum von 10 Jahren angenommen. Allerdings sind aufgrund des großen logistischen Aufwands einer nationalen Reihenvermessung oftmals nur lokale Stichprobenmessungen verfügbar, die nur eingeschränkt die Gegebenheiten in der Gesamtbevölkerung widerspiegeln (siehe auch Abb. 4.21 und Abb. 4.22). Viele nationale Erhebungen zur statischen Ermittlung der Körpermaße wurden in Abständen von 30 Jahren genommen, wodurch nur eine grobe Abschätzung der Akzeleration möglich ist. In Mitteleuropa ist eine Stagnation des Trends bei den Längenmaßen festzustellen, während die Umfangsmaße zum Teil erheblich zugenommen haben (Abb. 4.25). In sogenannten Schwellenländern wie Brasilien, gebietsweise auch in China und Indien, ist aufgrund des wirtschaftlichen Aufschwunges eine Akzeleration der Längenmaße wahrscheinlich. Während das Längenwachstum vom Knochenbau und damit von längerfristigen Faktoren abhängt und langsamer vonstattengeht, ist das Wachstum der Umfangsmaße vor allem vom Muskel- und Fettgewebe abhängig und kann individuell sowie soziokulturell rascher zunehmen.

Händigkeit

Ein Phänomen, das über die Menschen hinaus bei allen Primaten zu beobachten ist, ist das konsistent bevorzugte Einsetzen einer Körperseite für feinmotorische Tätigkeiten. Diese Dominanz wird *Händigkeit* genannt und bezieht sich auf die Unterscheidung von Rechts- zu Linkshändern. Erstaunlicherweise ist diese Dominanz nicht gleichverteilt, sondern der Großteil entfällt auf die Rechtshänder. So sind nur etwa 10–15 % der Menschen Linkshänder (nach den Erhebungen aus SizeGERMANY etwa 6,%)[11]. Diese Zahl ist kulturübergreifend und auch entwicklungshistorisch konstant. Diese Dominanz bezieht sich hauptsächlich auf die Geschicklichkeit, da mit der bevorzugten Hand die motorisch komplizierten und anspruchsvollen Aufgaben (z. B. das Schreiben oder das Nähen) ausgeführt werden. Bedingt durch das bevorzugte Einsetzen der dominanten Seite führt das auch zu einem leichten Kraftvorsprung, weshalb auch von der „starken Seite“ gesprochen wird. Die Asymmetrie des Kraftvermögens ist jedoch mit 5–10 % relativ gering und auch an der annähernd gleichverteilten Muskelmasse äußerlich ablesbar.

11 Ob jemand als Linkshänder bezeichnet wird, ist nicht ganz eindeutig. Es gibt verschiedene Test- bzw. Befragungsverfahren, durch die eine Einordnung ermöglicht werden soll. In gewisser Weise existiert ein kontinuierlicher Übergang zwischen Rechts- und Linkshändigkeit. Die erwähnten Angaben aus SizeGERMANY sind Selbstbeurteilungen der Probanden.

Die Verteilung der Bedieneinrichtungen im Automobil hat in bestimmten Konstellationen Vor- oder Nachteile, je nach dem mit welcher Händigkeit der Nutzer auf ein bestimmtes Fahrzeug trifft. So sind Rechtshänder in linksgelenkten Fahrzeugen bei der Bedienung der Schalter in der Mittelkonsole wie Radio- oder Klimabedienung im Vorteil, weil die Anordnung der feinmotorischen Geschicklichkeit hier besonders entgegenkommt. Eine Bedienung der elektrischen Fensterheberschalter oder des Hauptlichtschalters rechts vom Lenkrad fällt Rechtshändern in rechtsgelenkten Fahrzeugen leicht, weil auch hier die Anordnung der dominanten Hand entgegenkommt. Trifft ein Linkshänder auf die gleiche Situation, sind diese Aufgaben nur mit erhöhter Konzentrationsleistung zu erbringen und eher geeignet, von der Fahraufgabe abzulenken. Unter Umständen kann es zu überkreuzenden Bedienvorgängen kommen, bei der die feinmotorisch konditionierte Hand auf der gegenüberliegenden Körperseite zum Einsatz kommt. Das manuelle Einlegen von Gängen kommt in Linkslenkerfahrzeugen den Rechtshändern und umgekehrt in Rechtslenkerfahrzeugen den Linkshändern entgegen. Ein kritischer Sonderfall stellt stets die manuelle Feststellbremse dar. Besonders in Rechtslenkermärkten sehen sich viele kleine Frauen mit einer Fülle an Nachteilen konfrontiert. Durch ihre kleinere Statur sind sie genötigt, den Sitz sehr nah an das Lenkrad zu positionieren, um die Pedale bedienen zu können. Dadurch rückt der Handbremshebel relativ zur Sitzposition immer weiter nach hinten, was eine ungünstige Armstellung zur Bedienung des Hebels erzeugt. Oftmals ist noch die Rückenlehne mit den seitlichen Sitzwangen hinderlich im Wege oder die Armablage zwischen den Vordersitzen blockiert den freien Zugriff zum Hebel. Bedingt durch den relativen Kraftnachteil von Frauen gegenüber Männern von ca. 30–40 % ist das absolute Kraftvermögen bei kleinen Personen sehr begrenzt. Muss nun eine rechtshändige kleine Frau den Handbremshebel mit der ungeschickten, schwachen linken Hand bedienen, kann unter Extremsituationen (Abstellen des Fahrzeuges am Hang oder sogar mit Anhänger) die technische notwendige Kraft nicht aufgebracht werden und das Fahrzeug nicht ausreichend gesichert werden. Sollte dies in einer Notsituation gefordert sein, kann bei eintretender Panik unter Umständen eine kritische Lage entstehen, die ein Wegrollen des Fahrzeuges zur Folge hat. Oftmals kann nur durch Zuhilfenahme der zweiten Hand oder durch eine Verlagerung der Sitzposition zum Hebel der entscheidende Kraftaufwand hergestellt werden. Die immer öfter eingesetzte Verwendung von elektrischen Feststellbremsen hat hier den großen Vorteil, als selbstverstärkendes System Nachteile bei kleinen, älteren oder schwachen Personen auszugleichen und kann unter diesem Aspekt zu den Assistenzsystemen gerechnet werden (Definition von Assistenz siehe ▶ Kap. 9).

Die Händigkeit bezieht sich strenggenommen nicht nur auf die Hände, sondern im weiteren Sinne auch auf die Füße. Allerdings kommt hier der geübten Geschicklichkeit eine wesentlich größere Bedeutung zu. Während der eine Fuß gelernt hat, feinfühlig „Gas“ zu geben und zu bremsen, wird von dem anderen immer nur eine möglichst zügige und kräftige Betätigung des Kupplungspedals erwartet. Gelegentlich lässt sich beobachten, dass sich ein Fahrer in einem Kupplungsfahrzeug wähnt, jedoch in einem Automatikfahrzeug sitzt, das nicht vorhandene Kupplungspedal verfehlt und in gewohnter Manier das Bremspedal trifft. Die äußerst heftige Fahrzeugreaktion zeigt, wie unterschiedlich rechter und linker Fuß konditioniert werden können.

Es sei hier erwähnt, dass es auch eine „Händigkeit“ für die Dominanz der Augen gibt. Remlinger (2013) zeigt, wie diese Bevorzugung leicht entdeckt werden kann: Man fixiert mit beiden Augen ein weiter entferntes Objekt durch ein nahe gelegenes „Schlüsselloch“ (dieses kann beispielsweise durch die beiden sich überkreuzenden Hände gebildet werden; ◘ Abb. 4.26). Durch abwechselndes Schließen der beiden Augen überprüft man nun, mit welchem Auge man das Objekt tatsächlich erkennt.

◘ Abbildung 4.27 zeigt die Verteilung von Händigkeit und Äugigkeit nach einer nicht repräsentativen Vorstudie von Remlinger (2013) mit 91 Personen. Konkrete Auswirkungen auf das Fahren von Fahrzeugen insbesondere im Hinblick auf die asymmetrische Gestaltung des Fahrerplatzes und der Verkehrsabläufe sind in der Literatur nicht bekannt. Speziell beim Ablauf seitlich gerichteter Bewegungsabläufe wie dem Ein- und Aussteigen, der Wahrnehmung von Kreuzungsverkehr oder der Bearbeitung von Nebenaufgaben in der Mittelkonsole

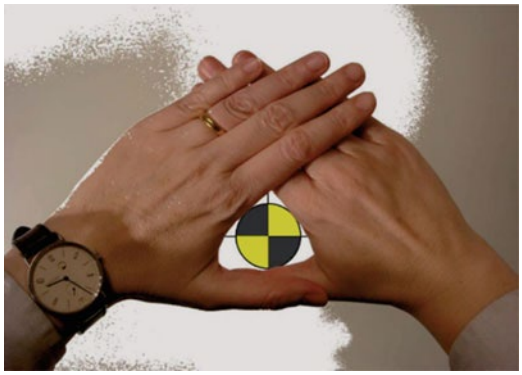


Abb. 4.26 Testverfahren zur Augendominanz (nach Remlinger 2013)

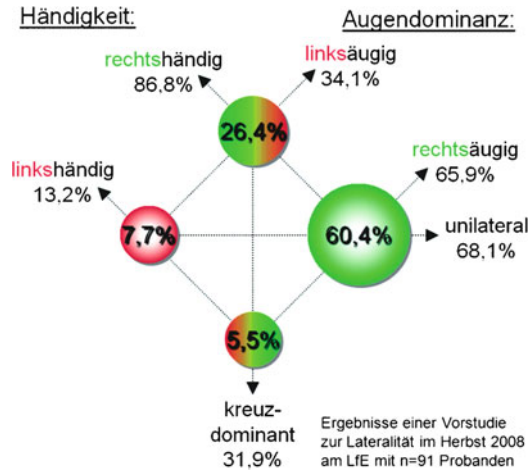


Abb. 4.27 Verteilung der Lateralität von Auge und Hand (nach Remlinger 2013)

des Fahrzeugs ist jedoch ein Einfluss der Augendominanz zu vermuten (Remlinger 2013).

4.2.1.4 Wichtige Körperdistanzmaße

Die Vermessung von menschlichen Körpern legt aus Gründen der Vergleichbarkeit und der Nachvollziehbarkeit die Verwendung gleicher Messverfahren nahe. Unabhängig von der verwendeten Technologie mit manuellen Tastzirkeln oder elektronischen Bodyscannern müssen die Haltungen und die Ebenen definiert sein, in der das betreffende Maß abzunehmen ist. In der Regel werden die Maße am unbekleideten bzw. leicht[12] bekleideten Körper genommen. Für die Ermittlung besonderer Situationen kann auch eine Bekleidung mit normaler[13] oder schwerer[14] Kleidung notwendig sein. In den folgenden Abschnitten werden einzelne Maße vorgestellt, welche Bedeutung für die Entwicklung von Kraftfahrzeugen haben. Nicht nur die Abmaße des Fahrzeugsitzes in Länge und Breite des Sitzkissens, sondern die gesamte Innenraumgestaltung mit Platzangebot, Ein- und Ausstiegsöffnungen, Reichweiten und Sichtzonen muss an Hand der aktuellen Körpermaßdaten der Zielmärkte bestimmt werden.

12 Unter leicht bekleidet versteht man in erster Linie einen nur mit Unterwäsche bekleideten Menschen, der jedoch an den meisten Körperstellen, vor allem aber an den Hauptgelenkpunkten unbekleidet ist.

13 Als normale Bekleidung ist eine alle Körperteile bedeckende Straßenkleidung zu verstehen.

14 Mit schwerer Bekleidung ist in der Regel eine militärische Kampfausrüstung oder schwere Schutzbekleidung von Feuerwehr oder anderen Einsatzkräften gemeint.

Körperhöhe (Statur)

Die zu vermessende Person steht mit geschlossenen Beinen gestreckt aufrecht (Abb. 4.28 links). Der Kopf wird so gehalten, dass die Oberkante der Ohren mit den Augen eine horizontale Linie (sog. Frankfurter Horizontale) bildet. Gemessen wird die vertikale Distanz von der Standebene zur Kopfspitze. Dieses Maß ist eine leicht abzufragende Kenngröße, die die meisten Personen von sich recht zutreffend kennen, wenn auch oftmals die Befragten dazu neigen, die Körpergröße einschließlich der Schuhe oder zu große Wert anzugeben. Dieses Kennmaß sollte also vorrangig ermittelt und weniger erfragt werden. Als Maß findet die Körperhöhe nur als Referenz Verwendung oder für spezielle Situationen, wie z. B. das aufrechte Stehen unter der geöffneten Heckklappe beim Beladen des Kofferraums.

Stammlänge (Sitzhöhe)

Die zu vermessende Person sitzt mit vollständig unterstützten Oberschenkeln auf einer ebenen unverformbaren Fläche, während die Unterschenkel frei herabhängen und auch die Füße nicht unterstützt sind (Abb. 4.28, Mitte). Der Oberkörper wird ähnlich der Stehhaltung aufrecht gerade gestreckt. Auch hier ist der Kopf im Sinne der Frankfurter Horizontalen zu halten. Gemessen wird die vertikale Distanz von der Sitzebene zur Kopfspitze. Die Stammlänge ist für die Auslegung des Fahrerplatzes von ausschlaggebender Bedeutung. Allerdings

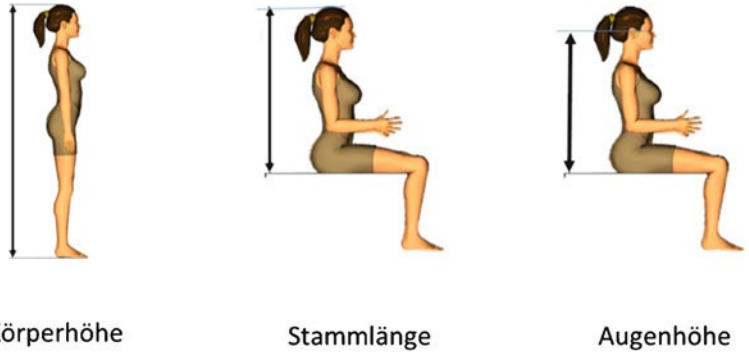


Abb. 4.28 Definition der Messgrößen Körperhöhe, Stammlänge und Augenhöhe

dient die Stammlänge als anthropometrisches Ausgangsmaß lediglich der Referenzierung und der Perzentilierung, da eine vollkommen aufrechte und gestreckte Haltung des Oberkörpers in der Praxis kaum vorkommt. Die Fahrhaltung in Lastkraftwagen und Omnibussen kommt dieser Grundhaltung relativ nahe, wenn auch hier der Oberkörper bewegungs- und schwingungsbedingt etwas in sich zusammensinkt. In Personenkraftwagen ist eine leicht zurückgelehnte Haltung des Oberkörpers[15] zu beobachten. Einhergehend mit dem Einsinkverhalten des Oberkörpers gehen durch die Wirbelsäulenneigung und -krümmung von der gestreckten Haltung ca. 40 mm verloren. Ein Oberkörper der eine anthropometrische Stammlänge von 900 mm aufweist, ist somit im zusammengesunkenen Zustand unter einer gewissen Sitzlehnenneigung nur noch 860 mm hoch. Bietet der Innenraum nun ebenfalls eine Referenzhöhe von 900 mm, verbleiben dem Fahrer 40 mm Kopffreiraum, die es ihm erlauben, sich im Sitz aufrecht sitzend zu strecken. Bei der Festlegung der Kopffreiheit ist neben diesem Effekt auch die Tatsache zu berücksichtigen, dass die Stammlänge zur Schädelkontur gemessen wird und damit Haare und Frisur, die sich im Normalfall mindestens 30 mm über der Kopfspitze erheben, sowie eventuell vorhandene Kopfbedeckungen (siehe ▶ Abschn. 4.2.1.6) ebenfalls zu berücksichtigen sind.

15 Die meisten Fahrzeuge werden auf einen Torsowinkel von 22°–25° ausgelegt. In der Praxis sind jedoch wesentlich flachere sowie steilere Haltungen des Oberkörpers zu beobachten, die im Bereich von 5° bis 35° liegen. Der Mittelwert im Personenkraftwagen liegt bei ca. 20° und ist stark von der Höhe des Sitzes über der Fersenhöhe (Maß H30) abhängig (siehe Abschn. 7.2.2.1 und Abb. 7.28).

Augenhöhe im Sitzen

Die Messhaltung ist ähnlich wie bei der Ermittlung der Stammlänge. Es wird der Abstand zwischen der Sitzfläche und der Pupille des rechten Auges gemessen (◘ Abb. 4.28 rechts). Die Augenhöhe ist eigentlich von essenzieller Bedeutung für die Konzeption der Sichtverhältnisse aus der Fahrzeugkabine und auf die Instrumente. Allerdings ist dabei die durch die normale Sitzhaltung bedingte niedrigere Augenhöhe durch einen Abschlag zwischen 5 und 10 % zu berücksichtigen (siehe auch die Bemerkungen zur Stammlänge).

Gesäß-Knietiefe

Die Messhaltung ist ähnlich wie bei der Ermittlung der Stammlänge. Es wird allerdings der projizierte horizontale Abstand zwischen dem vordersten Punkt der Kniescheibe und dem hintersten Kontaktpunkt des Gesäßes mit einem Messblock ermittelt (◘ Abb. 4.29, links). Dieses Maß beschreibt als Kombination aus Oberschenkellänge und eingesessener Gesäßkontur den Platzbedarf zwischen Fahrzeugsitz und Instrumententafel. Aufgrund der notwendigen Bewegungsfreiheit zur Bedienung der Pedalerie ist ein Zuschlag zu berücksichtigen. Ebenso muss in Betracht gezogen werden, dass bedingt durch die Haltung des Unterschenkels auch lokale Punkte des Schienbeins die vordere Begrenzung bestimmen können.

Sitztiefe

Die Sitztiefe wird in der gleichen unterstützten und gestreckten Sitzhaltung ermittelt. Allerdings wird hier die projizierte Entfernung zwischen der Kniekehle und dem hintersten Kontaktpunkt des Gesäßes mit einem Messblock gemessen (◘ Abb. 4.29,

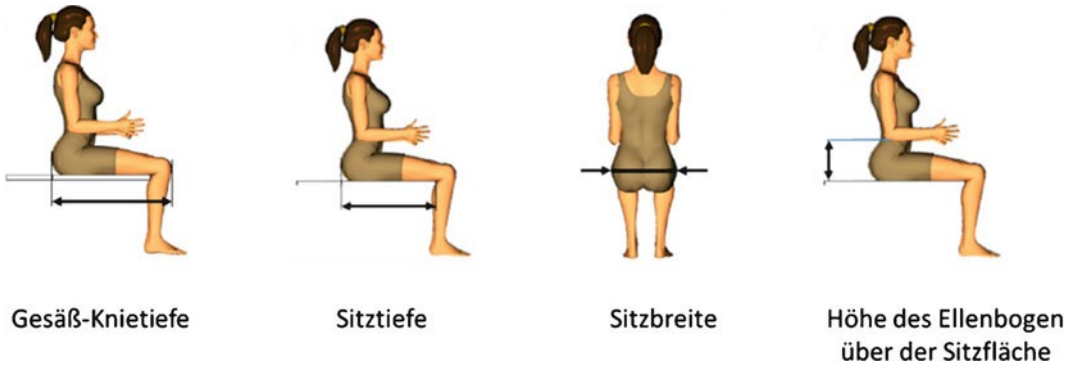


Abb. 4.29 Definition der Messgrößen Gesäß-Knietiefe, Sitztiefe, Sitzbreite und Höhe des Ellenbogens über der Sitzfläche

Mitte links). Wie die Bezeichnung bereits hinweist, ist das Maß eine Orientierung für die notwendige Sitzauflagenlänge. Überschreitet die Sitzkissenlänge das Maß der individuellen Sitztiefe, drängt die Vorderkante der Sitzfläche die Kniekehle nach vorne, wodurch der untere Rücken und vor allem der Lendenwirbelbereich den Kontakt zur Lehnenkontur verliert und wegen der fehlenden Stützwirkung Gefahr läuft, in eine kyphotische Haltung zu verfallen, was dem Komfort und letztendlich auch der Gesundheit abträglich ist. Andererseits ist für große Personen eine hinreichende Unterstützung des Oberschenkels notwendig. Die Variationsbreite der Sitztiefe (siehe Abb. 4.30) verlangt somit eine Verstellbarkeit der Sitzfläche.

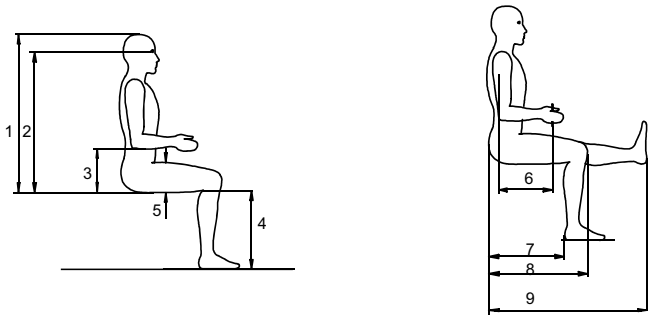
Sitzbreite (Eingesessene Gesäßbreite)

Auch hier sitzt die zu vermessende Person aufrecht mit vollständig unterstützten Oberschenkeln auf einer ebenen Unterlage. Die Knie der frei herabhängenden Unterschenkel berühren sich leicht. Gemessen wird die größte horizontale Entfernung des unverformten Hüftvolumens (Abb. 4.29, Mitte rechts). Wenn auch die Kontaktpunkte sich oftmals im Bereich des Beckens oder der Hüftgelenke befinden, gibt dieses Maß einen Anhaltspunkt auf die notwendige Sitzweite, also das Innenmaß des Sitzspiegels zwischen den seitlich begrenzenden Sitzwangen. Aufgrund der anatomischen Unterschiede zwischen Männern und Frauen im Beckenbereich ist diese Größe das herausragende Maß, bei dem die weiblichen Daten die männlichen bereits bei kleineren Körpergrößen übertreffen. Dieses Maß basiert zwar grundsätzlich auf der skelettbedingten Hüftknochenbreite, hängt jedoch zu einem erheblichen Anteil von der fettbedingten Weichteilmasse ab. Gerade in diesem Bereich ist speziell in Mitteleuropa und vor allem schon seit geraumer Zeit in Nordamerika eine erhebliche Zunahme zu verzeichnen. Lag noch im Jahre 1999 der Mittelwert der gemischten Population[16] bei 380 mm, hat dieser Wert in zehn Jahren um 30 mm zu genommen. Im gleichen Zeitraum schmolz der Vorsprung der Frauen gegenüber Männern von 30 auf 10 mm. Männer wie Frauen haben trotz Stagnation des Längenwachstums erheblich an Umfang zugenommen (siehe auch Abb. 4.25), damit kommen immer weniger Personen in den Genuss einer sportlich ausgelegten Anmutung des Fahrzeugsitzes, sondern nehmen die Enge eher als unbequem und unangenehm wahr. Das nötigt, falls man auf eine individuelle Anpassbarkeit verzichten will, zu einer flacheren Auslegung der Sitzkissenkontur oder zu breiteren oder weicheren Polster versehenen Sitzen.

Höhe des Ellenbogens über der Sitzfläche

Dieses Maß wird ebenfalls in der gestreckten Sitzhaltung aufgenommen. Die Oberarme hängen möglichst frei nach unten, die Unterarme sind rechtwinklig nach vorne gebeugt. Gemessen wird die vertikale Entfernung von der Sitzebene zum untersten Punkt des Ellenbogens (Abb. 4.29, rechts). Dieses Maß gibt Hinweise auf die Anordnung möglicher Unterstützungsgeometrien für die Arme, wie die Armauflage in der Türverkleidung und Tunnelkonsole. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass diese Höhe des Ellenbogens mit zunehmendem Abspreizungswinkel

16 Gemischte Population aus 50 % Männern und 50 % Frauen, jeweils das 50. Perzentil.



Abmessungen in cm	männlich Perzentil			weiblich		
	5%	50%	95%	5%	50%	95%
1 Körpersitzhöhe (Sitzhöhe)	84,9	90,7	96,2	80,5	85,7	91,4
2 Augenhöhe im Sitzen	73,9	79,0	84,8	68,0	73,5	78,5
3 Ellenbogenhöhe über d. Sitzfläche	19,3	23,0	28,0	19,1	23,3	27,8
4 Länge des Unterschenkels m. Fuß (Sitzflächenhöhe)	39,9	44,2	48,0	35,1	39,5	43,4
5 Oberschenkelhöhe	11,7	13,6	15,7	11,8	14,4	17,3
6 Ellenbogen-Griffachsen-Abstand	32,7	36,2	38,9	29,2	32,2	36,4
7 Sitztiefe	45,2	50,0	55,2	42,6	48,4	53,2
8 Gesäß-Knie-Länge	55,4	59,9	64,5	53.0	58,7	63,1
9 Gesäß-Bein-Länge	96,4	103,5	112,5	95,5	104,4	112,6

Abb. 4.30 Körpermaße des Menschen nach DIN 33 402

des Oberarmes ebenfalls zunimmt. Ebenfalls verändert sich dieses Maß mit der Neigung des Oberkörpers nach hinten sowie mit der Position der Hände. Ein Kompromiss zwischen den Bedürfnissen großer und kleiner Positionen sowie der unterschiedlichen Haltungen auf Fahrer- und Beifahrersitz ist schwierig und erfordert gezielt nutzerorientierte Lösungen (siehe hierzu auch ► Abschn. 7.2.2.5).

Länge der Extremitäten

Teilabschnitte des Körpers wie Ober- oder Unterarmlänge, Unterschenkellänge mit Fuß, ferner die Kopfmaße wie Kopfhöhe, -breite und -tiefe werden in Tabellenwerken der Anthropometrie häufig aufgeführt und sind in der Anwendung der Automobilergonomie als Referenzmaß für abgeleitete Maße wie Reichweite der Hand oder Betätigungsfeld der Füße von Interesse. Abbildung 4.30 gibt hierfür ein Beispiel aus dem DIN 33 402. Allerdings sind gerade zur Bestimmung der Erreichbarkeit basierend auf Körpergröße, Sitzhaltung und Umgebungsgeometrie spezifische Untersuchungen erforderlich, um eine abschließende Beurteilung des Komforts zu geben. Die Reichweite ist zudem von der Art der Greifaufgabe abhängig, z. B. ob ein Hebel mit vollständig umschließender Hand gegriffen werden soll oder ob ein Schalter mit ausgestrecktem Zeigefinger gedrückt werden kann.

Abmaße der Hand

Die Größe der Hände ist aufgrund der Röhrenknochen der Finger proportional abhängig von der Körpergröße des Menschen. Allerdings können Breite, Dicke und Form stark variieren. Eine Anwendung in der Ergonomie finden vor allem die Grenzperzentile[17], die bestimmen, welche Kundengruppen noch in der Lage sind, bestimmte Bedieneinrichtungen sicher zu betätigen. Den Abmaßen der Finger und der Hand kommt somit im Kontext

17 Standardmäßig wird das 5. weibliche und das 95. männliche Perzentil als Grenzperzentil betrachtet, gelegentlich wird auch vom 2,5 bis zum 97,5. Perzentil ausgelegt. Seltener findet man eine Auslegung vom 1. bis zum 99. Perzentil, die zwar eine große Abdeckung der potentiellen Kunden in der Bevölkerung sicherstellt, jedoch auch zu einer erheblichen Erweiterung der technisch notwendigen Freiräume und Verstellbereiche führen kann.

Tab. 4.2 Abmessungen der menschlichen Hand [nach DIN 33 402, Teil 2]

Abschnitt	5. Perzentil weiblich	95. Perzentil männlich
Fingerkuppe Zeigefinger	13 mm	20 mm
Handdicke	21 mm	32 mm
Handflächenlänge	91 mm	117 mm
Handlänge	159 mm	201 mm
Handbreite mit Daumen	82 mm	116 mm

der Handhaltung und Greifart eine besondere Bedeutung zu, die die notwendigen Freiräume um ein Bedienelement bestimmen (Tab. 4.2).

4.2.1.5 Körpermaßtabellen

Der Abdruck kompletter Körpermaßtabellen ist an dieser Stelle nicht möglich, da alle Datenbanken bzw. Tabellen in zu erwerbenden Normen, Publikationen bzw. zugriffsbeschränkten Online-Portalen enthalten sind. Dass es wichtig ist, sich dabei an aktuellen Daten zu orientieren, soll beispielhaft durch die Angaben zur Körperhöhe der männlichen Bevölkerung in Tab. 4.3 veranschaulicht werden.

Einen Auszug möglicher Informationsquellen zeigt die folgende Aufzählung:

- Flügel, B., Greil, h. und Sommer, K.: Anthropologischer Atlas. Grundlagen und Daten, Alter- und Geschlechtsvariabilität des Menschen. Edition Wörtzel, Frankfurt/M (1986)
- DIN 33402 Teil 2: Angabe von 69 Körpermaßen beruhend „auf statistisch gesicherten Messungen an Personen, die im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland wohnen“ (DIN 33402 Teil 2)
- EN ISO 7250 Wesentliche Maße des menschlichen Körpers für die technische Gestaltung – Teil 2: Anthropometrische Datenbanken einzelner nationaler Bevölkerungen
- Datenbank iSize (▶ https://portal.i-size.net/SizeWeb/pages/home.seam): Internationales Körpermaßportal von Human Solutions zu Deutschland (SizeGERMANY), Frankreich, Niederlande, Schweiz, Japan, Korea, USA, China
- WEAR-Datenbank (▶ https://wear.istdayton.com/WearHome/Login/Login.aspx): Zusammenstellung vieler Messkampagnen hauptsächlich aus dem nordamerikanischen Militär. Unter anderem sind die Reihenmessungen CAESAR (erste Reihenmessung mit Bodyscannern von nordamerikanischen, niederländischen und italienischen Personen), NHANES III (Messung der nordamerikanischen Zivilbevölkerung 1970) und ANSUR (Messung aus dem nordamerikanischen Militärwesen 1988) enthalten.

4.2.1.6 Besondere Maßableitungen

Fuß und Schuh

Die anthropometrischen Abmaße des Fußes sind statistisch erfasst und annähernd normalverteilt. Erwartungsgemäß haben Frauen in der Regel kürzere und schmalere Füße als Männer. Wenn auch statistisch jedes beliebige Längen- oder Breitenmaß nachweisbar ist, hat die Schuhindustrie sich auf einheitliche Maßsysteme und vor allem auf eine Staffelung der Schuhgrößen verständigt, die eine rationellere Fertigung der Konfektionsgrößen zulässt. Unabhängig davon kann die Fußlänge des linken Fußes erheblich (bis zu 5 %) von der des rechten abweichen und auch das Längen-Weiten-Verhältnis eines Fußes sowie die Höhe und Wölbung des Fußrückens stark von der Idealform abweichen, sodass das Tragen einer konfektionierten (Schuh-)Größe nicht möglich ist und Sonderanfertigungen (Maßschuhe) aus anthropometrischen Gründen erforderlich sind. Gängige Schuhgrößensysteme sind der *Pariser Stich* (Kontinentaleuropa), *Barleycorn* (GB, USA) und das *Monopoint-System* (Japan). Schuhe für Männer und Frauen unterscheiden sich hinsichtlich der Zuordnung von Schuhgröße und Fußlänge nicht. Eine gesonderte Kennzeichnung der Schuhbreite erfolgt in der Regel nur selten, wenn auch einige Schuhhersteller verschiedene Breitenstufungen, insbesondere für Kinderschuhe, eingeführt haben. So ist ein Deutschland das WMS-System geläufig. In Asien ist eine Breitenstufung mit Buchstaben üblich. In den USA wird das Brannock-System verwendet. Tabelle 4.4 zeigt einen Überblick über die verschiedenen gebräuchlichen Systeme und Tab. 4.5 zugehörige Maße.

Generell wird die Schuhgröße aus der Fußlänge abgeleitet und ein Zuschlag (Schub) hinzugerechnet, damit der Fuß bei der Abrollbewegung

Tab. 4.3 Körperhöhe männlich für verschiedene Erhebungszeiträume (Deutschland)

	DIN (1968–1977)			DDR (1971–1986)			HdE (88–89)			SizeGERMANY (2007–09)		
	Perzentil			Perzentil			Perzentil			Perzentil		
Alter	5.	50.	95.	5.	50.	95.	5.	50.	95.	5.	50.	95.
18–19	167,7	177,1	189,3	162,0	175,8	187,6	168,8	180,9	193,3		180,8	
20–25	165,2	175,8	186,5	164,0	176,4	188,2	168,0	179,0	193,0		181,8	
26–40	164,5	174,5	185,2	162,5	173,8	186,1	167,5	177,5	188,0	165,3	178,2	192,9

des Gehens/Laufens im Schuh gleiten kann. Die Innenlänge des Schuhes ergibt sich aus Fußlänge zuzüglich des Schubs. Die Außenlänge ergibt sich aus der Machart der Sohle und des Schuhtypus. Die Schuhgröße bezieht sich jedoch hauptsächlich auf die Schuhlänge, im Grunde genommen ist jedoch das Leistenmaß ausschlaggebend als das Maß der zugrundeliegenden Urform der Fußrepräsentation.

Der *Pariser Stich* legt eine Stufung von 2/3 cm (ca. 6,67 mm) fest. Ein 28 cm langer Fuß benötigt mit 1 cm Schub, der Materialstärke des Obermaterials und des Sohlenüberstandes von 2 cm einen Schuh, der ca. 320 mm lang ist (Größe 45). Dieser Schuh ist dann in der Regel etwa 110 mm breit. Um eine Betätigung der Pedalerie zu gewährleisten, sind zuzüglich zu den reinen Längen- und Breitenmaße noch Bewegungszuschläge zu machen. Darüber hinaus ist für Fahrzeuge, die hauptsächlich mit Arbeitsbekleidung betrieben werden, zu berücksichtigen, dass Arbeitssicherheitsschuhe mit größeren Abmaßen und Freiräumen berücksichtigt werden müssen. Die Wahl der Fußablagefläche sollte ebenfalls so gewählt werden, dass die gesamte notwendige Fußlänge kollisionsfrei unterzubringen ist und die Fußbreite mindestens zu 2/3 unterstützt wird, damit eine kippfreie Auflage gewährleistet ist.

Tab. 4.4 Schuhgrößensysteme in verschiedenen Märkten

Region	Stufung
Deutschland	W (weit), M (mittel), S (schmal)
Deutschland	F („Normalweite" – schlank), G („Komfortweite" – normal), H („Bequemweite" – kräftig), J („Bequemweite" – Überweite), K, L, M („Spezialweiten")
GB	N (narrow – schmal), M (medium) oder R (regular), W (wide – weit)
Asien	A (schmal), B, C, D, E, EE, EEE, EEEE, F, G (weit)
USA	4 A (schmal), 3 A, 2 A, A, B, C, D, E, 2E, 3E, 4E, 5E, 6E (weit)

Kopfbedeckungen

Das Tragen von Kopfbedeckungen in der Öffentlichkeit und damit auch während des Fahrens ist von der Region, der Kultur, modischen Zeiterscheinungen und unter Umständen von der sozialen Stellung oder der beruflichen Funktion abhängig. Den Kopfraum eines Fahrzeuges allein nach der anthropometrischen Stammlänge des Menschen ohne Kopfbedeckung auszulegen, wäre unter Vernachlässigung des sozialen Kontextes und damit einer Berücksichtigung entsprechender Kopfbedeckungen zu kurz gegriffen. So hängt der wirtschaftliche Erfolg bestimmter Fahrzeuge oftmals von solch zusätzlichen Sonderanforderungen ab. Prominentes Beispiel für eine solche Anforderung ist der anhaltende Erfolg des Hindustan Ambassador in Indien, ein Fahrzeug, das auf eine Entwicklung des Morris Oxford Series III von 1956 zurückgeht und immer noch in Indien gebaut wird. Es ist insbesondere als Taxi beliebt, weil das stark aufgewölbte Dach genügend Innenraumhöhe zur Verfügung stellt, damit Fahrer und Fahrgast bequem mit Turban das Fahrzeug benutzen können. Berufsbedingt können ebenso wie bei den Schuhen spezielle Kopfbedeckungen notwendig oder vorgeschrieben sein, wie die Mütze eines Chauffeurs oder ein besonderer Arbeitsschutzhelm, der auch während der Fahrt getragen werden muss. Tabelle 4.6

Tab. 4.5 Schuhgrößen Bezeichnungen in Abhängigkeit von den Abmessungen des Fußes

Schuh-länge	Schuh-breite	Fuß-länge	Fuß-breite	Per-zentil	Per-zentil				GB, USA	USA	
mm	mm	mm	mm	männ-lich	weib-lich	D/EU	F	JP	Her-ren	Da-men	E
225	80	210	75		5.	34	34	21 ½	2	3 ½	–
230						34/35	35	22	2	4	–
235	85	220	80			35	36	22 ½	2 ½	4 ½	34
240						35/36	37	23	3	5	–
245	95	230	90			36	37/38	23 ½	3 ½	5 ½	35
250						36/37	38	24	4	6	–
255	100	245	95		50.	37	38/39	24 ½	4 ½	6 ½	36
260						37/38	39	25	5	7	37
265	105	250	100	5.		38/39	40	–	5 ½	7 ½	–
270						39	41	–	6	8	38
275						39/40	41/42	–	6 ½	8 ½	–
280	105	255	100			40	42	–	7	9	39
285						40/41	–	–	7 ½	9 ½	–
290						41	–	–	8	10	–
295						41/42	–	–	8 ½	10 ½	–
300	110	260	105			42/43	–	–	9	11	–
305	110	265	105		95.	43	–	–	9 ½	11 ½	–
310	110	270	105	50.		43/44	–	–	10	12	–
315						44	–	–	10 ½	12 ½	–
320	110	280	110			45			11	13	–
325	115	290	110	95.		46	–	–	11 ½	13 ½	–
330	115	300	115			46/47	–	–	12	14	–

Tab. 4.6 typische Zuschläge für ausgewählte Kopfbedeckungen

Kopfbedeckung	Zuschlag zur Stamm-länge / Kopffreiheit
Schirmmütze/	20–80 mm
Schirmmütze/Chauf-feursmütze	20–60 mm
Schutzhelm Bauhelm (EN 397)	30–50 mm
Turban	40–150 mm
Hut (Bowler)	10–30 mm

zeigt Zuschläge, die für die verschiedenen Anwendungsbereiche notwendig sind.

Zusätzliche Bekleidungsstücke

Abhängig von dem Einsatzort oder Verwendungszweck des Fahrzeuges müssen besondere Kleidungsstücke oder zusätzlich mitgeführte Geräte berücksichtigt werden, die eine Einschränkung der Bewegungsfreiheit oder erweiterten Platzbedarf erfordern. So erfordert bei Einsatzkräften wie Polizei oder Personenschutz das Mitführen von Handfeuerwaffen im Gürtelholster eine über das übliche Maß hinausgehende Hüftraumfreiheit, die nicht von der Sitzkissen- oder Lehnenkontur eingeschränkt wer-

den darf. Gegebenenfalls müssen die Fahrzeuge kostenaufwändig für den Einsatzzweck umgerüstet und mit speziellen Sitzen, die die notwendigen Platzverhältnisse zur Verfügung stellen, ausgestattet werden.

Eine besondere Stellung nehmen die Hände ein, da viele Fahrzeuge, vor allem beim Betrieb im Winter, mit jahreszeittypischer Bekleidung zu bedienen sind. So sollten sich Türen, Klappen, Hauben und Serviceöffnungen auch mit Handschuhen bedienen lassen. Hier ist der Bekleidungszuschlag auf Durchmesser und Dicke von Fingern und Händen bis zu 1–2 cm zu berücksichtigen, was die Vergrößerung von Eingriffsöffnungen für die Hände unter Umständen um 50–100 % notwendig machen kann.

4.2.2 Gewicht

Rainer E. Grünen

Ein weiteres wichtiges Körpermaß ist das Körpergewicht und damit auch die Körperteilgewichte der einzelnen Extremitäten. Das Körpergewicht erwachsener Menschen liegt zwischen 46 kg und 130 kg, lediglich 1 % der Bevölkerung weist ein niedrigeres oder höheres Körpergewicht auf. Da die Körperproportionen jedoch für den Menschen als Spezies typisch sind, verhalten sich die Körperteilgewichte, mit geringen Abweichungen durch die Korpulenz, gemäß einer durchgehenden Ähnlichkeit. Tabelle 4.7 zeigt die Körperteilgewichte für das 5. Perzentil weiblich und das 95. Perzentil männlich nach den Ergebnissen von SizeGERMANY (2009).

Die Gewichtsverteilung hat sich regional – und ist insbesondere in Staaten des westlichen Kulturraumes durch energiereiche Nahrung[18] – zu korpulenten Typen hin verschoben. Die Korrelation der Körpergröße zum Körpergewicht ist nur eingeschränkt gegeben (siehe Abb. 4.31). So ist das Körpergewicht von 80 kg über Körpergrößen von 1,55 m bis 2,00 m verteilt. Menschen mit einer Statur von 1,78 m können von 60 kg bis 150 kg wiegen.

Tab. 4.7 Körperteilgewichte (Quelle Size GERMANY 2009)

Körperteil	5. Perzentil weiblich	95. Perzentil männlich
Rumpf (60 %)	31 kg	66,2 kg
Kopf (6 %)	3,1 kg	6,6 kg
Bein (12,5 %)	6,4 kg	13,8 kg
Arm (4,5 %)	2,3 kg	5,0 kg
Gesamt (100 %)	51,5 kg	110,4 kg

Um die stark variierenden Körpergewichte mit der Körpergröße in Vergleichsklassen einteilen zu können, hat sich der Body Mass Index (BMI[19]) international durchgesetzt. Allerdings gibt es verschiedene Berechnungsansätze, von denen das Verhältnis der Körpermasse zum Körperhöhe im Quadrat die gebräuchlichste ist (4.2):

$$\mathrm{BMI} = \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{l}^2} \tag{4.2}$$

mit:
m = Körpermasse in Kilogramm (kg) und
l = Körperhöhe in Meter (m)[20].

Die entsprechende dimensionslos behandelte Kennzahl *BMI*[21] wird in verschiedene Fettleibigkeitsklassen eingeteilt. Das „Normalgewicht" einer Person ist mit einem BMI von 18,5 bis 24,9 definiert. Als übergewichtig (Preadipositas) werden Personen bezeichnet, deren BMI zwischen 25,0 und 29,9 liegt[22]. Darüber hinaus werden drei Fettleibig-

18 Die Fettleibigkeit oder Adipositas wird nach ICD-10 der World Health Organisation (WHO) unterschieden in Adipositas durch übermäßige Kalorienzufuhr, Arzneimittelinduzierte Adipositas, Übermäßige Adipositas mit alveolärer Hypoventilation, Sonstige und nicht näher bezeichnete Adipositas

19 BMI: Body Mass Index auch Körpermasseindex (KMI), Körpermassenzahl (KMZ) oder Quetelet-Kaup-Index

20 BMI aufgrund imperialer Maßeinheiten: BMI = (Körpermasse in pound (lb) * 703) / (Körperhöhe in inch (in))^2

21 Die korrekte Einheit der BMI-Vergleichszahl ist kg/m^2. Sie wird in der Regel jedoch weggelassen. Der BMI wird gewöhnlich als einheitslose Zahl angegeben

22 Interessanterweise wird gerade dieser Gewichtsklasse nach neuesten Untersuchungen die höchste Lebenserwartung zuerkannt, so dass die bisher übliche Bezeichnung als bedenkenswert gilt.

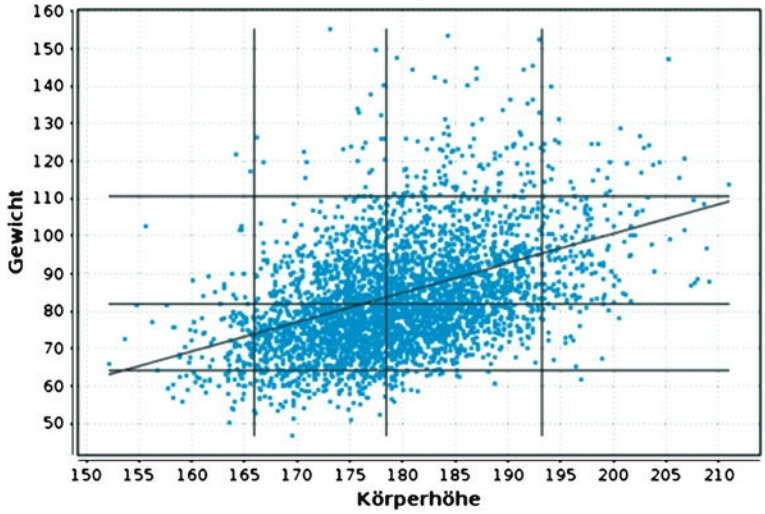


Abb. 4.31 Abhängigkeit des Gewichtes von der Körperhöhe [Size Germany 2009] Korrelation $r^2 = 0{,}45$

Körpergröße [m] \ Gewicht [kg]	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
2,00	12,5	13,8	15,0	16,3	17,5	18,8	20,0	21,3	22,5	23,8	25,0	26,3	27,5	28,8	30,0
1,95	13,1	14,5	15,8	17,1	18,4	19,7	21,0	22,4	23,7	25,0	26,3	27,6	28,9	30,2	31,6
1,90	13,9	15,2	16,6	18,0	19,4	20,8	22,2	23,5	24,9	26,3	27,7	29,1	30,5	31,9	33,2
1,85	14,6	16,1	17,5	19,0	20,5	21,9	23,4	24,8	26,3	27,8	29,2	30,7	32,1	33,6	35,1
1,80	15,4	17,0	18,5	20,1	21,6	23,1	24,7	26,2	27,8	29,3	30,9	32,4	34,0	35,5	37,0
1,75	16,3	18,0	19,6	21,2	22,9	24,5	26,1	27,8	29,4	31,0	32,7	34,3	35,9	37,6	39,2
1,70	17,3	19,0	20,8	22,5	24,2	26,0	27,7	29,4	31,1	32,9	34,6	36,3	38,1	39,8	41,5
1,65	18,4	20,2	22,0	23,9	25,7	27,5	29,4	31,2	33,1	34,9	36,7	38,6	40,4	42,2	44,1
1,60	19,5	21,5	23,4	25,4	27,3	29,3	31,3	33,2	35,2	37,1	39,1	41,0	43,0	44,9	46,9
1,55	20,8	22,9	25,0	27,1	29,1	31,2	33,3	35,4	37,5	39,5	41,6	43,7	45,8	47,9	49,9
1,50	22,2	24,4	26,7	28,9	31,1	33,3	35,6	37,8	40,0	42,2	44,4	46,7	48,9	51,1	53,3

<= 16,0 starkes Untergewicht	25,0 - 29,99 Präadipositas
16,0 - 16,99 mäßiges Untergewicht	30,0 - 34,99 Adipositas Grad I
17,0 - 18,49 leichtes Untergewicht	35,0 - 39,99 Adipositas Grad II
18,5 - 24,99 Normalgewicht	< 40,0 Adipositas Grad III

Abb. 4.32 Gewichtsklassen in Abhängigkeit von der Körperhöhe

keitsklassen beschrieben: Adipositas Grad I (Obesity Class I) BMI 30,0 bis 34,9, Adipositas Grad II (Obesity Class II) BMI 35,0 bis 39,9 und Adipositas Grad III, Adipositas permagna oder morbide Adipositas (Obesity Class III) mit einem BMI von 40 und größer. Unterhalb des Normalgewichtes sind drei Klassen des Untergewichtes definiert: Leichtes (17,0 bis 18,5), mäßiges (16,0 bis 17,0) und starkes Untergewicht (kleiner als 16,0). Abbildung 4.32 zeigt diese Gewichtsklassen in Abhängigkeit von der Körperhöhe.

Der Mikrozensus von 2009 erbrachte für Deutschland die folgenden Werte: 44,4 % der Männer und 29,1 % der Frauen sind übergewichtig, 15,7 % der Männer bzw. 13,8 % der Frauen weisen mit einem BMI von 30 und mehr auf und sind damit adipös. Knapp die Hälfte der Deutschen liegt im Normalgewicht (Männer: 39,2 %, Frauen: 53,7 %)

und nur wenige Personen sind untergewichtig (Männer: 0,7 %, Frauen: 3,4 %). Ein gänzlich anderes Bild zeichnet sich in Nordamerika, wo nach einer Studie des CDC[23] 35,7 % der Erwachsenen und sogar bereits 16,9 % der Kinder fettleibig (BMI > 30) sind. Aus dieser veränderten Konstitution der Menschen und damit der Fahrzeugnutzer leitet sich eine besondere Herausforderung für die Automobilhersteller ab. Waren bis vor wenigen Jahren noch Auslegungswerte mit einem Körpergewicht von 90 kg zur Dauerhaltbarkeit von Sitzen (Sitzstrukturen und -schäumen) zeitgemäß, müssen diese Werte aufgrund der veränderten Körpermasse der Fahrzeugnutzer stark erhöht werden, um mechanischen Versagensfällen vorzubeugen, die alleine auf höhere mechanische Beanspruchung zurückgehen. Nicht nur die direkte Körperabstützung auf Bauteile (Sitze, Armauflagen, Mittelkonsole, Kofferraum) erfordert technische Anpassungen, sondern auch Bezugsstoffe und Verkleidungsteile, die aufgrund der höheren Belastung verstärkt auf Abrieb und Verschleiß beansprucht werden. Das führt nicht nur zu strukturellem Mehrgewicht und damit zu höherem Kraftstoffverbrauch, sondern auch zu erhöhten Herstellungskosten und damit zu höheren Produktkosten. Die Gewichtsspirale, die vom erhöhten Gewicht des Nutzers ausgeht, setzt sich somit beim Fahrzeug fort.

4.2.3 Kräfte

Fabian Günzkofer

Für die anthropometrische Auslegung eines Kraftfahrzeugs spielt die Kenntnis von verfügbaren Kräften und maximal aufzubringenden Kräften eine wichtige Rolle. Zum einen gibt es eine hohe Anzahl an Tätigkeiten im Kontext der Automobilnutzung, welche Kraftaufwände unterschiedlichen Niveaus erfordern (Ein-/Ausstieg, Kuppeln, Schalten, Bremsen, Handbremse ziehen, Kofferraum beladen). Zum anderen ermöglicht das Wissen haltungsspezifischer Maximalkräfte ebenso eine Bewertung von submaximalen Kraftaufgaben. Zacher und Bubb (2004) konnten zeigen, dass der Diskomfort (siehe ▶ Abschn. 3.3.4) linear mit dem Ausnutzungsgrad der Maximalkraft ansteigt. Somit können Haltungsbewertungen von Kraftkurven im Bewegungsraum abgeleitet werden. Auch weitere Designparameter, wie akzeptable Kraftniveaus, werden häufig als prozentualer Anteil der Maximalkraft angegeben (MacKinnon 1998). Die Höhe der Maximalkraft in einer Haltung dient folglich als Indikator des Diskomforts für das Aufbringen von submaximalen Kräften.

Daams (1994) führt ein weiteres Argument zur notwendigen Kenntnis von Kräften an. Für ein adäquates Produktdesign benötigt der Designer/Ingenieur die Kräfte der Schwächsten, damit diese das Produkt sicher und komfortabel nutzen können sowie die Kräfte der Stärksten, damit diese das Produkt nicht versehentlich zerstören. Weiterhin plädiert sie für eine vernünftige Berücksichtigung der menschlichen Kräfte, da somit unnötige Servo-Systeme eingespart werden könnten.

4.2.3.1 Kräftemessungs- und Kräftekategorisierungsansätze

Kraftmessungen und -kategorisierung ist wegen der willensabhängigen individuellen Dosierbarkeit eine sehr schwierige Aufgabe, die bei weitem nicht so zweifelsfrei gelöst ist wie die von Längen- und Umfangsmaßen. Prinzipiell lassen sich drei unterschiedliche Herangehensweisen für die Messung und Modellierung von Kräften unterscheiden (◘ Abb. 4.33).

Im einfachsten Fall können Kraftfälle von Interesse direkt gemessen werden. Dies entspricht dem Vorgehen *aufgabenspezifischer Kraftmessungen*, in welchen die Haltung entweder frei wählbar oder durch die Aufgabe eindeutig vorgegeben ist. Ein Beispiel hierzu wäre die Kraftmessung beim Ziehen der Handbremse in einem Mock-up. So hat Rühmann (1992) im Rahmen des geförderten Projektes „Humanisierung des Arbeitslebens" unter dem Forschungsvorhaben „Körperkräfte des Menschen" eine langjährige Reihenmessung isometrischer Maximalkräfte mit über 3000 Probanden durchgeführt. Die entsprechenden Daten sind

23 CDC: Center of Disease Control and Prevention, Division of Nutrition, Physical Activity and Obesity (DNPAO): NCHS Data Brief, Prevalence of Obesity in the United States, 2009-2010

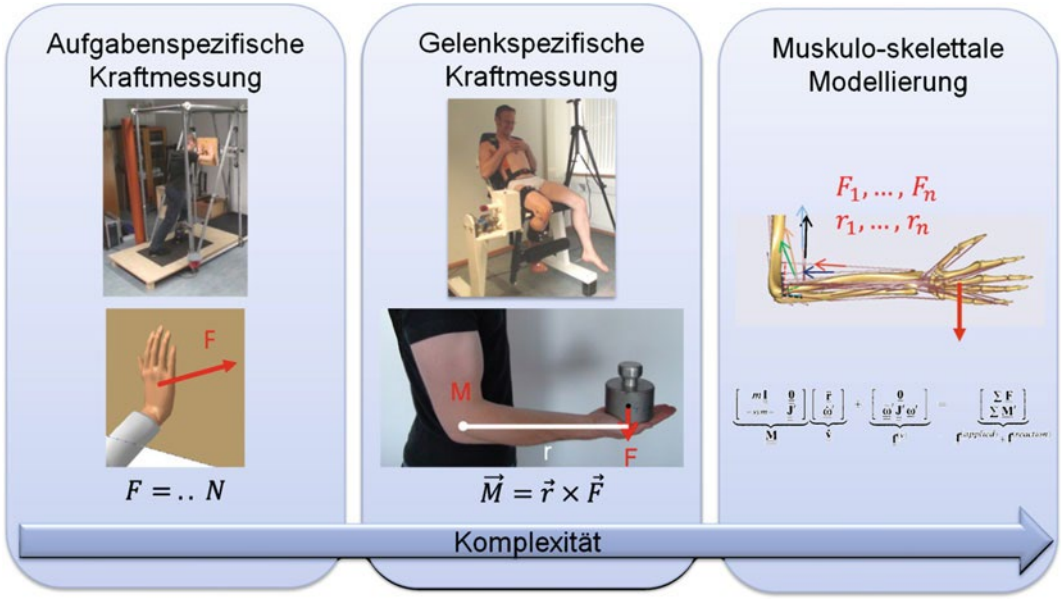


Abb. 4.33 Unterschiedliche Mess- und Modellierungsansätze zur Kraftmodellierung

im Handbuch der Ergonomie; Band 3 (Schmidtke 1993, 2013) enthalten. Eine Aktualisierung und Erweiterung hat die aufgabenspezifische Kraftdatensammlung durch den montagespezifischen Kraftatlas erfahren (Wakula et al. 2009). Dieser beinhaltet Aktionskräfte des ganzen Körpers sowie des Finger-Hand-Arm-Systems für realtypische Haltungen in der Industrie. Der große Vorteil an aufgabenspezifischen Kraftmessungen liegt in einer sehr schnellen Erfassung von Maximalkräften unterschiedlicher Probanden. Eine Tabellierung und möglicherweise Perzentilierung gemessener Werte ermöglicht eine einfache Anwendung für Praxisfälle, die exakt den Versuchsbedingungen entsprechen. Allerdings werden bei diesem Ansatz zwei entscheidende Parameter vernachlässigt. Bereits in ▶ Abschn. 4.1.2.1 wurde erwähnt, dass die von einem Gelenk aufzubringende Kraft von der Haltung abhängt. Diese wird jedoch bei aufgabenspezifischen Kraftmessungen nicht gezielt vorgegeben. Somit ist die Anwendung der Ergebnisse nur valide, wenn die zu bewertende Haltung der Messhaltung möglichst genau entspricht. Weiterhin spielt auch die Anthropometrie der Versuchspersonen eine wesentliche Rolle, welche bei diesem Ansatz häufig nicht gezielt berücksichtigt wird (Engstler 2012). Man beachte, dass sich bei dem gleichen Versuchsaufbau, z. B. Drücken gegen eine Platte auf bestimmter Höhe, unterschiedliche Haltungen für Menschen unterschiedlicher Körpermaße ergeben. Somit werden Menschen gleichen Kraftvermögens, aber unterschiedlicher Anthropometrie, unterschiedliche Kraftwerte erreichen. Insofern müssten die Werte zusätzlich zum Geschlecht auch nach relevanten Körpermaßen aufgeteilt werden. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass aufgabenspezifische Messungen sehr schnell durchführbar und leicht anwendbar sind, jedoch nicht auf beliebige Situationen angewandt werden können.

Der Ansatz *gelenkspezifischer Kraftmessungen* löst die Probleme der aufgabenspezifischen Kraftmessung, erhöht jedoch den Komplexitätsgrad der Messung und Modellierung. Der Grundgedanke besteht in der experimentellen Ermittlung des funktionalen Zusammenhangs zwischen Gelenkmomenten und Gelenkwinkeln. Somit können maximale Gelenkmomente für unterschiedliche Anthropometrien und Haltungen in unterschiedliche Wirkrichtungen vorhergesagt werden (Schwarz 1997; Seitz et al. 2005). Über dynamische Gleichungen, beispielsweise Newton-Euler-Gleichungen, werden schließlich basierend auf den maximal möglichen Momenten in

den einzelnen Gelenken die nach außen hin maximal möglichen Kräfte an den Endeffektoren berechnet.

Der komplexeste Ansatz besteht in der *muskulo-skelettalen Modellierung*. Hierbei wird die Modellierungstiefe erhöht und einzelne Muskelkräfte, welche in Summe ein Gelenkmoment bilden, betrachtet. Im inversen Ansatz werden für eine bestimmte Bewegung (z. B. aus Markertrajektorien eines Bewegungserfassungssystems), die notwendigen Muskelkräfte für ein dynamisches Gleichgewicht errechnet (Damsgaard et al. 2006). So müssen für korrekte Ergebnisse die Hebelarme von den Muskeln zu den Gelenken, Ursprung und Ansatz der Muskel, Fiederungswinkeln der Muskel, Maximalkraft bei idealer Muskellänge, Muskelquerschnitte und gewählte Muskelmodelle (z. B. Hill-Muskel) exakt bekannt sein. Darüber hinaus besteht gemäß der Theorie nach Bernstein das Problem der Redundanz des menschlichen Bewegungsapparates (Bernstein 1967). Das Gleichungssystem zur Muskelrekrutierung ist deutlich überbestimmt, da jeweils viele Muskeln für einen einzigen Freiheitsgrad zur Verfügung stehen. Es wird versucht, die Muskelrekrutierung durch das Zentrale Nervensystem durch verschiedenste Rekrutierungsalgorithmen nachzubilden (Crowninshield 1978; Dul et al. 1984; Jongen et al. 1989; Rasmussen et al. 2002; Abdel-Malek et al. 2006). Die Suche nach dem einzig wahren Algorithmus ist jedoch noch nicht abgeschlossen (Rasmussen et al. 2001). Trotz aller angesprochenen Optimierungsbedarfe bieten muskulo-skelettale Modelle eine ideale Möglichkeit, Reaktionen im Körperinneren auf äußere Belastungen zum Vorschein zu bringen.

Allgemein werden bei allen Kraftmessungen unterschiedliche Messmethoden differenziert. Zum einen besteht ein Unterschied zwischen statischen isometrischen Messungen, welche während der Messung die Haltung und somit die Muskellängen konstant halten, und dynamischen Messungen, bei welchen die Messung in einem gewissen Ausschnitt des Bewegungsraums stattfindet (Kumar 2004). Bei statischen Messungen werden weiterhin die Plateaumethode, die Rampenmethode und die Impulsmethode unterschieden (Kroemer 1977). Bei der Plateaumethode wird die Maximalkraft über 4 s gehalten, während bei der Rampenmethode die Maximalkraft langsam bis zum absoluten Maximum gesteigert wird. Die Impulsmethode entspricht einem kurzen, ruckartigen Anreißen. Von allen Methoden findet in der wissenschaftlichen Forschung die Plateaumethode die häufigste Verwendung.

Bei Verwendung von Kraftdaten muss dem Nutzer die zu Grunde liegende Methode bekannt sein, da verschiedene Messarten zu mitunter unterschiedlichen Ergebnissen führen können (Engstler 2012).

4.2.3.2 Kraftmessung

Kraftmessungen sind aufwändig und die Ergebnisdarstellung zudem recht komplex. Im Folgenden wird kurz erläutert, wie eine statische Maximalmomentmessung konventionell abläuft und wie die Darstellung von Ergebnissen aussehen kann. Isometrische, im Vergleich zu isokinetischen (dynamischen), Messungen haben die Besonderheit, dass während der Messung keine Bewegung erfolgt. Daher müssen Kraftmessmaschinen verwendet werden, welche sich zum einen an unterschiedliche Anthropometrien der Versuchspersonen anpassen lassen und zum anderen in unterschiedlichen Haltungen fixieren lassen. Das Messprinzip jeder Maschine ist, dass genau entlang der anatomischen Drehachse eines Gelenks ein Drehmomentsensor positioniert ist. Somit kann ohne indirektes Umrechnen einer Kraft über den Hebelarm direkt das Gelenkmoment sensiert werden. Um eine maximale Kraftentfaltung zu ermöglichen und die erwünschte Haltung exakt einzuhalten, ist eine ausreichende Stabilisierung des Probanden über Polster und/oder Gurte erforderlich (Günzkofer et al. 2012a). In ◘ Abb. 4.34 finden sich zwei Beispiele für Gelenkmomentmessungen des Ellbogens und des Kniegelenks.

Die wichtigsten Elemente einer Messung bestehen in einer adäquaten Aufwärmphase, einer mindestens zweimaligen Kraftmessung pro Haltung, einer ausreichenden Regenerationszeit von zwei Minuten zwischen den Versuchen sowie einer sinnvollen Einschränkung der Anzahl von Maximalmomentmessungen eines Gelenks pro Messtag (Smidt und Rogers 1982; Kumar 2004; Mital und Kumar 1998; Brown und Weir 2001).

Die Ergebnisse von Maximalmomentmessungen mit einer hinreichend großen Stichprobe an Probanden werden anschließend statistisch ausgewertet. Für jede Haltung erfolgt die deskriptive Angabe von Mittelwert und Standardabweichung.

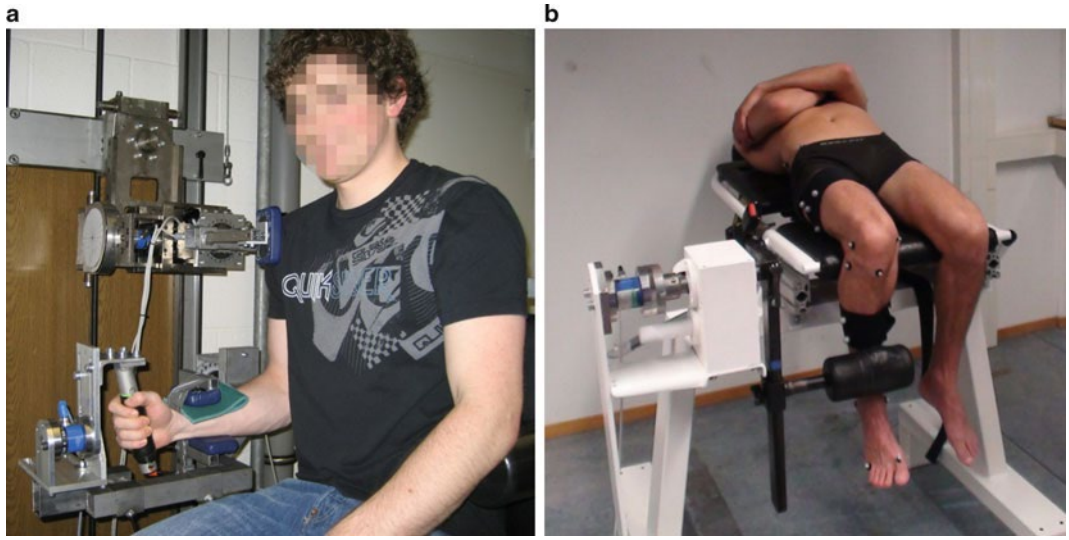


Abb. 4.34 Beispiele zu Momentenmessmaschinen für Ellbogenflexion/-extension (**a**) und Knieflexion/-extension (**b**)

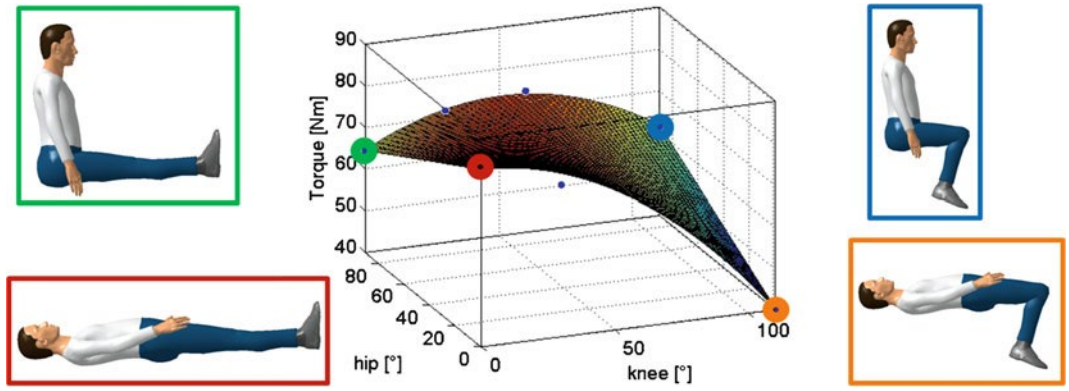


Abb. 4.35 Funktionaler Zusammenhang für maximale Knieflexionsmomente in Abhängigkeit von Hüft- und Knieflexion aus Günzkofer et al. (2011a)

Üblicherweise werden durch lineare, multiple Regressionen die Zusammenhänge zwischen Gelenkmoment und Gelenkwinkeln modelliert. Darüber hinaus können durch inferenzstatistische Methoden wie z. B. Varianzanalysen signifikante Kraftunterschiede bedingt durch Geschlecht, Alter oder Haltung überprüft werden (siehe hierzu ▶ Kap. 12).

Als Beispiel für einen dreidimensionalen Ergebnisplot dient der Zusammenhang zwischen Knieflexionsmoment und Knieflexions- sowie Hüftflexionswinkel (Günzkofer et al. 2011a). Die Grafik zeigt, dass das höchste Knieflexionsmoment bei gestrecktem Bein und gestreckter Hüfte erreicht wird (Abb. 4.35). Das Moment sinkt mit zunehmendem Hüft- und Kniewinkel in gezeigter Interaktion.

Als Beispiel für ein zweidimensionales Diagramm dient die Darstellung von maximalen Ellbogenflexionsmomenten für unterschiedliche Schulter- und Ellbogenflexionswinkel (Günzkofer et al. 2012b). Es zeigt sich, dass die höchste Ellbogenbeugekraft bei rechtwinklig angewinkeltem Arm und herabhängendem Oberarm aufgebracht werden kann (Abb. 4.36). Wird der Schulterwinkel erhöht, erniedrigt sich das maximale Ellbogenflexionsmoment bei konstantem Ellbogenflexionswinkel. Weiterhin zeigt sich eindeutig das ansteigende Verhalten bis zum Maximum

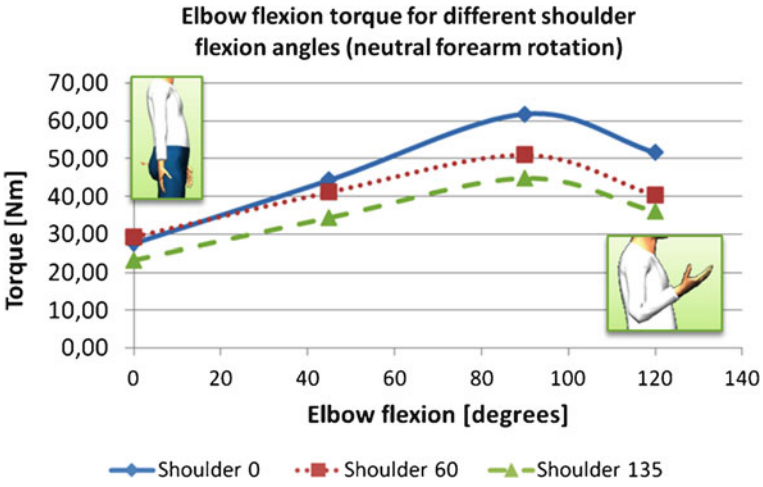


Abb. 4.36 Maximales Ellbogenflexionsmoment in Abhängigkeit von Schulter- und Ellbogenflexion nach Günzkofer et al. (2012b)

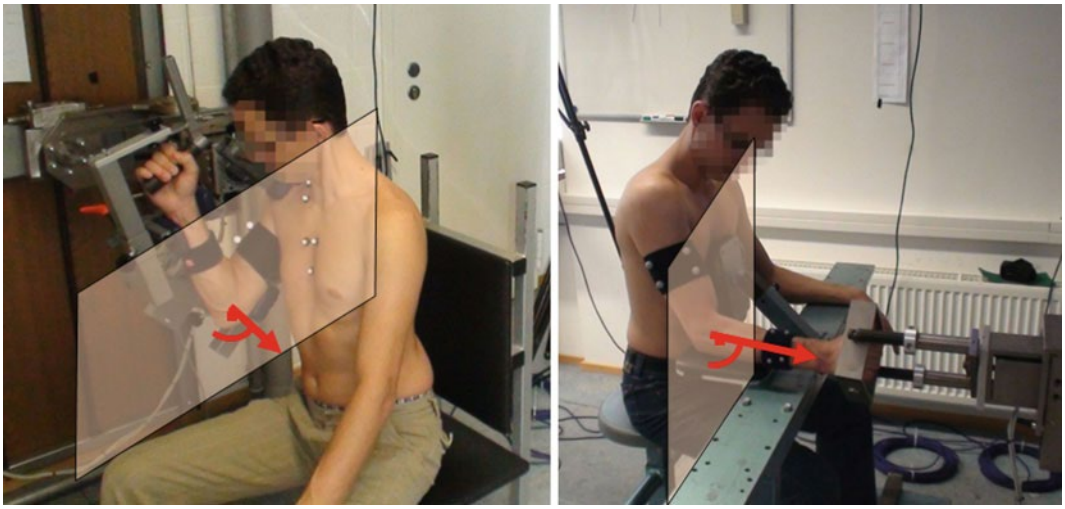


Abb. 4.37 Darstellung konventioneller Kraftmessungen, in welchen nur in Hauptrichtungen gemessen wird

bei 90° Ellbogenflexion, gefolgt von einem Abfall hin zu stärker gebeugten Haltungen.

Bis zu dieser Stelle wurden nur Maximalmomente in die jeweiligen Hauptrichtungen betrachtet. Abbildung 4.37 verdeutlicht, wie maximale Flexionsmomente in einer Ebene verschiedener Flexionswinkel sowie maximale Supinations-/Pronationsmomente für unterschiedliche Unterarmrotationen gemessen werden.

Aus typischen Kraftmessungen erhält man nur die jeweiligen Maximalmomentwerte entlang der Hauptachsen. Es liegt jedoch auf der Hand, dass die aus externen Lasten resultierenden erforderlichen Gelenkmomente in beliebige Richtungen gerichtet sein können. Somit muss für eine Kraftmodellierung die Beschreibung maximaler Gelenkmomente auch in Zwischenrichtungen berücksichtigt werden. Auf Grund der Multifunktionalität verschiedener Muskeln, z. B. Bizeps als Beuger und Supinator, ist nicht von einer reinen Vektoraddition wie in Abb. 4.38 auszugehen.

Günzkofer et al. (2012c) haben dieses Phänomen im Rahmen von Probandenversuchen untersucht und sind zu dem Ergebnis gekommen, dass der Zusammenhang im zweidimensionalen Fall (z. B. Ellbogengelenk) am besten durch eine abschnittsweise Ellipse modelliert werden kann (Abb. 4.39). Der genaue Weg der Modellierung und Anwendung kann Günzkofer (2013) entnommen werden.

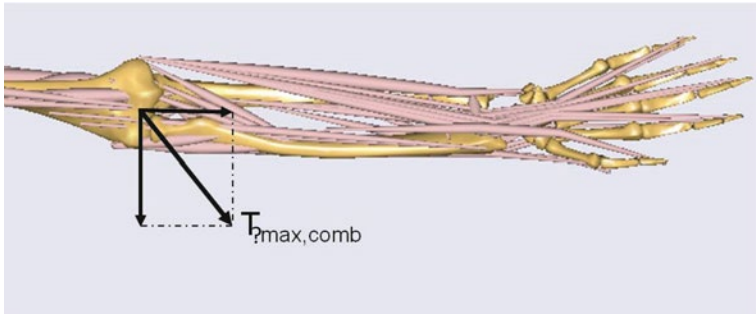


Abb. 4.38 Skizze eines erforderlichen Gelenkmoments in eine Zwischenrichtung mit der Fragestellung, wie dieses von den Gelenkmomenten in Hauptrichtungen abgeleitet werden kann (Das Armmodell entspricht dem digitalen Menschmodell AnyBody, AnyBody Technology, Aalborg, Denmark)

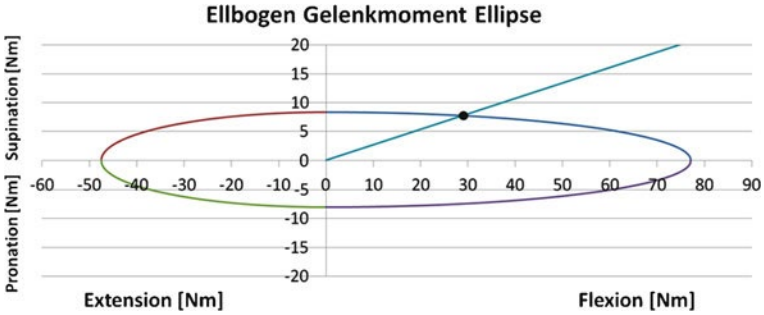


Abb. 4.39 Beispielhafte Illustration maximaler Ellbogengelenkmomente in beliebige Richtungen basierend auf dem Ellipsen-Ansatz

4.2.3.3 Kraftprognoseverfahren

Aus den unterschiedlichen Ansätzen der Kraftmessungen sind entsprechende Prognoseverfahren entstanden, mit deren Hilfe eine Abschätzung der maximal möglichen Aktionskräfte ermöglicht werden soll. Man unterscheidet also Kraftatlanten für aufgabenspezifische Angaben, gelenkspezifische Angaben und muskulo-skelettale Kraftmodellierungen. In dem Zusammenhang muss allerdings bemerkt werden, dass es sich bei vielen Verfahren darum handelt, Kräfte für Produktionsabläufe abzuschätzen. Die Übertragung auf die Anwendung im Kraftfahrzeug ist also nur eingeschränkt und mit entsprechenden Expertenwissen möglich. Um diesen Nachteil abzuhelfen, wird schon seit Jahren daran gearbeitet, entsprechende Kraftmodellierungen für die digitalen Menschmodelle aufzubereiten bzw. zu erstellen.

Kraftatlanten

Wie bereits erwähnt, sind die von Rühmann (1992) gemessenen Werte im Handbuch der Ergonomie (Schmidtke 1993, 2013) veröffentlicht. Tabellen 4.8–4.10 zeigen Auszüge aus diesem Tabellenwerk für Anwendungsfälle die einen gewissen Kraftfahrzeugbezug haben. In den Tabellen ist die Standardabweichung angegeben. Gemäß Gl. 4.1 kann daraus ein beliebiges Perzentil berechnet werden.

Weitere Angaben zu maximal möglichen Kräften für verschiedene Kraftrichtungen finden sich in DIN EN 1005; Rohmert et al. (1994) und Wakula et al. (2009). Insbesondere DIN 33411, Teil 5 enthält Angaben über maximale statische Aktionskräfte in perzentilierter Form. Bei der Dimensionierung von Aktionskräften sollte sich der Konstrukteur folglich an den unteren Perzentilwerten (5. bis 15. Perzentil) orientieren, um auch *schwachen* Personen das Bedienen zu ermöglichen. Geht es um die Dimensionierung des Bauteils, so ist eine Orientierung an den oberen Perzentilwerten nötig, wobei hier sogar noch Sicherheitszuschläge (üblicherweise 10–20 %) zu machen sind (Schlick et al. 2010).

Gelenkspezifische Verfahren

Gerade mit Zielrichtung eines Modellierungsansatz, der in Verbindung mit digitalen Menschmodellen angewendet werden kann, sind eine Vielzahl von Untersuchungen zu gelenkspezifischen Prognoseverfahren getätigt und teilweise veröffentlicht worden. Das von Burandt und Schultetus (1978) entwickelte Verfahren zur Abschätzung zulässiger Kräfte bzw. Momente des Hand-Arm-, Hand-Fin-

Tab. 4.8 Maximale Kräfte an Steuerarmaturen (nach Schmidtke und Rühmann 1989, B-4.3.1 und B-4.3.3)

			Maximale Kräfte [N]	
Steuerhebel (mittig)			Frauen	Männer
		Vorwärts (Druck)	242,0 ± 76,2	535,8 ± 153,5
		Rückwärts (Zug)	284,9 ± 58,9	470,4 ± 76,2
		Rechts (Abduktion)	206,5 ± 61,2	363,3 ±98,5
		Links Adduktion	164,8 ± 51,8	335,7 ± 93,2
Steuerhorn		Vorwärts (Druck)	878,3 ± 245,1	1623,4 ± 270,5
		Rückwärts (Zug)	485,2 ± 118,3	929,9 ± 217,3
		Rechtsdrehung	121,7 ± 30,2	239,4 ± 44,6
		Linksdrehung	134,3 ± 39,4	254,6 ± 48,6

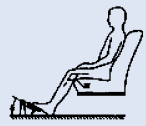
Tab. 4.9 Maximales Drehmoment an Stern- und Drehknöpfen sowie Kräfte an Drucktastern (nach Schmidtke und Rühmann 1989, B-4.36 und B-4.4.2)

		Maximales Drehmoment [Nm]	
		Frauen	Männer
Sternknöpfe (vertikal)		1,7 ± 0,53	2,9 ± 0,98
Drehknöpfe (vertikal)		1,5 ± 0,53	2,8 ± 1,06
Drucktaster (horizontal) Zeigefinger		58,8 ± 14,0	98,4 ± 28,6
Daumen		66,4 ± 18,1	145,2 ± 33,1
		Maximale Kräfte [N]	
Drucktaster (vertical)		78,8 ± 20,4	156,5 ± 28,9

gersystems sowie der Beine kann zu den gelenkspezifischen Verfahren gerechnet werden, obwohl es ursprünglich nicht für die Anwendung in digitalen Menschmodellen geplant war[24]. Dem Verfahren liegen Maximalkraftmessungen zu Grunde. Wie in Schlick et al. (2010) ausgeführt wird, war es zum Zeitpunkt der Verfahrensentwicklung noch nicht üblich, Kräfte perzentiliert darzustellen, so dass man bei den veröffentlichten Werten von Mittelwerten ausgehen muss. Im Prinzip besteht das Verfahren darin, aus den in Tabellen enthaltenen Werten die entsprechende Bezugskraft f zu entnehmen, die für sitzende bzw. stehende Tätigkeit in Abhängigkeit von der Position zur Körperhöhe, der Entfernung vom Körper sowie der Kraftrichtung modifiziert ist. Diese Kraft wird in Abhängigkeit

24 Das Verfahren wurde in den Ergonomielabors von Siemens entwickelt. Später wurde es mit Modifikationen von REFA und dem VDI übernommen.

Tab. 4.10 Maximale Kräfte an Fußpedalen bei einem Kniewinkel von 120° (nach Schmidtke und Rühmann 1989, B-4.5.1)

		Maximale Kräfte [N]	
		Frauen	Männer
Pedal (30°) Drehpunkt am hinteren Pedalende		642,2 ± 196,7	972,4 ± 228,6
Druckpedal (30°) ohne Drehpunkt		578,2 ± 156,2	855,8 ± 213,1
Pedal (30°) Drehpunkt am vorderen Pedalende		328,7 ± 104,7	457,8 ± 128,1
Horizontales Pedal Drehpunkt am vorderen Pedalende		316,8 ± 89,7	513,9 ± 119,2

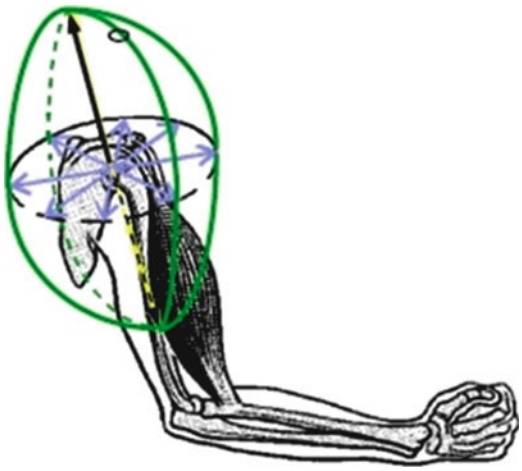


Abb. 4.40 Mögliche Gelenkmomente visualisiert als M- Kartoffeln (Schwarz 1997)

von verschiedenen Einflussgrößen (Alter und Geschlecht, Trainiertheit, Belastungsart) modifiziert. Um grobe Anhaltswerte (zum Beispiel für maximale Betätigungskräfte von verschiedenen Hebeln und für die Betätigung von Knöpfen in verschiedenen Raumrichtungen) zu erlangen, kann dieses Verfahren mit Einschränkung durchaus auch für die Produktgestaltung eines Kraftfahrzeugs genutzt werden, obwohl seine wissenschaftliche Begründetheit teilweise angezweifelt wird (Schlick et al. 2010). Nach Ansicht seiner Autoren Burandt und Schultetus hat sich das Verfahren aber in der Praxis weit gehend bewährt. Es wurde u. a. in dem Siemens PLM-Softwaresystem zur Fabrikplanung implementiert.

Wegen der komplexen Handhabung sind gelenkspezifische Verfahren eigentlich nur in digitalen Menschmodellen realisiert. Für das Menschmodell RAMSIS wurden auf der Grundlage von 29 jungen weiblichen Probandinnen von Schaefer et al. (2000) räumlich orientierte Maximalmomentkörper entwickelt, die wegen ihrer Form „Momenten-Kartoffel" genannt werden (Abb. 4.40). Synthetische Verteilungen ermöglichen dabei eine Kraftvorhersage für vordefinierte Zusammensetzungen von Geschlechts- und Altersgruppen (Schaefer et al. 1997).

Abb. 4.41 Hauptprogramm-Window von 3DSSPP (© 1990 The Regents of the University of Michigan, http://umich.edu/~ioe/3DSSPP/index.html)

An der Michigan University wurde bereits in den 70er Jahren mit der Entwicklung des 3D Static Strength Prediction Programs begonnen, dessen neueste Version als 3DSSPP 6.0.5 im März 2011 veröffentlicht wurde (Abb. 4.41). Wie bei dem in RAMSIS verwirklichten System werden dabei ausgehend von der bei einer bestimmten Haltung aufzubringenden Kraft mittels inverser Kinematik die an den Gelenken aufzubringenden Momente berechnet und mit den maximalen Momenten verglichen. Diese maximalen Momente basieren dabei auf an über 2000 Probanden in verschiedenen Studien erhaltenen Werten (Schanne 1972; Clarke 1966; Burgraaff 1972; Chaffin 2001). Im Vergleich zu RAMSIS berücksichtigt 3DSSPP allerdings keine räumlichen M-Kartoffeln, sondern nutzt das System nur für Drehmomentvektoren senkrecht zur Sagittalebene. 3DSSPP ist die Grundlage für das Jack Static Strengh Prediction tool (JSSP) und für den Ford Ergonomic Static Prediction Solver (FSSPS; (Chiang et al. 2006; Kajaks et al. 2011).

Skalierungsverfahren

Die bisher besprochenen Verfahren gehen davon aus, dass man detaillierte Kraftmessungen an einer großen Zahl von Probanden vornimmt, um so Kenntnisse über die Verteilung der Kräfte zu erhalten. Der Versuchsaufwand dafür ist immens, was unter anderem zur Folge hat, dass die Versuche auf verschiedene Institutionen verteilt sind und teilweise untereinander nur schwer in

Kongruenz zu bringen sind. Eine grundsätzlich andere Vorgehensweise geht von der Tatsache aus, dass eine hohe Korrelation zwischen dem Muskelquerschnitt und der Muskelkraft existiert. Aus der Kenntnis der Körperteilvolumina, welche über die Menschmodelle verfügbar sind, ist folglich auf die jeweilige Muskelkraft zu skalieren. Dieses Verfahren wird bei den biomechanischen orientierten Menschmodell AnyBody angewendet, welches zudem über eine detaillierte Modellierung von einzelnen Muskeln verfügt (siehe auch ► Abschn. 5.2.2.3).

An der *University of Maastricht* wurde in Kooperation mit dem *Research Department of Ford* (Aachen) ein Ansatz entwickelt, der eine Skalierung der Muskelkräfte im Arm und im Oberschenkel in Abhängigkeit von Alter, Geschlecht und Fettanteil vorsieht. Verschiedene Skalierungsansätze wurden dabei erprobt, Masse allein, Masse und Fettanteil, multiple Regression und die sog. Kumulative Approximation (eine Variante der Anwendung eines künstlichen neuronalen Netzes). Letztere erbrachte neben der multiplen Regression die höchste erklärte Varianz.

D'Souza (2014) stellt fest, dass die originalen Skalierungsalgorithmen in Anybody den Einfluss von Alter und Geschlecht sowie die Adressierung unterschiedlicher funktionaler Muskelgruppen vermissen lassen. Sie befasst sich speziell mit diesem Aspekt. Sie beschränkt sich – auch wegen der besseren Vermessbarkeit der Muskelvolumina auf die Modellierung der Ellenbogen- und der Kniemuskulatur. Die Versuche wurden mit den Altersgruppen 50–59, 60–69 und 70–79 mit jeweils 100 Probanden (zu gleichen Teilen männlich und weiblich) in jeder Gruppe durchgeführt. Für die Länge und die Masse zeigte sich sowohl bezüglich Oberarm wie Unterschenkel ein signifikanter Unterschied zwischen Männern und Frauen, wobei die höchste Altersgruppe in beiden Fällen geringere Werte zeigte. Die maximalen Momente am Ellenbogengelenk wie am Kniegelenk nehmen mit zunehmendem Alter ab, wobei die Abnahme bei Männern stärker ist als bei den Frauen. Allerdings gibt es bezüglich dieser Werte erhebliche individuelle Streuungen. Eine Faktorenanalyse weist sowohl für die Kräfte im Ellenbogen- wie im Kniegelenk als Haupteinflussfaktoren das Geschlecht und die Körperelementlänge (50 %) aus, danach folgen die Körpermasse (16 %) und das Alter (12 %). Mittels multipler Regression wurden Gleichungen entwickelt, die eine Vorhersage von Ellenbogenmoment bzw. Kniegelenkmoment ermöglichen. Die Anwendung der gefundenen Zusammenhänge in der Anybodymodellierung bringt eine Verbesserung der Vorhersage der Momente um ca. 20 % gegenüber dem bisher implementierten Verfahren. Für Extreme (sehr niedrige Momente, geringe Masse) sind dabei die Vorhersagewerte deutlich schlechter. In Übereinstimmung mit den sonst in der Literatur geschilderten Ergebnissen zeigen Frauen nur ca. 50 % der entsprechenden Kräfte der Männer. Die Abnahme der Kräfte über das Alter ist bei diesen jedoch stärker als bei den Frauen. Die Kniekräfte sind davon stärker betroffen als die Ellenbogenkräfte. Auch die Vorhersage der Kräfte mit den Haupteinflussfaktoren Geschlecht, Körpermasse und Alter steht in sehr guter Übereinstimmung mit Literaturdaten. Kritisch wird der Einfluss der Körpermasse diskutiert, weil aus verschiedenen Gründen in der vorliegenden Untersuchung von einem festen Dichtewert ausgegangen wird, ohne Rücksicht darauf, dass Fett eine geringere Dichte als Muskulatur hat. Auch die Annahme der Linearität bei der multiplen Regression wird kritisch diskutiert, aber für den avisierten Altersbereich von 50–80 Jahren als akzeptabel angenommen.[25]

4.2.4 Beweglichkeit

Heiner Bubb, Fabian Günzkofer

4.2.4.1 Messung von Bewegungsräumen

Ähnlich wie bei der Kategorisierung von Kräften kann man auch bei der Beweglichkeit zwischen aufgabenspezifischen Bewegungsräumen und gelenkspezifischen Bewegungsräumen unterscheiden. In verschiedenen Normen sind *aufgabenspezifische Bewegungsräume* für unterschiedlichste Aufgaben beschrieben (z. B. Arbeitskonsolen, Bewegungsräume auf Arbeitstischen, Fußfreiräume u.ä). In ◘ Abb. 4.42 wird als Beispiel für den automobilen Bereich die Erreichbarkeitsfläche nach SAE J 287 und die ihr zu Grunde liegende Versuchseinrichtung dargestellt.

25 Bei D'Souza findet sich eine ausführliche Übersicht über in der Literatur geschilderte Kraftmessungen und die verschiedenen Modellierungsansätze.

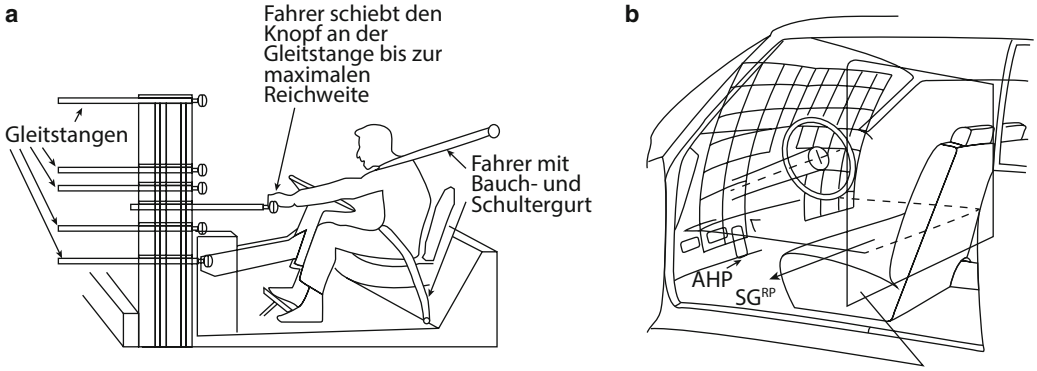


Abb. 4.42 Versuchsaufbau für die Messungen der maximalen Hand Reichweite (**a**) und Erreichbarkeitsflächen (**b**) nach SAE J 287 (zitiert aus Bhise 2012)

Bei den gelenkspezifischen Bewegungsbereichen muss man zwischen aktiven und passiven unterscheiden. Bei den aktiven bringt der Proband durch eigenen Muskeleinsatz das jeweilige Gelenk in die ihm mögliche Extremposition, während bei den passiven meist die jeweilige Extremität in eine Apparatur eingespannt wird und von einer externen Personen das interessierende Gelenk bis zur Schmerzgrenze ausgelenkt wird. Dabei ist „die passive Beweglichkeit in der Regel größer als die aktive" (Dietrich und Lehnertz 1993, p. 215). Es gibt eine große Anzahl von wissenschaftlichen Studien zur Gelenkbeweglichkeit, wobei jedoch unterschiedlichste Fragestellungen Anlass für die Untersuchungen sind, meist nur ausgesuchte Gelenke untersucht werden und somit eine Anwendbarkeit auf den automobilen Bereich teilweise sehr schwierig ist. Eine ausführliche Übersicht über die verschiedenen Literaturstellen zur Gelenkbeweglichkeit findet sich in Amereller (2014).

4.2.4.2 Passive gelenkspezifische Bewegungsräume

Relativ vollständige Studien zur passiven Beweglichkeit wurden von Damon et al. (1966); Ahlberg et al. (1988); Beissner et al. (2000) und Soucie et al. (2011) vorgelegt, wobei die Angaben von Damon auch in perzentilierter Form vorliegen (siehe ◘ Abb. 4.43 und ◘ Abb. 4.44).

4.2.4.3 Aktive gelenkspezifische Bewegungsräume

Von den Studien zur aktiven Beweglichkeit sei hier speziell die Publikation von Kapandji (1985) erwähnt. Um einigermaßen realistische Angaben über die Beweglichkeit zu vermitteln werden im Folgenden Bereiche maximaler Gelenkwinkel angegeben, welche einschlägigen Studien entnommen wurden (Boone und Azen 1979; Youm et al. 1979; Ahlberg et al. 1988; Roach und Miles 1991; Stubbs et al. 1993; Department of Defense 1997; Schwegler 1998; Zatsiorsky 1998; Escalante et al. 1999; Tittel 2003; Doriot und Wang 2006; Hu et al. 2006; Kunsch und Kunsch 2006; Chung und Wang 2009; Kapandji 2009; Tillmann 2010).

Ellbogen

◘ Abbildung 4.45 zeigt die typischen Bewegungsräume für die definierten Freiheitsgrade des Ellbogens.

Schulter

Die typischen Bewegungsräume für das Schultergelenk sind in ◘ Abb. 4.46 zusammengestellt. Die Visualisierung der Bewegungsrichtungen Flexion und Extension ist bereits in ◘ Abb. 4.45 mitaufgeführt.

Hüfte

◘ Abbildung 4.47 zeigt die typischen Bewegungsräume für das Hüftgelenk.

Im Gegensatz zu den bisher aufgeführten Freiheitsgraden ist ersichtlich, dass die Hüftflexion mit zusätzlicher Information zur Knieflexion angegeben ist. Dies hängt mit der Existenz biartikularer Muskulatur zusammen, welche in ▶ Abschn. 4.1.2.1 dargelegt wurde. Die zur Hüftflexion antagonistische, biartikulare Muskulatur auf der Oberschenkelrück-

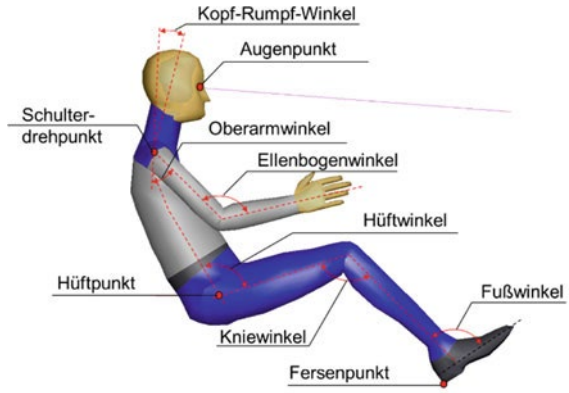


Abb. 4.43 Passive Gelenkwinkelbereiche nach Damon et al. (1966; zusammengestellt von Rühmann 2000)

Winkel	Perzentil			physiologisch günstiger Bereich
	5.	50.	95.	
Kopf-Rumpf-Winkel	52° bis -60°	67° bis -77°	82° bis -93°	Stehen 15° Sitzen 25°
Handgelenk-Winkel	35° bis -12°	47° bis -27°	59° bis -42°	0°
Ellenbogen-Winkel	54° bis 180°	38° bis 180°	22° bis 180°	115°
Oberarm-Winkel	38° bis -168°	61° bis -188°	84° bis -208°	28°
Oberer Rumpf-Winkel	bequeme Stellung 9° ⇒ entspricht gebeugter Sitzhaltung			
Unterer Rumpf-Winkel	bequeme Stellung 17° ⇒ entspricht gebeugter Sitzhaltung			
Hüftwinkel	88° bis 180°	67° bis 180°	46° bis 180°	100°
Kniewinkel	88° bis 180°	67° bis 180°	46° bis 180°	110° bis 140°
Fußwinkel	67° bis 108°	55° bis 128°	43° bis 148°	90° ± 10°

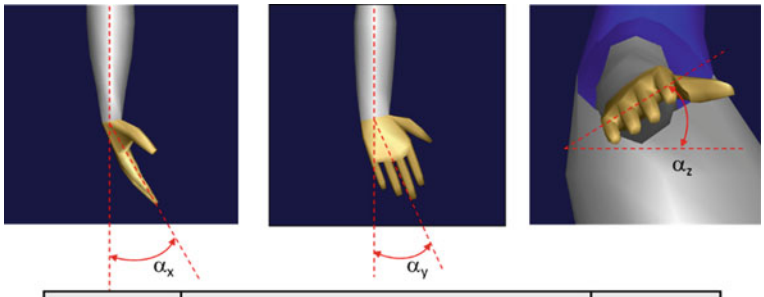
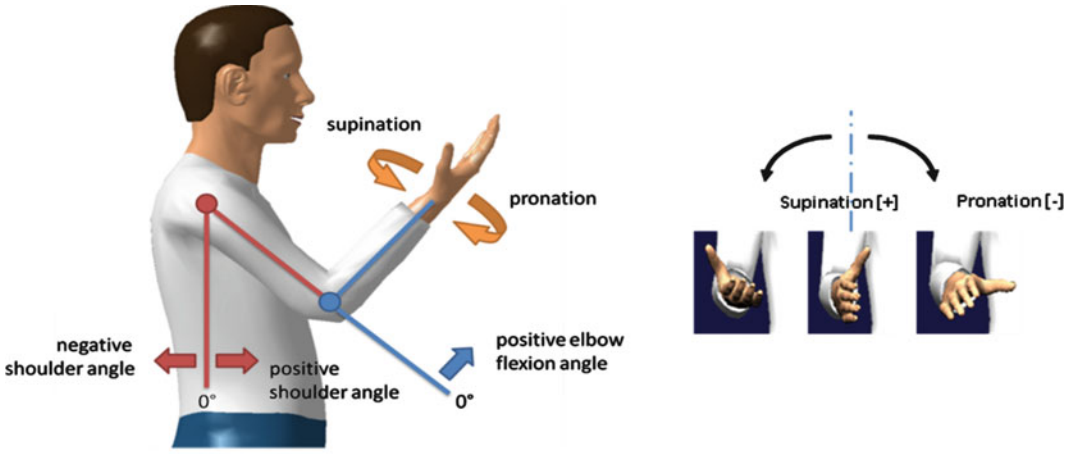


Abb. 4.44 Passive Gelenkwinkelbereiche des Handgelenks nach Damon (1966; zusammengestellt von Rühmann 2000)

Winkel	Perzentil			physiologisch günstiger Bereich
	5.	50.	95.	
α_x	78° bis -70°	99° bis -90°	120° bis -110°	0°
α_y	35° bis -12°	47° bis -27°	59° bis -42°	0°
α_z	77° bis -38°	113° bis -77°	149° bis -116°	0° 30° bei gelockertem Unterarm



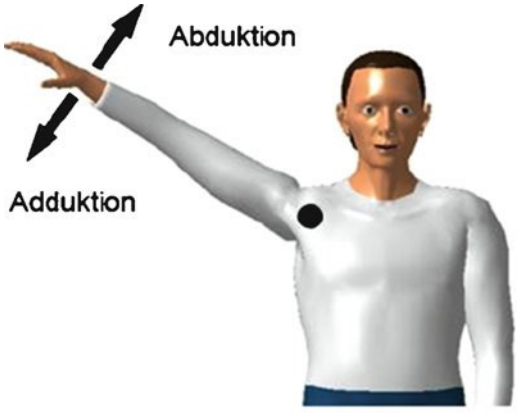
Ellbogenbeugung (Flexion)	140°-150°
Ellbogenstreckung (Extension)	Maximal -10°
Supination	80°-107°
Pronation	70°-105°

Abb. 4.45 Bewegungsrichtungen und Bewegungsbereiche des Ellbogens (Günzkofer 2013)

seite verändert ihre Länge und somit ihren Spannungszustand in Abhängigkeit von Hüft- und Knieflexion. Aus diesem Grund muss für die Hüftflexion bei ausgestrecktem Bein eine wesentlich höhere Gegenkraft der Antagonisten überwunden werden. Die Tabelle in Abb. 4.47 enthält somit zwei unterschiedliche Angaben für maximale Hüftflexion. Engstler et al. (2011) haben hierzu im Rahmen einer experimentellen Studie einen formelmäßigen Zusammenhang zwischen maximaler Hüftflexion und vorherrschender Knieflexion entwickelt. Es zeigt sich, dass im Mittel nur noch 60 % der maximal möglichen Hüftflexion unter vollkommener Beinstreckung möglich ist (siehe Abb. 4.48).

4.2.4.4 Geschlechts- und Altersabhängigkeit der Beweglichkeit

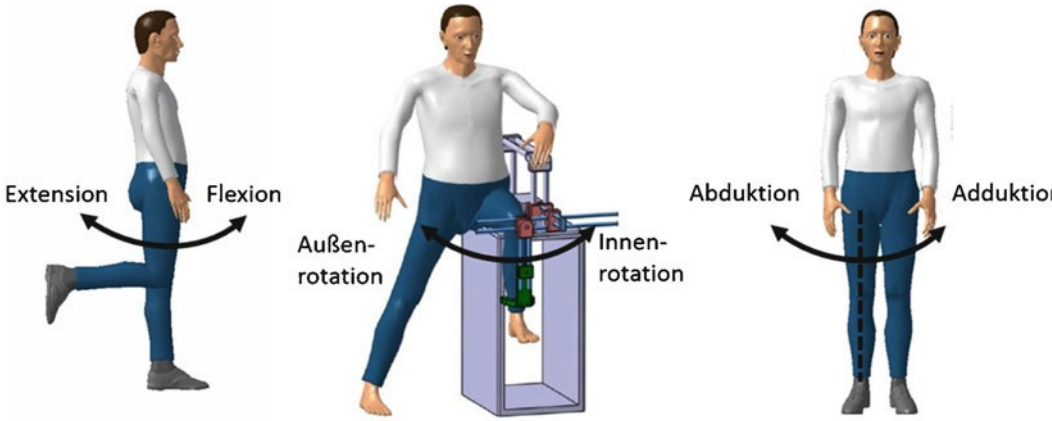
Autokauf und Autonutzung geschieht heute zu gleichen Teilen von Männern und Frauen. Im Hinblick auf die Entwicklung der Alterspyramide ist es zudem offensichtlich, dass der durchschnittliche Autokäufer älter wird. Das Durchschnittsalter heutiger Neuwagenkäufer liegt bei 50,6 Jahren, wobei 29 % älter sind als 60 Jahre (Duttenhöffer 2008). In der Entwicklung der Fahrzeuge ist dem



Adduktion	20°-50°
Abduktion	125°-180°
Extension	40°-70°
Flexion	150°-190°

Abb. 4.46 Darstellung der Bewegungsrichtungen der Schulter (Hartmann 2012)

folglich Rechnung zu tragen. Ein besonderer Aspekt ist dabei die Berücksichtigung der altersbedingten Veränderungen der Beweglichkeit. Amereller (2014) hat sich mit dieser Problematik in ausgedehnten Versuchen auseinandergesetzt.



Adduktion	20° - 30°
Abduktion	45° - 53°
Extension	18°- 43°
Flexion (gestrecktes Bein)	66° - 90°
Flexion (angewinkeltes Bein)	110° - 130°
Innenrotation	40° - 50°
Außenrotation	30°- 45°

Abb. 4.47 Darstellung der Bewegungsrichtungen der Hüfte; mittleres Bild aus Amereller (2014)

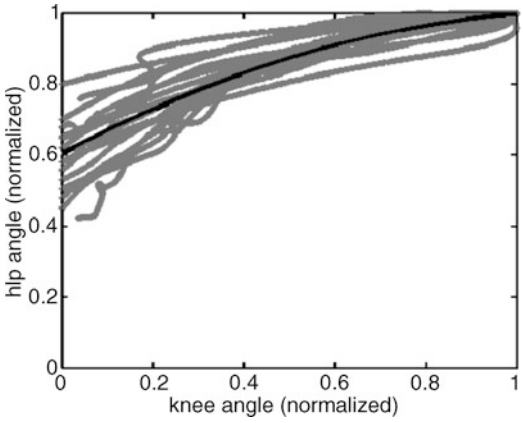


Abb. 4.48 Quantitative Abhängigkeit zwischen maximaler Hüftflexion in Abhängigkeit der Knieflexion. Untersuchung von 18 männlichen und weiblichen Probanden zweier Altersgruppen (20–35 Jahre; > 65 Jahre)

346 Versuchspersonen im Alter zwischen 18 und 85 Jahren wurden in Kooperation mit BMW und dem Fachgebiet Biomechanik im Sport an der TU München mithilfe speziell entwickelter Geräte vermessen, wobei für jede Altersstufe 30 Personen vorgesehen waren. Beispielhaft wird die Rotation der Halswirbelsäule, die Beweglichkeit der Schulter in Flexionsrichtung, die Beweglichkeit der Hüftabduktion und die Beweglichkeit der Fußpronation dargestellt (Abb. 4.49–4.52). In allen Fällen zeigt sich eine Abnahme der Beweglichkeit über das Alter und ein Unterschied zwischen Männer und Frauen (Frauen sind meist beweglicher). Allerdings ist diese Altersabhängigkeit sehr stark gelenksabhängig. Die Fußpronation zeigt z. B. fast keine Abhängigkeit vom Alter. Die in den Bildern dargestellte Standardabweichung weist zudem darauf hin, dass Personen mit hoher Beweglichkeit selbst in der höchsten Altersstufe noch vergleichbar sind mit jungen Personen (18–25 Jahre), die aber eine geringe Beweglichkeit aufweisen. Unter anderen ist dies auch ein Hinweis für die bekannte Forderung nach dem „design for all", in der eine alters- oder auch geschlechts-

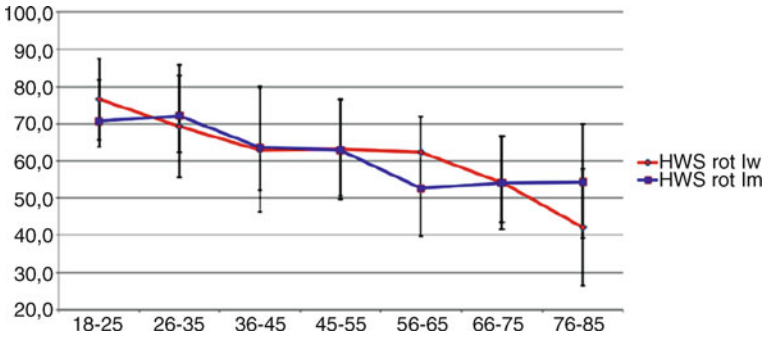


Abb. 4.49 Halswirbelrotation nach links in Abhängigkeit vom Alter und Geschlecht (Amereller 2014)

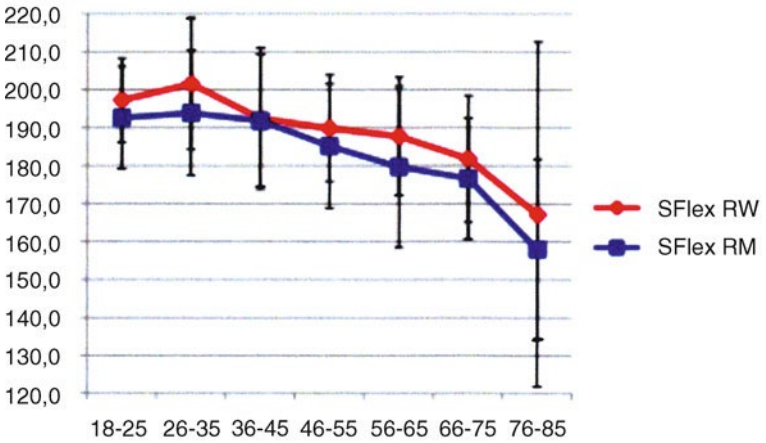


Abb. 4.50 Schulterflexion nach rechts in Abhängigkeit vom Alter und Geschlecht (Amereller 2014)

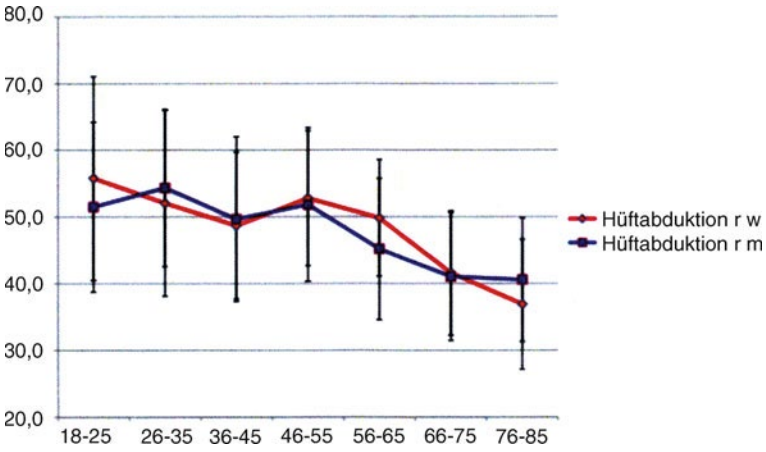


Abb. 4.51 Hüftabduktion nach rechts in Abhängigkeit vom Alter und Geschlecht (Amereller 2014)

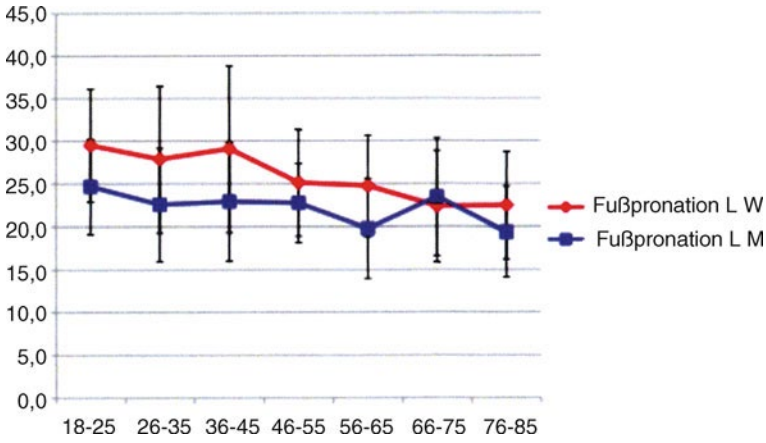


Abb. 4.52 Fußpronation nach links in Abhängigkeit vom Alter und Geschlecht (Amereller 2014)

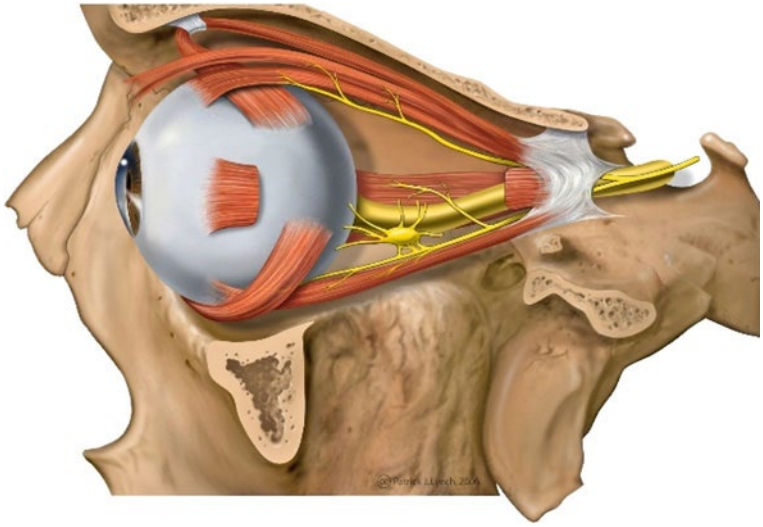


Abb. 4.53 Darstellung des Auges und der umliegenden äußeren Augenmuskeln (By Lateral_orbit_nerves.jpg: Patrick J. Lynch, medical illustrator derivative work: Anka Friedrich (Lateral_orbit_nerves.jpg) [CC-BY-2.5 (▶ http://creativecommons.org/licenses/by/2.5)], via Wikimedia Commons)

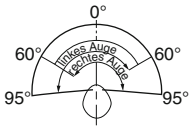
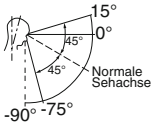
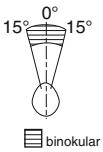
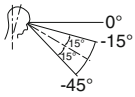
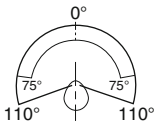
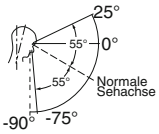
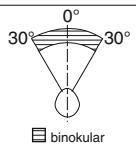
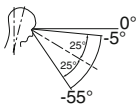
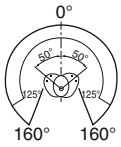
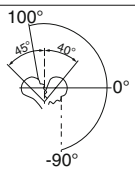
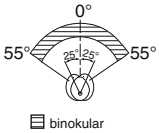
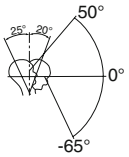
abhängige Auslegung von Fahrzeugen abgelehnt wird, wobei man sich aber in allen Fragestellungen am „Schwächsten" zu orientieren hat (siehe auch ▶ Abschn. 7.8.1).

4.2.4.5 Biomechanik von Sehbewegungen

Für die Konzeption der direkten und indirekten Sicht aus einem Fahrzeug (siehe ▶ Abschn. 7.3) ist die Beweglichkeit des Auges in Verbindung mit der Halswirbelsäulenrotation und der Schulterflexion von ausschlaggebender Bedeutung. Die Gültigkeit der biomechanischen Erkenntnisse ist nicht nur auf große Muskeln der primären Gelenke des Menschen beschränkt, sondern gilt auch für kleinere Muskeln wie die sechs äußeren Augenmuskeln (Abb. 4.53).

Mit Zunahme der Entfernung von der idealen Muskellänge – in diesem Fall der Neutralstellung der Augen – nimmt der Diskomfort zu. Neutralstellung bedeutet nach Schmidtke (1993), dass der Kopf um 10–15° sowie die Augen um 15–20° nach unten geneigt sind. Bei einer aufrecht stehenden oder sitzenden Person ist der Sichtstrahl somit um 25–35° nach unten geneigt. Bei fixiertem Kopf und fixierten Augen (Gesichtsfeld) können Objekte nur wenige Grad um den Fixationspunkt herum scharf wahrgenommen werden. Folglich müssen für außerhalb dieses Bereichs liegende Betrachtungsgegenstände

Tab. 4.11 Definition von Sehbereichen nach Schmidtke (1993) und Hudelmaier (2003)

	Auge	Kopf	Torso	Maximaler Bereich		Optimaler Bereich für helle Lichtreize	
				horizontal	vertikal	horizontal	vertikal
Gesichtsfeld	fix	fix	fix				
Blickfeld	fix	fix	fix				
Umblick-gesichtsfeld	fix	fix	fix				

mit zunehmender Entfernung zuerst die Augen (Blickfeld), dann der ganze Kopf (Umblickgesichtsfeld) und schließlich der gesamte Torso (Fixationsfeld) bewegt werden. Eine Übersicht über die Sehbereiche bietet Tab. 4.11.

Ab welchen Winkeln der Übergang von einem Sehbereich zum folgenden mit erhöhtem Körpereinsatz eintritt, kann auch von der Dauer der Fixation abhängen. Falls in einem Kraftfahrzeug nur ein kurzer Blickwechsel erforderlich ist, werden innerhalb des maximalen Bewegungsraumes ausschließlich Augenbewegungen erfolgen. Um eine statische Augenhaltung im Grenzbereich zu vermeiden, wird aber ab einer gewissen Zeitdauer einer Blickzuwendung die weitere kinematische Kette mitbewegt. Nach Schmidt (1988) folgen demnach Kopfdrehungen ab ca. 10° Abweichung vom neutralen Sichtstrahl. Praktisch bedeutet dies, dass beispielsweise das kurze Ablesen der Geschwindigkeit vom Tachometer nur durch Augenbewegungen, die Einstellung eines Fahrtziels im Navigationsgerät mit mindestens überlagerter Kopfbewegung einhergehen wird.

Diese Zusammenhänge sind bei der Fahrzeugauslegung zu berücksichtigen. Bedingt durch die unterschiedliche Geschwindigkeit von Augen- und Kopfbewegungen entstehen somit unterschiedliche Zeitbedarfe, je nach Entfernung des zu betrachtenden Objektes vom neutralen Sehstrahl. Diese Erkenntnisse sind in Form von Isochronen (Linien gleicher Zeitbedarfe) im Modul „RAMSIS kognitiv“ bei dem digitalen Menschmodell RAMSIS berücksichtigt.

4.2.4.6 Anwendung

Eine Anwendung maximaler Bewegungsräume für die Fahrzeugauslegung basierend auf Tabellenwerten entspricht nicht mehr dem Stand der Technik. Ähnlich wie bei Körpermaßen und Körperkräften besteht eine sinnvolle Anwendung in der Integration in digitalen Menschmodellen. Bei Bewegungsanalysen wie zum Beispiel Ein-/Ausstieg und Haltungsanalysen (Greifschalen, Schulterblick etc.) werden die hier dargelegten Kenntnisse implizit berücksichtigt. Eine besondere Form der Auswertbarkeit besteht in der Korrelation der prozentualen Ausnutzung der maximalen Bewegungsräume und dem Diskomfortempfinden. Ein zukünftiges Potential für digitale Menschmodelle liegt in der Berücksichtigung biartikularer und altersbedingter Effekte (Engstler et al. 2011; Amereller 2014).

Literatur

Verwendete Literatur

Abdel-Malek, K., Yang, J., Marler, T., Beck, S., Mathai, A., Zhou, X.: Towards a new generation of virtual humans. International Journal of Human Factors Modelling and Simulation **1**(1), 2–39 (2006). http://inderscience.metapress.com/content/ETB04X9U9C863V45

Adams, M.A.: Wie beeinflusst die Sitzposition die Lastverteilung in der Bandscheibe und ihre Ernährung. In: Ergomechanics Interdisziplinärer Kongress Wirbelsäulenforschung. S. 2–2. Shaker Verlag, Aachen (2006)

Ahlberg, A., Moussa, M., & Al-Nahdi, M. : On Geographical Variations in the Normal Range of Joint Motion. Clinical Orthopaedics and Related Research (234), 229-231 (1988)

Amereller, M. (2014): Die Gelenkbeweglichkeit des Menschen im Altersgang als Fokus wissenschaftlicher Forschung im automobilen Kontext. Entwicklung, Absicherung und Anwendung einer neuen Messmethode. Dissertation, Technische Universität München

Bassey, E.J., Short, A.H.: A new method for measuring power output in a single leg extension – feasibility, reliability and validity. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology **60**(5), 385–390 (1990)

Beissner, K.L., Collins, J.E., Holmes, H.: Muscle force and range of motion predictors of function in older adults. Physical Therapy **80**(6), 556–563 (2000)

Bernstein, N.A.: The co-ordination and regulation of movements. Pergamon Press, Washington D.C. (1967). http://books.google.de/books?id=F9dqAAAAMAAJ

Bhise, V.D.: Ergonomics in the automotive design process. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York (2012)

Bishop, P., Cureton, K., Collins, M.: Sex difference in muscular strength in equally-trained men and women. Ergonomics **30**(4), 675–687 (1987)

Boone, D. C., Azen, S. P.: Normal Range of Motion of joints in male subjects. The Journal of Bone and Joint Surgery, 61, pp. 756-759 (1979)

Boyd, W.C.: Genetics and the races of man: An introduction to modern physical anthropology (1950)

Brown, L.E., Weir, J.P.: ASEP Procedures recommendation 1: Accurate Assessment of muscular strength and power. Journal of Exercise Physiology (online) **4**(3), (2001)

Burandt, U., Schultetus, W.: Ermittlung zulässiger Grenzwerte für Kräfte und Drehmomente (1978). Siemens firmeninterne Schulungsunterlagen zur Arbeitsgestaltung

Burgraaff, J. D.: An Isometric Biomechanical Model for Sagittal Plane Leg Extension: Unpublished MS thesis (1972)

Campbell, N.A., Reece, J.B.: Biology, 7. Aufl. Pearson, Benjamin Cummings, San Francisco (2005)

Chaffin, D.B.: Digital human modeling for vehicle and workplace design. Society of Automotive Engineers, Warrendale Pa. (2001)

Chaffin, D.B., Gunnar, B.J., Andersson, Martin, B.J.: Occupational Biomechanics, 3. Aufl. Wiley-Blackwell, New York (1999)

Chiang, J., Stephens, A., Potvin, J.: Retooling Jack's Static Strength Prediction Tool. SAE International, Warrendale, PA (2006)

Chung, M.-J., Wang, M.-J. J.: The effect of age and gender on joint range of motion of worker population in Taiwan. International Journal of Industrial Ergonomics , 39, 596-600 (2009)

Churchill, E., Tebbetts, I.E., McConville, J.T., Laubach, L.L.: anthropometry for designers Anthropometric source book. (1978)

Clarke, H.H.: Muscular Strength and Endurance in Men. Prentice Hall, Englewood Cliffs (1966)

Crowninshield, R. D.: Use of optimization techniques to predict muscle forces: J. of Biomechanical Engineering, *100*, 88-92. Retrieved from http://ci.nii.ac.jp/naid/80014980426/en/ (1978)

D'Souza, S. F.: Physical efficiency as a function of age: Development of an age scaling model for biomechanical simulation. Dissertation Technischen Universität München (2014)

D'Souza, S.F., Brueckner, B., Rasmussen, J., Schwirtz, A.: Development of age and gender based strength scaled equations for use in simulation models First International Symposium on Digital Human Modeling, Lyon, France (2011)

Daams, B.J.: Human force exertion in user-product interaction. backgrounds for design. Series in physical ergonomics Bd. 2. Fac. of Industrial Design Engineering, Delft Univ. of Technology, Delft (1994)

Damon, A., Stoudt, H., McFarland, R.: The human body in equipment design. Harvard University Press, Cambridge (1966)

Damsgaard, M., Rasmussen, J., Christensen, S.T., Surma, E., de Zee, M.: Analysis of musculoskeletal systems in the AnyBody Modeling System. Simulation Modelling Practice and Theory **14**(8), 1100–1111 (2006). doi:10.1016/j.simpat.2006.09.001

Department of Defense: Military Handbook 759 C Notice 1 (1997)

Dietrich, M.C., Lehnertz, K.: Handbuch Trainingslehre, 2. Aufl. Hoffmann, Schondorf (1993)

Dolan, P.: Welchen Einfluss hat die Sitzhaltung auf die Muskelaktivität? In: Ergomechanics 2 – 2. Interdisziplinärer Kongress Wirbelsäulenforschung. Shaker Verlag, Aachen (2006)

Doriot, N., Wang, X.: Effects of age and gender on maximum voluntary range of motion of the upper body joints. Ergonomics **49**(3), 269–281 (2006)

Duchateau, J., Klass, M., Baudry, S.: Évolution et adaptations à l'entraînement du système neuromusculaire au cours du vieillissement. Santé, sport et innovations – Bruxelles 27-28 mai 2005 – Séminaire organisé par le CNAPS avec le concours de l'Université libre de Bruxelles. In: Science & Sports, Jg. 21, H. 4, S. 199–203 (2006)

Dul, J., Townsend, M.A., Shiavi, R., Johnson, G.E.: Muscular synergism – I. On criteria for load sharing between synergistic muscles. Journal of biomechanics **17**(9), 663–673 (1984)

Duttenhöffer, F.: Demographische Entwicklung und schrumpfender Automarkt. Jahrbuch der Absatz und Verbrauchsforschung **54**(1), 81–90 (2008)

Engstler, F.: Perzentilierung maximaler Gelenkmomente des Menschen. Dissertation, Technische Universität München (2012)

Engstler, F., Günzkofer, F., Bubb, H., Bengler, K.: Lower Limb Joint Range of Motion Considering Inter-joint Dependencies. Lyon, Lyon, S. ID2163 (2011). DHM 2011

Escalante, A., Lichtenstein, M.J., Hazuda, H.P.: Determinants of Shoulder and Elbow Flexion range: Results from the San Antonio Longitudinal Study of Aging. Arthrtitis Care and research **12**(4), 277–286 (1999)

Faller, A.: Der Körper des Menschen: Einführung in Bau und Funktion, 13. Aufl. Georg Thieme Verlag, Stuttgart (1999)

Frontera, W.R., Hughes, V.A., Lutz, K.J., Evans, W.J.: A Cross-sectional Study of Muscle Strength and Mass in 45-Year-old to 78-yr-old Men and Women. Journal of Applied Physiology **71**(2), 644–650 (1991)

Geuß, H.: Entwicklung eines anthropometrischen Meßverfahrens für das CAD-Menschmodell RAMSIS. Dissertation, Technische Universität München (1994)

Goodpaster, B.H., Carlson, C.L., Visser, M., de Kelley, Scherzinger, A., Harris, T.B., et al.: Attenuation of skeletal muscle and strength in the elderly: The Health ABC Study. Journal of Applied Physiology **90**(6), 2157–2165 (2001)

Greil, H.: Der Körperbau von Männern und Frauen aus der Deutschen Demokratischen Republik: Konstitutionsbiologische Ergebnisse einer 1967 für die Bekleidungsindustrie durchgeführten Querschnittuntersuchung, Dissertation, Humboldt-Universität Berlin (1972)

Grimm, H.: Grundriss der Konstitutionsbiologie und Anthropologie, 3. Aufl. VEB Verlag Volk und Gesundheit, Berlin (1966)

Günzkofer, F., Bubb, H., Bengler, K.: Maximum elbow joint torques for digital human models. Int. J. Human Factors Modelling and Simulation **3**(2), 109–132 (2012)

Günzkofer, F., Bubb, H., Bengler, K.: Elbow Torque Ellipses: Investigation of the mutual influences of rotation, flexion, and extension torques. Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation **41**(Supplement 1), 2260–2267 (2012)

Günzkofer, F., Bubb, H., Senner, V., Bengler, K.: Dependency of knee extension torque on different types of stabilisation. Int. J. Human Factors Modelling and Simulation **3**(1), 1–15 (2012)

Günzkofer, F., Engstler, F., Bubb, H., Bengler, K.: Joint Torque Modeling of Knee Extension and Flexion. In: Proceedings of the 14th International Conference on Human-Computer Interaction Orlando, Florida, USA. (2011)

Günzkofer, F.: Elbow Strength Modelling for Digital Human Models. Dissertation, Technische Universität München (2013)

Hafez, H.A., Gidcumb, C.F., Reeder, M.J., Beshir, M.Y., Ayoub, M.M.: Development of a human atlas of strengths. In: Proceedings of the Human Factors Society 26th Annual Meeting Santa Monica, CA. S. 575–579. The Human Factors Society, Kongress-Proceedings (1982)

Hahn, D.: Biomechanische Analyse der Kraft-Längen- und Kraft-Geschwindigkeits-Relation bei der mehrgelenkigen Beinstreckung in vivo zur Beurteilung der muskulären Funktion, 1. Aufl. Sierke, Göttingen (2008)

Hartmann, F.: Versuchsplanung und Auswertung isometrischer Maximalkraftmessungen des Schultergelenks: Studienarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München (2012)

Herzog, W.: Determinants of muscle strength. In: MUSCLE STRENGTH, S. 45–82 (2004)

Hettinger, T.: Isometrisches Muskeltraining. Georg Thieme Verlag, Stuttgart (1968)

Hill, A.V.: The Heat of Shortening and the Dynamic Constants of Muscle. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences **126**(843), 136–195 (1938). doi:10.1098/rspb.1938.0050

Holzbaur, Delp, Gold & Murray (2007) → Günzkofer

Hosler, W.W., Morrow, J.R.: Arm and leg strength compared between young women and men after following for differences in body size and composition. Ergonomics **25**(4), 309–313 (1982)

Hu, H., Li, Z., Yan, J., Wang, X., Xiao, H., Duan, J., et al.: Measurement of voluntary joint range of motion of Chinese elderly living in Beijing area by a photographic method. International Journal of Industrial Ergonomics, **36**, 861–867 (2006)

Hudelmaier, J.: Sichtanalyse im Pkw unter Berücksichtigung von Bewegungen und individuellen Körpercharakteristika. Dissertationsschrift an der Technischen Universität München (2003)

Hurley, B.F.: Age, gender, and muscular strength. The journals of gerontology **50**, 41–44 (1995)

Jongen, H.A., van der Denier Gon, J.J., Gielen, C.C.: Activation of human arm muscles during flexion/extension and supination/pronation tasks: a theory on muscle coordination. Biological cybernetics **61**(1), 1–9 (1989)

Jürgens, H.W., Habicht-Benthin, B., Lengsfeld, W.: Körpermaße 20jähriger Männer als Grundlage für die Gestaltung von Arbeitsgerät, Ausrüstung und Arbeitsplatz. Bundesministerium für Verteidigung, Bonn (1971)

Kaiser, R.: Anthropometrie – Neue Erkenntnisse und Anwendungsbeispiele RAMSIS User Conference, Kaiserslautern. (2011)

Kajaks, T., Stephens, A., Potvin, J.R.: The effect of manikin anthropometrics and posturing guidelines on proactive ergonomic assessments using digital human models. International Journal of Human Factors Modelling and Simulation **2**(3), 236 (2011). doi:10.1504/IJHFMS. 2011.044512

Kapandji, I.A.: Funktionelle Anatomie der Gelenke. In: Otte P, Schlegel KF. (Hrsg.) Bücherei der Orthopäden, Bd. 47. Untere Extremität. Enke, Stuttgart (1985)

Kapandji, I.A.: Funktionelle Anatomie der Gelenke. Obere Extremität – Untere Extremität – Rumpf und Wirbelsäule: Schematisierte und kommentierte Zeichnungen zur menschlichen Biomechanik, 5. Aufl. Thieme, Stuttgart (2009)

Knudson, D.: Fundamentals of biomechanics, 2. Aufl. Springer, New York, NY (2007). http://www.gbv.de/dms/hbz/toc/ht014955463.pdf

Kroemer, K.H.E.: Die Messung der Muskelstärke des Menschen: Methoden und Techniken Forschungsbericht/Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung, Bd. 161. Wirtschaftsverl. NW, Bremerhaven (1977)

Kulig, K., Andrews, J.G., Hay, J.G.: Human strength curves. In: Terjung, R.L. (Hrsg.) Exercise and Sport Science Reviews, S. 417–466. The Collamore Press, Lexington, Massachusetts (1984). 12

Kumar, S.: Muscle strength. CRC Press, Boca Raton (2004)

Kunsch, K., Kunsch, S.: Der Mensch in Zahlen. Spektrum Akademischer Verlag (2006)

Lee, K., Bruckner, A.: Human Lifting strength in different postures. Journal of Safety Research **22**(1), 11–19 (1991)

MacKinnon, S.N.: Isometric pull forces in the sagittal plane. Applied ergonomics **29**(5), 319–324 (1998)

Martin, R.: Lehrbuch der Anthropologie, 3. Aufl v. Karl Saller, Fischer, Stuttgart 1956-1958 (1914)

Mital, A., Kumar, S.: Human muscle strength definitions, measurement, and usage: Part I - Guidelines for the practitioner. International Journal of Industrial Ergonomics **22**(1-2), 101–121 (1998)

Morgan, C.T., Cook, J.S., Chapanis, A., Lund, M.W. (Hrsg.): Human Engineering Guide to Equipment Design. McGraw-Hill, New York (1963)

Pope, M.H.: Wasser in der Bandscheibe: Neuer Messansatz mittels Kernspintomographie. In: Ergomechanics 2 – 2. Interdisziplinärer Kongress Wirbelsäulenforschung. Shaker Verlag, Aachen (2006)

Rasmussen, J., Damsgaard, M., Christensen, S., Surma, E.: Design optimization with respect to ergonomic properties. Structural and Multidisciplinary Optimization **24**(2), 89–97 (2002). doi:10.1007/s00158-002-0219-x

Rasmussen, J., Damsgaard, M., Voigt, M.: Muscle recruitment by the min/max criterion – a comparative numerical study. Journal of Biomechanics **34**(3), 409–415 (2001). doi:10.1016/S0021-9290(00)00191-3

Remlinger: Analyse von Sichteinschränkungen im Fahrzeug. Dissertation Technischen Universität München (2013)

Roach, K.E., Miles, T.P.: Normal Hip and Knee Active Range of Motion: The Relationship to Age. Physical Therapy **71**(9), 656–665 (1991)

Rohmert, W., Berg, K., Bruder, R., Schaub, K.: Kräfteatlas Teil 1: Datenauswertung statischer Aktionskräfte, Teil 2: Literaturzusammenstellung Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsmedizin. Forschung Fb 09.004. Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Wirtschaftsverlag, Bremen (1994)

Rohmert, W., Hettinger, T.: Körperkräfte im Bewegungsraum. Beuth Vertrieb GmbH, Berlin (1963)

Rühmann, H.: Körperkräfte des Menschen. Dokumentation Arbeitswissenschaft Bd. 31. O. Schmidt, Köln (1992)

Rühmann, H.: Vorlesungsskriptum zu Produktionsergonomie. Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, Vorlesungsskriptum im Internet verfügbar! (2000)

Samuel, D., Rowe, P.J.: Effect of Ageing on Isometric Strength through Joint Range at Knee and Hip Joints in Three Age Groups of Older Adults. Gerontology **55**(6), 621–629 (2009)

Schanne, F.: A Three Dimensional Hand Force Capability Force Model for the Seated Operator: Unpublished doctoral dissertation (1972)

Schaefer, P., Rudolph, H., Schwarz, W.: Digital Man Models and Physical Strength – A New Approach in Strength Simulation Proceedings of the SAE DHMC (Digital Human Modeling Conference). (2000). SAE 2000-01-2168

Schaefer, P., Rudolph, H., Schwarz, W.: Variable Force Limits for Optional Target Populations - a New Approach realized in CEN - Standardization. In: Proceedings of the 13th IEA Conference Tampere. S. 533–535. (1997)

Schantz, P., Randall-Fox, E., Hutchison, W., Tyden, A., Astrand, P.O.: Muscle fibre type distribution, muscle cross-sectional area and maximal voluntary strength in humans. Acta Physiol Scand **117**(2), 219–226 (1983)

Schlick, C., Bruder, H., Luczak, H.: Arbeitswissenschaft. Heidelberg, Dordrecht, London, New York (2010). Kap. 3.2.9

Schmidt, R. A.: Motor control and leaming. A behavioral emphasis, Champaign (1988)

Schmidtke, H.: Ergonomie, 3. Aufl. Carl Hanser Verlag, München (1993)

Schmidtke, H., Rühmann, H.: Kräfte an Drucktastern B-4.3.2. In: Handbuch der Ergonomie (HdE) mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien. Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung (Hrsg.), Koblenz. Karl Hanser Verlag, München, Wien (1989)

Schmidtke, H., Rühmann H.: Kräfte an Fußstellteilen B-4.5.1. In: Handbuch der Ergonomie (HdE) mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien. Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung (Hrsg.), Koblenz. Karl Hanser Verlag, München, Wien (1989)

Schmidtke, H., Rühmann, H.: Kräfte an Stern- und Drehknöpfen B-4.3.6. In: Handbuch der Ergonomie (HdE) mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien. Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung (Hrsg.), Koblenz. Karl Hanser Verlag, München, Wien (1989)

Schmidtke, H., Rühmann, H.: Kräfte an Steuerhebeln B-4.3.1. In: Handbuch der Ergonomie (HdE) mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien. Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung (Hrsg.), Koblenz. Karl Hanser Verlag, München, Wien (1989)

Schmidtke, H., Rühmann, H.: Kräfte an Steuerhörnern B-4.3.3. In: Handbuch der Ergonomie (HdE) mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien. Herausgegeben vom Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz. Karl Hanser Verlag, München, Wien (1989)

Schmidtke, H.: Wissenschaftliche Bearbeitung: Handbuch der Ergonomie (HdE) mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien. Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung (Hrsg.), Koblenz. Karl Hanser Verlag, München, Wien (2013)

Schwarz, W.: 3D-Video-Belastungsanalyse: Ein neuer Ansatz zur Kraft- und Haltungsanalyse Fortschritt-Berichte VDI-Reihe 17, Biotechnik/Medizintechnik, Bd. 166. VDI-Verl., Düsseldorf (1997). Als Ms. gedr.

Schwegler, J.S.: Der Mensch – Anatomie und Physiologie, 2. Aufl. Thieme, Stuttgart (1998)

Seidl, A., Trieb, R., Wirsching, H.-J.: SizeGERMANY - the new German Anthropometric Survey: Conceptual Design, Implementation and Results. In: IEA 17th World Congress on Ergonomics (2009)

Seitz, T., Recluta, D., Zimmermann, D., Wirsching, H.-J.: FOCOPP - An approach for a human posture prediction model using

internal/external forces and discomfort Proceedings of the SAE DHMC (Digital Human Modeling Conference), Bd. SAE 2005-01-2694. (2005)
Sheldon, W.H.: Atlas of men, A guide and handbook of somatotyping. Harper, New York (1954)
Sherwood, L.: Human physiology: From cells to systems, 8. Aufl. Brooks/Cole, Cengage Learning, Belmont, CA (2012)
Smidt, G.L., Rogers, M.W.: Factors contributing to the regulation and clinical assessment of muscular strength. Physical therapy **62**(9), 1283–1290 (1982)
Soucie, J.M., Wang, C., Forsyth, A., Funk, S., Denny, M., Roach, K.E., et al.: Range of Motion measurements: reference values an a database for comparisionstudies. Haemophilia (2011)
Stoll, T., Huber, E., Seifert, B., Michel, B., Stucki, G.: Maximal Isometric Muscle Strength: Normative Values and Gender Specific Relation to Age. Clinical Rheumatology **19**(2), 105–113 (2000)
Stubbs, N. B., Fernandez, J. E., Glenn, W. M.: Normative data on joint ranges of motion of 25- to 54-year-old males. International Journal of Industrial Ergonomics, 12, pp. 265-272 (1993)
The University of Michigan: 3D Static Strength Prediction Program Version 6.0.5: User's Manual (2011). Ann Arbor, MI. Retrieved from http://www.engin.umich.edu/dept/ioe/3DSSPP/download.html
Thompson, L.V.: Effects of age and training on skeletal muscle physiology and performance. Physical Therapy **71**(1), 71–81 (1994)
Tillmann, B.: Atlas der Anatomie des Menschen: [mit Muskeltrainer], 2. Aufl. Springer, Heidelberg (2010)
Tittel, K.: Beschreibende und funktionelle Anatomie des Menschen, 14. Aufl. Urban & Fischer, München (2003)
VanCott, H.P., Kinkade, R.G. (Hrsg.): Human Engineering Guide to Equipment Design. USGPO, Washington (1972)
Wakula, J., Berg, K., Schaub, K., Bruder, R.: Der montagespezifische Kraftatlas BGIA-Report, Bd. 3/2009. BGIA; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, Sankt Augustin, Hannover (2009)
Wilke, H.-J.: Möglichkeiten zur Bestimmung der Wirbelsäulenbelastungen und Konsequenzen für die Empfehlungen für das Sitzen. In: Ergomechanics – Interdisziplinärer Kongress Wirbelsäulenforschung. Shaker Verlag, Aachen (2004)
Winter, D.A.: Biomechanics and motor control of human movement, 3. Aufl. Wiley, Hoboken, NJ (2005)
Youm, Y., Dryer, R.F., Thambyrajah, K., Flatt, A.E., Sprague, B.L.: Biomechanical analyses of forearm pronation-supination and elbow flexion-extension. Journal of biomechanics **12**(4), 245–255 (1979)
Zacher, I., Bubb, H.: Strength Based Discomfort Model of Posture and Movement Proceedings of the SAE DHMC (Digital Human Modeling Conference), Bd. SAE 04DHM-66. (2004)
Zatsiorsky, V.M.: Kinematics of human motion. Champaign, Ill.: Human Kinetics (1998). http://www.gbv.de/dms/bowker/toc/9780880116763.pdf

Weiterführende Literatur

Cashmore, L., Uomini, N., Chapelain, A.: The evolution of handedness in humans and great apes: a review and current issues. Journal of Anthropological Sciences 86, 7–35 (2008)
DIN 33402-1. Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Teil 1: Begriffe, Messverfahren: Beuth
DIN 33402-2. Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Teil 2: Werte: Beuth
Flügel, B., Greil, H., Sommer, K.: Anthropologischer Atlas. Minerva – Edition Wötzel, Frankfurt/Main (1986)
Günzkofer, F., Engstler, F., Bubb, H., Bengler, K.: Isometric elbow flexion and extension joint torque measurements considering biomechanical aspects. In: Proceedings of the First International Symposium on Digital Human Modeling Lyon, France. (2011)
Prader, A.: Normales Wachstum und Wachstumsstörungen bei Kindern und Jugendlichen.. Wochenschr. **59**:977–984, Springer Verlag (1981)

Menschmodelle

Heiner Bubb

5.1 Kognitive Menschmodelle – 222
5.1.1 Regelungstechnische Modelle – 222
5.1.2 Der Nutzen regelungstechnischer Menschmodelle – 230
5.1.3 Kognitive Fahrermodelle – 231

5.2 Anthropometrische Menschmodelle – 238
5.2.1 Zeichenschablonen – 238
5.2.2 Digitale Menschmodelle – 240

5.3 Zusammenfassende Würdigung des Nutzens von Menschmodellierung – 253

Literatur – 253

H. Bubb et al., *Automobilergonomie,* ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-8348-2297-0_5, © Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

Um bereits in der Definition- und Konzeptphase einer Fahrzeugentwicklung den Menschen einzubeziehen, sind adäquate Modelle des Menschen notwendig, die sich nicht in einer verbalen Beschreibung erschöpfen. Vielmehr ist es notwendig, dass diese Modelle mit entsprechenden mathematisch/technischen Realisationen des Fahrzeugs im Rechner korrespondieren können. Ganz grob kann man hierfür so genannte *kognitive Modelle* von den *anthropometrischen Modellen* unterscheiden. Aufgabe der kognitiven Modelle ist es, eine Vorhersage bezüglich des Verhaltens der informationstechnischen Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug durchzuführen. Die anthropometrischen Modelle realisieren demgegenüber die Abmessungen und Kräfte des Menschen. Sie werden im Bereich der CAD-Umgebung, in der eine virtuelle Repräsentation der Geometrie des Fahrzeugs möglich ist, genutzt.

5.1 Kognitive Menschmodelle

Sehr früh hat man versucht, die Interaktion von Mensch und Maschine mittels regelungstechnischer Methoden zu beschreiben. Diese Ansätze wurden vor allem in der Flugzeugindustrie benutzt, um das dynamische Verhalten eines Flugzeugs mit den Fähigkeiten des Piloten abzugleichen. Später wurden diese Methoden auch genutzt, um die dynamischen Eigenschaften eines Fahrzeugs auf die Fähigkeiten des Fahrers abzustimmen. Da das Autofahren nicht nur darin besteht, im Rahmen der Stabilisierungsaufgabe (siehe ▶ Abschn. 1.4) das Fahrzeug auf der Straße zu halten, sondern auch Entscheidungen zwischen unterschiedlichen Handlungsalternativen zu finden, gesellten sich zu diesen regelungstechnischen Modellen später auch Modelle, die das Entscheidungsverhalten des Menschen wiedergeben sollen. Die neuesten Ansätze beziehen sich darauf, die regelungstechnischen Modelle mit dem Entscheidungsmodell zu kombinieren.

5.1.1 Regelungstechnische Modelle

Es bereitet erhebliche Schwierigkeiten, den Menschen als technischen Regler abzubilden, da eine analytische Beschreibung der Subsysteme des Systemelements „Mensch“ in aller Regel nicht möglich ist. Um das angestrebte Ziel der Modellierung dennoch zu erreichen, versucht man Ergebnisse neurophysiologischer Forschung in technische Analogien umzusetzen und daraus eine regelungstechnische Struktur des menschlichen Informationsverarbeitungskanals aufzubauen. Anhand von Ergebnissen aus verschiedensten Aufgabenstellungen kann man nun mit den Methoden der nichtparametrischen Verfahren (siehe ▶ Abschn. 2.3.3) die einzelnen Parameter des jeweiligen Modells bestimmen. Derartige linearisierende Beschreibungen des Menschen sind allerdings nur dann adäquat, wenn es sich um hochgeübte Tätigkeiten handelt und das System sich in einem eingeschwungenen Zustand befindet, wie es zum Beispiel beim Nachfahren einer mit mäßigen Kurven versehenen Strecke gegeben ist.

5.1.1.1 Quasi-lineares Mensch-Modell

Der erste und auch heute immer noch zitierte Entwurf eines derartigen quasi-linearen Mensch-Modells stammt von Tustin (1944). Er bezieht sich ursprünglich nicht auf die Modellierung des Fahrers, sondern auf das Verhalten beim Zielverfolgen mittels eines Gewehres. In der Folgezeit wurde dieses Modell vor allem für die Beschreibung des Verhaltens von Flugzeugpiloten angewendet (sog. „paper pilot“). Der Entwurf stellt eine sehr einfache Beschreibung der menschlichen Regeleigenschaften in Form des Frequenzgangs F_{RM} dar, wobei die Beobachtungen, die schon für die Darstellung in ◘ Abb. 2.10 Voraussetzungen waren, Grundlage für die Modellierung waren. Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung werden dabei als eine Einheit behandelt, die unter rein technischen Aspekten durch einen „universellen Regler“ modelliert wird:

$$F_{RM}(p) = \frac{K \cdot (1 + pT_A)}{(1 + p \cdot T_1)(1 + pT_N)} \cdot e^{-\tau p} \qquad (5.1)$$

Der Informationsaufnahme-Informationsverarbeitungsblock wird hier durch die Verstärkung K und ein Vorhaltglied T_A beschrieben, womit die Eigenschaft des Menschen, als PD-Regler zu reagieren, wiedergegeben wird. Die sog. Verzögerung des Anpassterms T_1 steht für die Eigenschaft des

Menschen, eine gewisse glättende (regelungstechnisch gesehen „integrierende") Wirkung bei der Übertragung von Signalen zu zeigen. Eine weitere glättende Wirkung wird durch die Trägheit des Hand-Armsystems bewirkt, was ebenfalls durch ein integrierendes Systemglied vereinfacht beschrieben werden kann. Dies wird durch die neuromuskuläre Verzögerungszeit T_N wiedergegeben. Der Term „$e^{-\tau p}$" beschreibt eine Verzögerung im Sinne einer Laufzeit und entspricht pauschal der durch die Nervenlaufzeit bedingten physiologischen Reaktionszeit.

Der hier beschriebenen Übertragungsfunktion des Menschen liegen viele Untersuchungen zugrunde (siehe auch McRuer und Krendel 1957; McRuer und Jex 1967; Elkind 1956, 1964). Nachdem durch nichtparametrische Verfahren (siehe ► Abschn. 2.3.3) der Frequenzgang des Menschen bei sog. Trackingexperimenten[1] in Form des Graphen eines Bodediagramms bestimmt wurde, werden die Parameter des Modells der Gl. 5.1 so angepasst, dass sie mit den gefundenen Verläufen optimal übereinstimmen. Nach Senders (1964) bewegen sich die Parameter in folgendem Bereich:

Totzeit (Reaktionszeit) τ: 0,2–0,3 s
Zeitkonstante des neuromuskulären Systems T_N: 0,1–0,16 s
Verstärkungsfaktor K: 1–100 s
Vorhalt des Anpassterms T_A: 0–25 s
Verzögerung des Anpassterms T_1: 0–20 s

Der große Variationsbereich der Parameter erklärt sich einerseits durch die interindividuellen Unterschiede aber auch durch die unterschiedlichen Bedingungen. So bedingt beispielsweise bereits der Unterschied zwischen dem Erfassen einer Kurve bei einem Krümmungsradius von 30 m, einer Querbeschleunigung von 0,3 g und einer Voraussicht von 2 s (die Abweichung erscheint unter einem Winkel von ungefähr 15°) und dem Wahrnehmen einer leichten Abweichung vom Geradeauskurs (Empfindungsschwelle < 1′) einen Unterschied von ≈ 1 : 900. Insbesondere die Parameter für den Anpassterm und die Verzögerung des Anpassterms beschreiben unterschiedliches glättendes Verhalten und lassen sich nicht direkt physiologischen oder psychologischen Größen zuordnen.

Eine wesentlich detailliertere und stärker an den physiologischen Gegebenheiten orientierte Modellierung wurde von McRuer et al. (1967) in Form des „Präzisionsmodells" durchgeführt (siehe hierzu McRuer und Krendel 1974; Young 1973; Stein 1974; Stein und Pioch 1975), das sich wegen seiner vielen frei zu bestimmenden Parameter für eine prognostische Modellierung kaum eignet. Wie McRuer et al. (1967) allerdings zeigen, ergeben sich zwischen dem vereinfachten Modell nach Tustin und dem Präzisionsmodell besonders im Bereich unter $\omega = 0{,}6$ rad/s bzw. $\nu = 0{,}11$ Hz deutliche Abweichungen, die bezogen auf die Leistung von Versuchspersonen zuungunsten des Tustin-Modells ausfallen. Schweizer (1975) legt dar, dass die neuromuskuläre Verzögerungszeit und die Verzögerungszeit des Anpassterms erst für Frequenzen größer 1 Hz das Übertragungsverhalten wesentlich beeinflussen. Deshalb könne das Übertragungsverhalten des Menschen für den für manuelles Regeln wesentlichen Frequenzbereich von $0{,}2 < \nu < 1{,}0$ Hz durch folgende vereinfachte Beschreibungsfunktion angegeben werden:

$$F_{RM}(p) = K \cdot (1 + T_A p) \cdot e^{-\tau p} \qquad (5.2)$$

Dies entspricht der Übertragungsfunktion eines PD-Reglers mit der Totzeit τ.

Keine der bisher beschriebenen Übertragungsfunktionen ermöglicht es, die Rückmeldung eines Stellteils auf den haptischen Kanal wiederzugeben. In der Modellanalogie wird also immer davon ausgegangen, dass das Stellteil dem Menschen einfach nachgeschaltet ist und nur stellungsproportionale Rückmeldung, also keine Rückmeldung aus der Dynamik der Maschine vermittelt (diese Annahme wäre beispielsweise für Gas- oder Bremspedal richtig). Damit werden aber nicht alle Fälle der Realität erfasst, wo durch die mechanische Ankopplung auch Reaktionskräfte im Wirkungsgefüge der Maschine als Rückmeldung gespürt werden können (z. B. Lenkrad im Kraftfahrzeug). Auch das Präzisionsmodell bietet keine Möglichkeit, die Rückmeldung am Stellteil einzubeziehen. Das Informations-

1 Die Aufgabe der Versuchsperson besteht darin, eine auf einem Bildschirm (ein-oder zweidimensional) stochastisch sich bewegende Zielmarke mit der Ist-Marke zur Deckung zu bringen.

strukturmodell (Bolte und Bubb 1990) bietet eine konsequente Berücksichtigung dieser Rückmeldung. Die Zahl der freiwählbaren Parameter steigt dadurch aber auf 17, sodass hierfür die gleiche Anmerkung wie für das Präzisionsmodell gilt.

5.1.1.2 Cross-over-Modell

Ganz gleich, welches der zuvor erläuterten Modelle Anwendung findet, es müssen zusammen mit der regelungstechnischen Beschreibung der Dynamik des Fahrzeugs (je nach Anwendungsfall: Quer- bzw. Längsdynamik) die jeweiligen Parameter bestimmt werden. Grundlage dafür ist die Cross-over-Theorie von McRuer (1967). Er hat in zahlreichen Experimenten festgestellt, dass sich der Mensch weitgehend an beliebige Dynamiken von Regelstrecken anpassen kann. Regelungstechnisch wird diese Anpassung beschreibbar durch seine Beobachtung, dass im Bereich der Schnittfrequenz (cross-over-frequency, siehe auch ▶ Abschn. 2.3.3) der offene Regelkreis bestehend aus Mensch und Regelstrecke unterschiedlicher Dynamik einen Abfall des Amplitudengangs von 20 dB über eine Zehnerpotenz der Frequenz zeigt. Dies wird durch die Gl. 5.3 für den offenen Regelkreis beschrieben:

$$F_{RM} \cdot F_S = \frac{\omega_c}{p} e^{-\tau_e p} \tag{5.3}$$

Die Schnittfrequenz ω_c und die Totzeit τ_e, die pauschal alle Zeitkonstanten, d. h. das Reaktionsverhalten des Menschen, seine Verzögerungseigenschaften und die der Maschine simuliert, hängen dabei von der Dynamik der Regelstrecke und der Bandbreite der Führungsgröße (Schwierigkeit der Aufgabe) ab. Von McRuer und Jex (1967) werden dazu detaillierte Angaben gemacht, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll. Das in Gl. 5.3 angegebene Modell hat im Frequenzbereich zwischen 0,08 und 0,32 Hz Gültigkeit.

Das Cross-over-Modell kann in Verbindung mit der Regeltätigkeit des Menschen prinzipiell nur bei sog. Kompensationsaufgaben angewendet werden. Das sind Aufgaben, bei denen der Operateur nur die Differenz zwischen Führungsgröße und Nachführgröße sieht. Das ist eigentlich grundsätzlich beim Fahrzeug der Fall, da hier alle gesehenen Größen aus der Position des Fahrzeugs (= Nachführgröße) beobachtet werden. Durch Antizipation wird jedoch bei geübten Fahrern aus der Regelung quasi eine Steuerung (siehe „Zwei-Ebenen-Modell"). Trotzdem können mit dem Cross-over-Modell erfolgreich Stabilitätsuntersuchungen des Systems Fahrer-Fahrzeug durchgeführt werden. Dies wird durch die Betrachtung der Lage der Schnittfrequenz und der effektiven Totzeit sichtbar: die Beherrschung der Regelstrecke vereinfacht sich für den Fahrer, wenn die Schnittfrequenz höher liegt und die effektive Totzeit niedriger. Das wird z. B. durch die kinästhetische Rückmeldung erreicht, wie Experimente von McRuer et al. (1977) und Hosman et al. (1990) zeigen konnten. Umgekehrt bewirkt eine schwierigere Aufgabe (= Bandbreite der Führungsgröße; z. B. schnelle Fahrt auf kurvenreicher Strecke) eine Erhöhung der Schnittfrequenz und eine Reduktion der effektiven Totzeit. Yuhara et al. (1992, 1994) konnten damit zeigen, dass die haptische Rückmeldung der Reaktion der Regelstrecke (Rückstellkräfte am Lenkrad, die vom Fahrzustand abhängig sind, bzw. aktives Bedienelement, bei dem gezielt Parameter des Fahrzustandes wie Querbeschleunigung oder Gierwinkelgeschwindigkeit als Rückstellkräfte dargestellt werden) am Bedienelement eine Vereinfachung der Regeltätigkeit bewirkt. Insgesamt liegt die Schnittfrequenz bei manuellen Regelaufgaben zwischen 2 rad/s und 10 rad/s bzw. 0,3 Hz und 1,6 Hz (Johannsen 1977). Bei der Fahrzeugführung variiert die Schnittfrequenz je nach Fahraufgabe und Fahrsituation (Apel und Mitschke 1997):

- Bei Geradeausfahrt liegt sie zwischen 0,1 und 0,2 Hz,
- bei Kurvenfahrt bei ca. 0,35 Hz und
- bei kritischen Situationen (z. B. Ausweichmanöver) bei ca. 0,5 Hz.

Die Schnittfrequenz der Längsdynamik liegt mit 0,046 Hz eine Zehnerpotenz niedriger als die der Querführung (Donges 1982). Es handelt sich demnach bei der Regelung der Längsdynamik um eine vergleichsweise einfache Aufgabe. Versuche von Eckstein (2001) mit einem aktiven Bedienelement zeigen dann auch, dass die Rückmeldung von Fahrzuständen der Längsdynamik im Gegensatz zu der der Querdynamik keinen positiven Effekt für deren Beherrschbarkeit bringt.

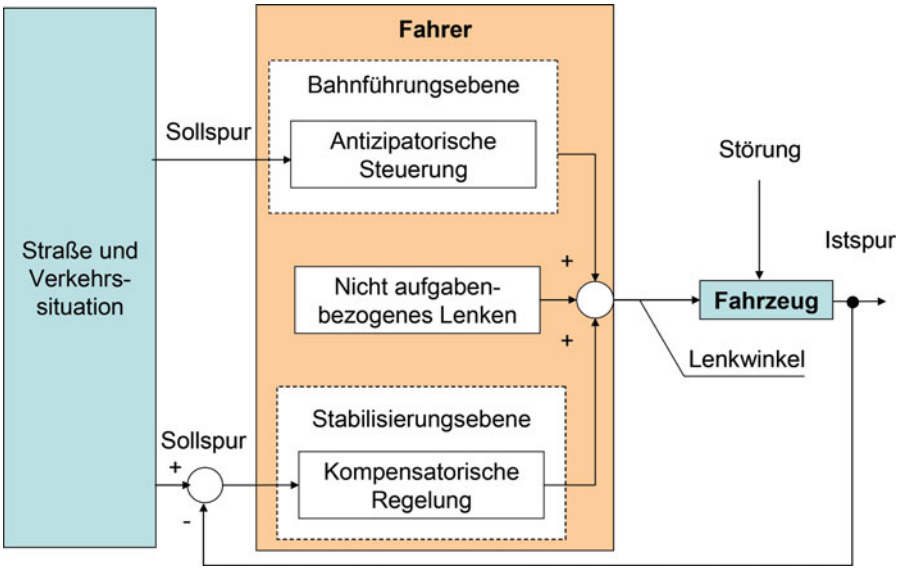


Abb. 5.1 Zwei-Ebenen-Modell nach Donges (1978)

Die Stabilität des Regelkreises kann – wie oben beschrieben – durch die der Phasenreserve im Bereich der Schnittfrequenz bewertet werden. Sie hängt direkt mit der effektiven Totzeit zusammen. Im Gegensatz zum großen Wertebereich der Schnittfrequenz bei unterschiedlichen Fahrsituationen der Querdynamik liegt der Bereich der Phasenreserve relativ konstant zwischen 30° und 60° (Apel und Mitschke 1997).

5.1.1.3 Zwei-Ebenen-Modell

Es ist besonders darauf hinzuweisen, dass alle bisher beschriebenen sog. quasilinearen regelungstechnischen Modelle des Menschen davon ausgehen, dass nur eine einzige Regelabweichung auf den Menschen wirkt. Wie in ▶ Abschn. 2.4 dargestellt, muss man aber davon ausgehen, dass der Fahrer verschiedene Formen der Rückmeldung zugleich verarbeitet. Insbesondere ist davon auszugehen, dass im Rahmen der Erfüllung der Führungsaufgabe in dem Bereich der voraus überschauten Strecke ein Sollkurs festgelegt wird. In dem sog. „Zweiebenen-Modell" geht man davon aus, dass durch Vorausschau („Scheinwerferorientierung") eine Antizipation des Straßenverlaufs erfolgt, welche auf der Führungsebene in Form einer Steuerung (= offener Kreis, ohne Rückmeldung) einen Sollkurs festlegt. Dieser wird dann auf der Stabilisierungsebene in Form einer kompensatorischen Regelung ausgeregelt (siehe hierzu Donges 1978; Willumeit und Jürgensohn 1997). Bezüglich eines Vorausschaupunktes (siehe Kondo 1953, ▶ Abschn. 3.3.2) wird die Kurvenkrümmung geschätzt, die zu einem späteren Zeitpunkt für die Regelung des Fahrzeuges benötigt wird (Apel und Mitschke 1997; Donges 1978; Neculau 1992; Reichelt und Strackerjan 1992; Prokop 2001). Diese antizipatorische Steuerung reduziert die Spurabweichung und ermöglicht es, den gesamten Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis zu stabilisieren (McRuer et al. 1977). Der Fahrer kann beispielsweise kurz vor einer Kurve schon einlenken, um die effektive Totzeit von Fahrer und Fahrzeug zu kompensieren (Donges 1978; Reichelt 1990). Die Phasenreserve des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises wird dadurch erhöht. Die geschätzte Straßenkrümmung wird ebenfalls für die Längsdynamik zur Verfügung gestellt und der Fahrer kann aus eigenen Erfahrungen in der aktuellen Fahrsituation entscheiden, ob die Fahrgeschwindigkeit angepasst werden muss (Neculau 1992). Abbildung 5.1 gibt diese Modellvorstellung des von Donges (1978) konkretisierten Zwei-Ebenen-Modells wieder: auf der Bahnführungsebene wird in Form einer (schnellen) antizipatorischen Steuerung auf den

mental erdachten Sollkurs reagiert und auf der Stabilisierungsebene wird die dann immer noch beobachtete Abweichung der Fahrzeugrichtung von der Kurventangente („Richtungsorientierung") und die Querabweichung („Nebelorientierung") in Form einer kompensatorischen Regelung, die mit den oben beschriebenen Methoden modelliert werden kann, „zu Null" gemacht. Abweichungen dieses mechanistischen Modells von tatsächlich beobachteten Reaktionen werden durch ein nicht aufgabenbezogenes Lenken (sog. additives Rauschen) berücksichtigt. Wie Jürgensohn (1997) darlegt, war das Modell von Donges beispielhaft für eine Reihe von abgeleiteten Entwicklungen (z. B. Horn 1986; Plöchl und Lugner 1994; Bösch 1991 und Reid et al. 1981) und wurde auch für praktische Fragestellungen eingesetzt (Braun 1986).

Neben diesen klassischen linearen Modelltypen gibt es noch abgeleitete Modelle, deren Struktur sich während der Simulation verändern kann. Als Beispiel führt Jürgensohn das Dual-Mode-Modell von McRuer (1967, 1980) an, bei dem je nach Regelsituation eine Umschaltung zwischen Regelung und programmierter Steuerung erfolgt. Zu diesen strukturveränderlichen Modellen gehören auch adaptive Modelle, in denen sich bei plötzlichem Umgebungswechsel (z. B. Glatteis) das Modell verändert (Reichelt 1990; Nagai 1983). In Jürgensohn (1997) werden noch weitere Modelle aufgeführt, die sich durch eine Reihe von Variationen auszeichnen, wie unterschiedliche Totzeiten, Hinzunahme nichtlinearer Elemente (z. B. Hysterese), Wahrnehmungsschwellen (z. B. Carson et al. 1978) und zeitdiskrete Elemente, wie Abtast-Halte-Glieder (Crossmann et al. 1966; Carson et al. 1978; Hayhoe 1979; Kroll und Roland 1970; Reid et al. 1981). In den meisten Modellen ist die Ausgangsgröße des Fahrers der Lenkradwinkel λ, aber auch zusätzlich die Lenkgeschwindigkeit (Sheirko 1972; Hayhoe 1979) oder das Lenkmoment (Fiala 1966; Wohl 1961). Hierzu ist allerdings anzumerken, dass die „natürliche" Ausgangsgröße der Lenkradwinkel ist, da es Ziel des bereits erwähnten Eigenreflexbogens ist, eine solche Kraft (= bezogen auf die Lenksäulenachse: Moment) aufzubringen, dass der gewünschte Weg (= Winkel) erreicht wird (siehe Schmidt und Thews 1990). Als Sollgröße wird fast immer der seitliche Versatz a oft in Verbund mit dem Gierwinkel φ herangezogen, selten die Straßenkrümmung (z. B. Radonjić 1990). Manchmal werden als Eingangsgrößen auch noch andere Zustandsgrößen benutzt, wie z. B. der Wankwinkel (Niemann 1972). Reichelt (1990) führt in einer Zusammenfassung insgesamt 21 verschieden Informationsgrößen für den Fahrer auf, von der Schwimmwinkelgeschwindigkeit (Braess 1970) bis zur dritten Ableitung der Sollkrümmung (Fiala 1966).

5.1.1.4 Optimaltheoretische Modelle

Die bisherigen Modelle, insbesondere das Crossover-Modell, dessen Anwendung zur Festlegung zumindest einiger der vielen Parameter aller bisher behandelten quasilinearen Regler-Mensch-Modelle, praktisch unerlässlich ist, haben sowohl aus der Sicht der psychologischen Forschung als auch aus der Sicht der ingenieurmäßigen Anwendung einen Reihe von Kritik ausgelöst. Aus psychologischer Sicht wurde vor allem die völlige Loslösung des Eingangs-Ausgangs-Modells von physiologisch-psychologischen Erkenntnissen kritisiert. Der mit der Aufgabe der Systemoptimierung beauftragte Ingenieur vermisst die leichte Übertragbarkeit auf Mehrgrößenregelkreise, die Modellierbarkeit zeitvariabler Probleme und die mangelnde Erweiterbarkeit (Jürgensohn 1997). Diese Kritikpunkte führten zusammen mit den in den 60er Jahren etablierten systemtheoretischen Werkzeugen zur Entwicklung des optimaltheoretischen Modells (Baron et al. 1969; Elkind et al. 1968; Baron und Levison 1977, 1980; Kleinmann 1969, Kleinmann et al. 1971, Kleinmann u. Vossius 1977). „Der Regler Mensch besitzt die Fähigkeit der Selbsteinstellung seiner Struktur und Parameter mit dem Ziel der Optimierung der Übertragungseigenschaften". Diese Feststellung Oppelts (1970) kann als Kerngedanke des optimaltheoretischen Modells angesehen werden. Im vorliegenden Zusammenhang soll nur dessen Struktur (siehe ◘ Abb. 5.2) erläutert werden, da die mathematische Abhandlung den Rahmen dieser Darstellung sprengen würde. Eine ausführliche und gut verständliche Darstellung findet sich in Donges (1977).

Im optimaltheoretischen Modell werden die technische Anzeige und die Informationsaufnahme (Beobachtungsvorgang) des Menschen zu einem Subsystem zusammengefasst, wodurch die Fähigkeit des Menschen, nicht nur die explizit angezeigten

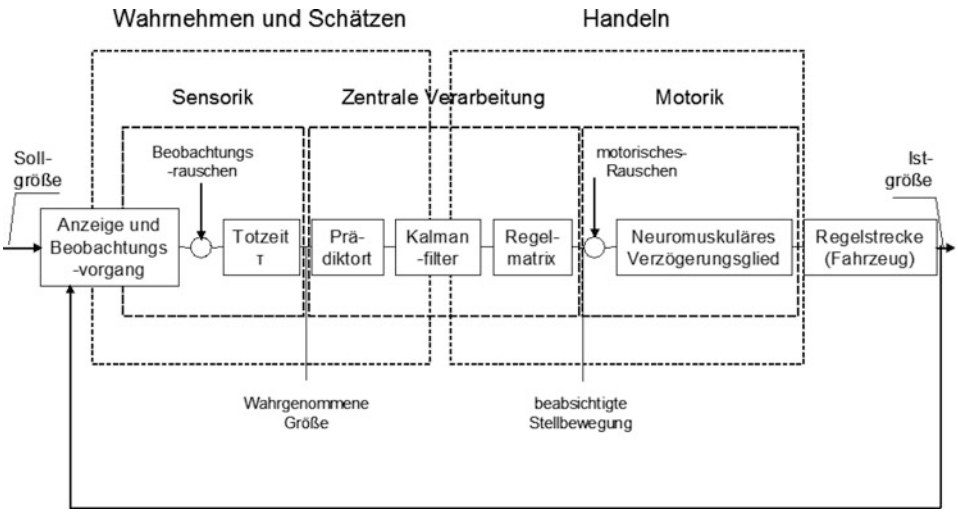


Abb. 5.2 Struktur des optimaltheoretischen Modells

Größen zu erfassen, sondern auch deren zeitliche Ableitung, berücksichtigt werden kann. Um eine Totzeit verschoben werden diese als wahrgenommene Größe der zentralen Verarbeitung zugeführt. Die Totzeit stellt ähnlich wie in den zuvor beschriebenen quasilinearen Regler-Mensch-Modellen eine summarische Repräsentation aller sensorischen, zentralen und motorischen Ansprech-, Verarbeitungs- und Laufzeiten dar. In der „zentralen Verarbeitung" wird die wahrgenommene Größe in die beabsichtigte Stellbewegung umgesetzt, die ihrerseits wiederum, durch die mechanischen Eigenschaften des Handarmsystems („Neuromuskuläres Verzögerungsglied") modifiziert, zur eigentlichen in die Maschine eingreifenden Stellgröße verwandelt wird. Innerhalb dieses Informationsflusses werden an zwei Stellen statistische Störungen überlagert, die entsprechend ihrer Einsatzstelle als „Beobachtungsrauschen" und „motorisches Rauschen" bezeichnet werden. Dieses additive Hinzufügen statistischer Signale ist dabei nicht im Sinne eines vom Modell nicht reproduzierbaren Anteils der menschlichen Stellbewegungen wie bei den quasilinearen Modellen zu verstehen, sondern als Auswirkung einer dem menschlichen Regelverhalten innewohnende Zufälligkeit, die sich dem Nutzanteil der Stellbewegung als zufällige Störgröße überlagert. Sie ist als unmittelbare Folge der begrenzten Genauigkeit des Menschen bei der sensorischen Aufnahme und der motorischen Ausgabe der Information zu interpretieren. Ihre Größe wird dabei im Allgemeinen durch die Eigenschaften der verwendeten Anzeigen und Bedienelemente beeinflusst.

Der wesentliche Teil des optimaltheoretischen Modells ist der in Abb. 5.2 als „Zentrale Verarbeitung" bezeichnete Teil, der die Fähigkeit des Menschen nachbildet, unter Berücksichtigung der ihm eigenen Eigenschaften bei vorgegebenen maschineller Dynamik eine bezüglich der gestellten Aufgabe optimale Regelungsstrategie zu entwickeln. Nach der optimalen Schätztheorie wird das dadurch möglich, dass durch das Anpassglied aus den wahrgenommenen Größen eine beabsichtigte Stellbewegung so abgeleitet wird, dass ein quantitatives Kostenkriterium minimiert wird. Für den Fall eines durch weißes Rauschen gestörten linearen Systems stellt die Hintereinanderschaltung eines Prädiktors und eines sog. Kalman-Filters dafür eine Lösung dar. Durch den Kalman-Filter wird für die um die Totzeit τ verschobene wahrgenommene Größe eine optimale Schätzung erreicht, die die Störung beseitigt. Der Prädiktor gewährleistet eine Schätzung der aktuellen Größe, die in optimaler Weise die Totzeit kompensiert. Wie die mathematische Behandlung zeigt, enthalten beide Systemelemente exakte Modelle der Dynamik der Regelstrecke. Der Kalman-Filter und der Prädiktor verlangen dabei eine *vollständige* Kenntnis der Regelstrecke und liefern dafür das dynamische Verhalten der Zustandsgrößen. Wie Jürgensohn (1997) anmerkt,

„wird die Zulässigkeit dieser Voraussetzung in der hohen Prädiktionsfähigkeit des Menschen begründet, die nur erklärbar ist, wenn der Mensch ein ‚internes Modell' bzw. eine ‚Repräsentation' der zu regelnden Streckendynamik besitzt. Diese Konzepte waren zur Zeit der ‚Hochblüte' des optimaltheoretischen Modells besonders in der kognitiven Psychologie und in der Handlungstheorie in heftiger Diskussion. Zwar deutet McRuer (1980) auch das Crossover-Modell als eine Struktur mit ‚implizitem' internen Modell von Strecke und Bediener in der Nähe der Cross-over-Frequenz, aber die explizite Modellierung des internen Modells hatte eine viel höhere Suggestivkraft und wurde gerade von psychologischer Seite begrüßt."

Es ergaben sich in der Folgezeit eine Reihe von Kritikpunkten an dem optimaltheoretischen Modell, die einerseits die für die mathematische Herleitung notwendigen Vorannahmen in Frage stellten und anderseits die Schwierigkeiten beim praktischen Einsatz betreffen. Auch das optimaltheoretische Modell ist für die Verhaltensvorhersage nur beschränkt einsetzbar, wobei nach Jürgensohn (1997) am problematischsten die Diskrepanz zwischen mathematischer Strenge und Tiefe und der augenscheinlichen „Nichterfassbarkeit" menschlichen Tuns erscheint. Dey und Kirchhoff (1975) gehen sogar soweit, dem optimaltheoretischen Modell (und auch den anderen linearen Modellen) die Fähigkeit abzusprechen, das Verhalten des Menschen nachbilden zu können. Dennoch wirkt, wie Jürgensohn ausführt, das Ideengut von „internem Modell" und „übergeordnetem Handlungsprinzip" in heutige Modell-Ansätze hinein und findet sich auch in vielen nichtlinearen algorithmischen Modellen wieder.

5.1.1.5 Schaltmodelle, Bang-Bang-Modelle, Hybridmodelle

Die bisher behandelten sog. linearen Menschmodelle verursachen unabhängig vom Verlauf der Eingangsgröße immer einen glatten kontinuierlichen Verlauf der Ausgangsgröße, obwohl der Mensch nach aller Beobachtung in den meisten Fällen nichtlinear und diskontinuierlich agiert. Bereits Tustin (1947) beschreibt in seinen frühen Modellvorschlägen den „eigentlich nicht glatten" Verlauf der Bedienerbewegungen. Dieses Verhalten zeigt sich besonders bei der Regelung von Strecken, die durch Differentialgleichungen mit höheren Ableitungen nach der Zeit beschrieben werden und bei Aufgaben, die Raum für freie Entscheidung geben. Diese Diskontinuität wird nicht nur bezüglich des zeitlichen Verhaltens, sondern auch bezüglich der Amplitudenniveaus sichtbar (siehe auch Poulton 1974 und Rühmann 1993). Dass es sich dabei um gut geübte Schaltstrategien handelt, zeigen Versuche von Pew (1963), der nachwies, dass sich bei Strecken 2. Ordnung (das dynamische Verhalten wird beispielsweise durch das in Abb. 2.8 beschriebene Pendel charakterisiert) die gleiche Regelleistung ergab, wenn statt eines Bedienelements mit kontinuierlicher Eingabemöglichkeit eines mit nur zwei Schaltpunkten verwendet wurde. Die in der Folge dieser Beobachtungen entstandenen „Schaltmodelle" (diskretes Handeln in festen bzw. stochastisch veränderlichen Zeitabschnitten) und in der Fortführung das „Bang-Bang-Modell" (optimales Zeitverhalten, wobei immer am Rande des Aussteuerbereiches Eingaben gemacht werden; beim Auto wäre das z. B. ein Wechsel zwischen Vollgas und voller Bremsung; näheres hierzu siehe Jürgensohn 1997) können jedoch auf das Autofahren nur sehr beschränkt angewendet werden. „Hybride Ansätze" hingegen, die diskrete Entscheidungsvorgänge mit den quasilinearen Modellen verbinden, stellen heute, auch hinsichtlich der modernen rechnertechnischen Möglichkeiten, den Stand der Technik dar. In diesem Zusammenhang wird auf den frühen Ansatz des „three-level-models" von Crossman und Szostak (1969) verwiesen, das dann aber doch nur den quasilinearen Anteil modellierte, sowie den Ansatz von Kroll und Roland (1970) und das Modell von Reddy und Ellis (1982), das ein Produktionssystem (ähnlich einem Flussdiagramm) in Verbindung mit geometrischen Überlegungen bringt und so einen ersten Ansatz für die Modellierung von Blickstrategien versucht. Das erste komplexe Modell, das den Fahrer in unterschiedlichen Fahrsituationen beschreiben kann, war DRIVEM (Wolf und Barret 1978; Lieberman und Goldblatt 1981). Es wurde von der NHSA (National Highway Safety Administration der USA) für die Voranalyse von Unfällen und als Hilfsmittel zur Unfallbekämpfung konzipiert (Jürgensohn 1997). Seitens der Psychologie wurde die zu starke Vereinfachung des Fahrerverhaltens bemängelt (Perel 1982).

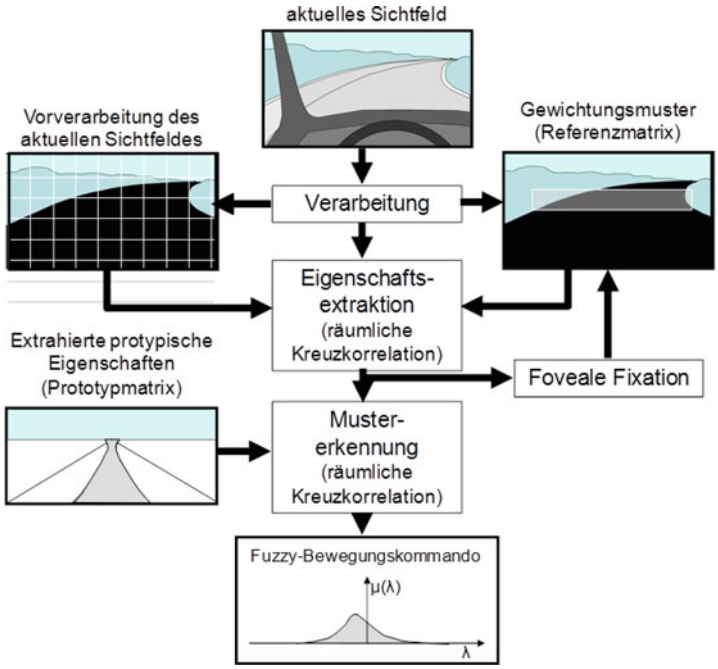


Abb. 5.3 Fahrermodell, das die Aktion aus dem Sichtfeld des Fahrers mit Methoden der Fuzzy-Mathematik ableitet (modifiziert nach Kramer und Rohr 1982)

5.1.1.6 Fuzzy-Control-Modelle

Ein großer Nachteil aller linearen Modelle ist die Tatsache, dass die Informationsaufnahme auf eine einzige reelle Größe, z. B. den seitlichen Versatz bzw. die Abweichung des Gierwinkels, reduziert wird und nicht modelliert wird, wie es zum Erfassen dieser Größen kommt. Bereits Wierwille et al. (1967) wies darauf hin, dass der Fahrer das ganze visuelle Sichtfeld als Informationsquelle nutzt. Neculau et al. (1990) und Neculau (1992) versuchten dies dadurch zu berücksichtigen, dass als Fahrereingangsgrößen mehrere Querabweichungen in unterschiedlichen Vorausschauentfernungen eingeführt wurden. Kramer und Rohr (1982), Kramer (1985) und Willumeit et al. (1983) beziehen das ganze Sichtfeld des Fahrers (driver display) als Informationsquelle ein und benutzen in ihrem Fuzzy-Driver-Modell das Mittel der Fuzzy-Kreuzkorrelation, um aus dem „driver display" einen Lenkwinkel λ abzuleiten (siehe Abb. 5.3) Es ist interessant, dass dieser und ähnliche Ansätze u. a. auch benutzt werden, um auf technischer Basis Fahrerassistenzsysteme für die Querführung zu entwickeln (Feraric et al. 1992, 1995, Feraric 1996). Einen ähnlichen Ansatz wie Kramer und Rohr verfolgt das Modell ALVINN der Carnegie Mellon University (Pomerleau 1991), das mittels künstlicher neuronaler Netze den Mustererkennungsprozess des Fahrers nachzubilden versucht. Auch Jürgensohn (1997) verwendet in seinem eigenen Modellierungsansatz die Fuzzy-Control-Theorie, indem er davon ausgeht, dass vom Fahrer die Straße „als Ganzes" gesehen wird. Er nimmt an, dass das Gesehene unscharf groben internen Konzepten, wie „Gerade", „Kurve", „Wechselkurve (S-Kurve)" zugeordnet wird und davon das Verhalten (hier das Geschwindigkeitsverhalten) abgeleitet wird. So kann beispielsweise eine Kurve mit sehr großem Radius aus der Sicht des Fahrers hinsichtlich der Regelung der Längsdynamik in die Kategorie „Gerade" fallen, wenn durch sie keine Beeinflussung der Geschwindigkeit notwendig wird. Simultan kann aber hinsichtlich der Querregelung der gleiche Sinneseindruck einem anderen Konzept zugeordnet werden (es sei hier auf die in ▶ Abschn. 3.3.2 dargestellten Ergebnisse von experimentellen Beobachtungen und den in ▶ Abschn. 3.3.3. daraus abgeleiteten Zusammenhang von Blickverhalten und innerem Modell verwiesen).

Das den Fuzzy-Control-Ansätzen eigene unscharfe Zuordnen von Sinnenreizen bzw. extrahierter Reizmuster zu Kategorien bzw. Konzepten ist überhaupt Grundlage gegenwärtiger

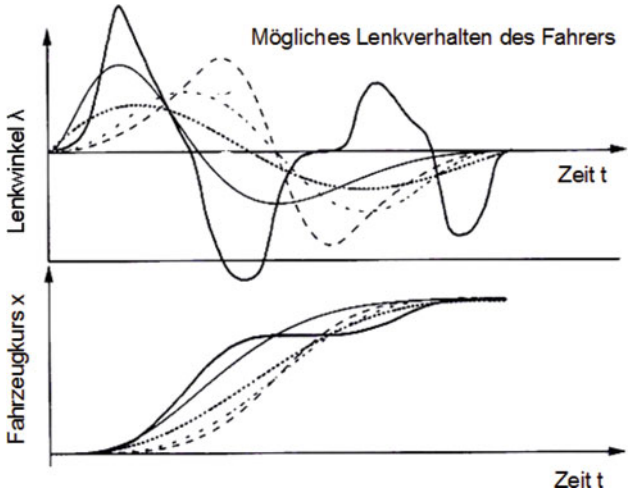


Abb. 5.4 Lenkwinkelverlauf λ(t) und daraus resultierender Fahrzeugkurs x(t) bei einem Spurwechsel (nach Jürgensohn 2002)

Modellierungsansätze. So wird beispielsweise das rein qualitative Modell Rasmussens (1987; siehe ▶ Abschn. 3.2.2.5) in der vereinheitlichten Kognitionstheorie von Newell (1990) in Form von vier sog. „Cognitive Bands" so aufgearbeitet, dass eine computergestützte Simulation kognitiver Prozesse möglich wird. Dabei umfasst das sog. biologische Band hauptsächlich neuronale Funktionen mit einer Zeitkonstante im Millisekundenbereich, das kognitive Band arbeitet symbolorientiert und umfasst automatisierte Handlungen im Bereich von 100 ms, das Band des rationalen Verhaltens ist dagegen durch echte Wissenshandlung charakterisiert und umfasst Zeiten zwischen 10 bis 10000 Sekunden. Im Gegensatz zu dem Vorschlag Rasmussens fügt Newell noch ein viertes sog. soziales Band hinzu, in dem die menschliche Zusammenarbeit als verteilte Menge rational handelnder Akteure modelliert ist, ein Ansatz, der bisher in der Modellierung des Verkehrsverhaltens des Fahrers noch nicht hinreichende Beachtung gefunden hat. Wickens und Hollands (2000) sprechen bei diesen Ansätzen eher von einem regulatorischen Kontinuum, das von Newell wohl am treffendsten beschrieben ist, indem dort die Rasmussenschen Ebenen in Anlehnung an entsprechende Modelle in der Festkörperphysik mit „kognitiven Bändern" bezeichnet werden, die durch bestimmte Potenzialwälle charakterisiert werden, zu deren Überschreitung endogen oder exogen erzeugte „Aktivierungsenergie" notwendig ist. Auch neuere Modellierungsansätze, deren Ziel es u. a. ist, für eine automatische Fahrzeugführung Regler mit „menschenähnlichem" Verhalten zu entwickeln, beziehen sich auf das Dreiebenenmodell von Rasmussen, wobei sich die Modellierung auf die niedrige fertigkeitsbasierte und regelbasierte Ebene beschränkt (Garrel et al. 2001).

5.1.2 Der Nutzen regelungstechnischer Menschmodelle

Wenn man den Anspruch an eine Modellierung des Fahrers hat, dadurch eine vollständige, präzise von den jeweiligen Situationen abhängige eindeutige Prognose des Verhaltens zu erhalten, so sind alle bisher vorgelegten Vorschläge enttäuschend. Das begründet sich nicht nur in der Unzulänglichkeit der Modelle, die immer nur Teilaspekte menschlichen Verhaltens abzudecken vermögen, sondern ist auch die Folge der großen interindividuellen und intraindividuellen Variabilität des Fahrers, die ein Modell in dieser Form gar nicht abzubilden vermag. Abbildung 5.4 zeigt als einfaches Beispiel verschiedenes Lenkverhalten von Fahrern beim Spurwechsel und das daraus resultierende Verhalten des Fahrzeugs (es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass das Fahrzeug hinsichtlich des „Eingangs" Lenkbewegung ein stark integrierendes Verhalten zeigt. Bezüglich experimenteller Erhebung des Fahrerverhaltens deutet das übrigens darauf hin, wie

wenig man aus der Interpretation von Fahrzustandsparametern wie Geschwindigkeit und Längs- bzw. Querbeschleunigung oder Gierwinkeländerung hinsichtlich der Fahrerabsichten aussagen kann). Generell kann man aber feststellen, dass die technische Nachbildung des Menschen in den jeweiligen Situationen, auf die sie sich bezieht, genauso in der Lage ist, Kurven zu folgen und ggf. Geschwindigkeiten anzupassen wie der reale Fahrer auch. So kann es das Ziel regelungstechnischer bzw. sonstiger mathematischer Nachbildung menschlichen Verhaltens auch nicht sein, exakte Vorhersagen über das individuelle Verhalten zu machen. Vielmehr liegt der Wert der Analyse darin, die jeweiligen Einflüsse und ihre grundsätzliche Wirkung transparent zu machen sowie daraus eventuelle technische Hilfen für den Fahrer abzuleiten. Der Hintergrund solcher Überlegung ist einfach: die Information, die das Modell benötigt, um die Aufgabe zu erledigen, braucht auch der in der Realität an seine Stelle gesetzte Mensch. In diesem Sinne lassen sich bestimmte Tendenzen als Sollvorgaben ableiten:

Die vom Fahrer erzeugten Vorhaltzeiten sollten so klein wie möglich sein, daraus folgt:

- die Totzeit des Fahrzeugs sollte so klein wie möglich sein (< 100 ms),
- für verschiedene Fahraufgaben müssen unterschiedliche Eigenschaften des Menschen berücksichtigt werden[2],
- Fahraufgabe und Fahrzeug müssen miteinander kombiniert betrachtet werden,
- Eingabe und Rückmeldung an der Regelstrecke Fahrzeug müssen zusammen betrachtet werden und
- höherfrequente Regeltätigkeiten zur Stabilisierung des Fahrzeugs sollen durch elektronische Regelsysteme (z. B. ABS, ESP) durchgeführt werden.

2 Hier ist besonders das Fuzzy-Control-Modell von Jürgensohn (1997) von Interesse, das beispielsweise für die Regelung der Längs- und Querdynamik unterschiedliches Verhalten vorhersagt, ein Ergebnis, das auch in anderen Untersuchungen, z. B. Eckstein (2001) und Huang (2004) zum Vorschein kam. Womöglich ist diese Erkenntnis auf spezifische Verkehrsituationen noch zu erweitern.

5.1.3 Kognitive Fahrermodelle

Die Beschreibung der Geschwindigkeitswahl zeigt bereits die Grenzen regelungstechnischer Fahrermodelle. So stellt Jürgensohn (1997) fest, dass regelungstechnische Menschmodelle immer nur einen begrenzen Bereich der Fahreraktivität wiedergeben können, dass insbesondere das Zweiebenenmodell, das eine Trennung in Führungs- und Stabilisierungsaufgabe vorsieht, „künstlich" erscheint und durch „hybride Modelle" ergänzt werden sollte. Insbesondere Modellvorstellungen aus dem psychologischen Bereich sollten mit den eher technisch orientierten Modellen verbunden werden, wie es ansatzweise durch die Fuzzy-Control-Modelle aber auch andere Ansätze geschieht.

Im Folgenden wird ein knapper Überblick über relevante kognitive Fahrermodelle gegeben, die auf sog. *kognitiven Architekturen* basieren. Nach Anderson (2007) wird kognitive Architektur definiert als „a specification of the structure of the brain at a level of abstraction that explains how it achieves the function of the mind". Sie repräsentiert also eine Struktur, von der man annimmt, dass sie die Struktur des menschlichen Denkens wiedergibt. Modelle auf der Grundlage kognitiver Architekturen gelten als psychologisch valide, was allerdings durch einen hohen Komplexitätsgrad erkauft wird. Grundlage für solche Fahrermodelle sind also oft Modelle, die ganz allgemein menschliches Verhalten in Situationen wiedergeben sollen, die die Kognition fordern. Von diesen Modellen werden dann spezifische Fahrermodelle abgeleitet (Näheres siehe Plavšic 2010).

5.1.3.1 ACT-R

Eines der bekanntesten Modelle dieser Art ist das von John Anderson an der Carnegie Melon University entwickelte *ACT-R* (Adaptive Control of thought-Rational), dessen ursprüngliche Intention war, ein Nutzermodell zu generieren, das die menschliche Interaktion mit unterschiedlichen Schnittstellen ermöglicht (Anderson et al. 2004). Es ist aus unterschiedlichen Modulen aufgebaut, welche die entsprechenden corticalen Regionen repräsentieren. So gibt es u. a. ein visuelles Modul, ein Modul, das für Handlungen zuständig ist, sowie Module für Gedächtnis und Sprache. ACR-R berücksichtigt dabei auch die beschränkte Verar-

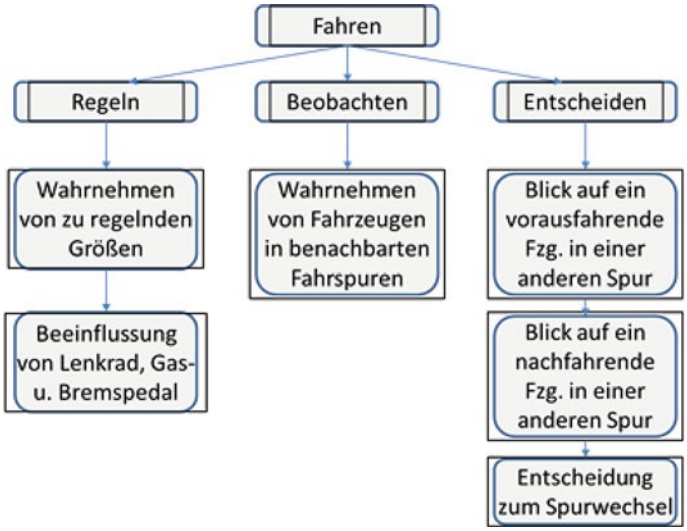


Abb. 5.5 das Fahrermodell von ACT-R

beitungskapazität von 7 ± 2 Chunks, die in ▶ Abschn. 3.2.2.5 erwähnt worden ist.

Von diesem Modell wurde ein spezielles ACT-R Driver Model abgeleitet, das Fahren auf dreispurigen Autobahnen einschließlich Spurwechsel zu modellieren erlaubt, ebenso wie simultanes Telefonieren. Andere Verkehrsteilnehmer können involviert werden, soweit sie in die gleiche Richtung fahren. Das Modell orientiert sich an dem Zweiebenenmodell von Donges (1978). Hinsichtlich der Querdynamik ist es mit einem einfachen Einspurfahrzeugmodell („Fahrradmodell") und hinsichtlich der Längsdynamik mit einen Energiebilanzmodell gekoppelt. Das Lenken wird auf regelungstechnischer Grundlage durch einen PID-Regler (siehe ▶ Abschn. 2.3.3) realisiert. Mittels des Aufmerksamkeitsmoduls EMMA (Eye Movements and Movement of Attention; Salvucci 2000) kann die nächste Augenbewegung vorhergesagt werden, die zwischen einem so genannten Nahpunkt und einem Fernpunkt wechselt. Der Nahpunkt liegt bei ca. 0,5 s Voraussicht auf der Straße. Für den Fernpunkt gibt es je nach Situation drei Alternativen: vorausfahrendes Fahrzeug, Tangentialpunkt an den Kurvenbogen oder auf leerer Straße ein Fernpunkt, der sich maximal 4 Sekunden vor dem Fahrer befindet. Abbildung 5.5 zeigt die Struktur des ACT-R Fahrermodells. Es berücksichtigt weitgehend die experimentellen Ergebnisse, die in ▶ Abschn. 3.3.2 geschildert worden sind, allerdings wird das Springen zwischen diesen beiden Extrempunkten auch kritisiert (Plavšic et al. 2010). ACT-R gerät allerdings wegen des enormen Rechenaufwands an seine Grenzen, wenn komplizierte Situationen wie beispielsweise Kreuzungssituationen zu simulieren sind, was bei der gegenwärtigen Rechnertechnologie eine Online-Anbindung an einen Fahrsimulator ausschließt (Plavšic 2010).

5.1.3.2 Soar

Ein weiteres Modell, das der kognitiven Architektur zugeordnet werden muss, stellt das Modell *Soar* (State, Operator And Result) dar, das von grundlegenden Arbeiten Newells (1990) ebenfalls an der Carnie Mellon University ausgeht, und gegenwärtig an der University of Michigan weiterentwickelt wird. Es enthält Mechanismen für Problemlösung, Lernen, motorisches Verhalten, visuelle Orientierung und einen Multi-Task-Mechanismus. Insbesondere unterscheidet es zwischen dem Langzeitgedächtnis und dem Arbeitsgedächtnis, welches den aktiven Teil darstellt und das in seiner Arbeitskapazität auf 7–8 Chunks pro Zeiteinheit beschränkt ist.

Für Soar wurde das Modell ***DRIVER*** entwickelt, das aus verschiedenen Modulen, wie Visuelle Orientierung, Navigation, Geschwindigkeitskontrolle usw. aufgebaut ist (Aasman 1995). Auf der untersten Stufe enthält DRIVER Operatoren, die den virtuellen Körper des Fahrers repräsentieren und die es erlauben, Körperbewegungen zu simulieren und die Zeiten zu schätzen, die dafür notwendig sind. Diese

Operatoren nehmen Befehle vom Arbeitsgedächtnis auf. Es gibt Module für die Durchführung der Navigationsaufgabe, der Führungsaufgabe und auf unterster Ebene der Stabilisierungsaufgabe, wo es sogar möglich ist, beispielsweise in Abhängigkeit von Strecken- und Motorsituation einen Gangwechsel zu initiieren. Das Modell hat eine innere Repräsentation des idealen Kurses, der verwendet wird, um Weg-Abweichungen zu berechnen. Für das Lenken gibt es dann ein eigenes Modul, das genauer ist als dasjenige von ACT-R. Der Lenkwinkel wird dabei basierend auf mehreren Einflussgrößen berechnet wie Winkel und seitliche Abweichung von der inneren Repräsentation des idealen Kurs und TLC (Time to Line Crossing; siehe ► Abschn. 2.4.1; diese Größe ist innerhalb des Moduls „Lenken" der wichtigste Parameter). Auch die Geschwindigkeitskontrolle ist komplexer als bei ACT-R. Sie basiert auf Reizen, die für die richtige Geschwindigkeitswahl wichtig sind, wie Tachometerwert, Zeit bis zur Kreuzung (TTI = Time To Intersection) und das Motorgeräusch. Zusätzlich hat das mentale Modell der Situation Bedeutung für die Entscheidung über die passende Geschwindigkeit.

Das wichtigste Modul des kognitiven Fahrer-Modells ist die Elementarwahrnehmung (Basic Perception). Sie ist für die Gegenstandserkennung, Aufmerksamkeit und grundlegende Augen- und Kopfbewegungskontrolle verantwortlich. Es wird dabei zwischen dem Funktionellen Gesichtsfeld (Functional Visual Field; FVF), das einen Winkelbereich von ca. 20° umfasst und dem Peripheren Gesichtsfeld (Peripheral Visual Field, PVF) mit einem Erfassungsbereich von 210° horizontal und 90° vertikal unterschieden (die Größen der Felder wurden dabei nach Miura 1986 bestimmt). Objekte innerhalb des funktionellen Gesichtsfelds haben 100-%-Chance, Objekte innerhalb des peripheren Gesichtsfelds haben geringere Chancen, wahrgenommen zu werden. Die Information im peripherischen Feld wird verwendet, um Augen- und Kopfbewegungen zu initiieren. Gegenständen im funktionellen Gesichtsfeld werden folgende Attribute zugewiesen: Existenz, Bewegung, Richtung, Größe, Farbe, Gestalt und Objektart. Im Gegensatz dazu werden Gegenständen im peripheren Gesichtsfeld nur mit den ersten vier Attributen versorgt. Das Modul der Elementarwahrnehmung enthält auch mehrere Einschränkungen bezüglich der visuellen Verarbeitung wie, dass während der Augenbewegung keine neue Sehinformation ins Arbeitsgedächtnis gelangen können, dass notwendige Augenbewegungen über ein gewisses Maß hinaus Kopfbewegungen bewirken, oder dass der Zeitbedarf für Augen- und die Kopfbewegungen von Geschwindigkeit und Entfernung der beobachteten bewegten Objekte abhängen.

Das Visuelle Orientierungsmodul baut auf dem Elementarwahrnehmungsmodul auf. Es ist der Teil von DRIVER, der in Soar ursprünglich nicht vorhanden war. Es regelt die Orientierung an Kreuzungen. Die visuelle Steuerung wird mittels eines so genannten Aufmerksamkeitsoperators realisiert, der angewandt auf einen betrachteten Gegenstand diesen markiert, sobald er bemerkt wurde. Beides, willentliche (Top-Down-Steuerung) und unwillkürliche (datengesteuerte) Augenbewegungen ist möglich. Die normale Sehtätigkeit ist dabei datengesteuert.

Das Visuelle Orientierungsmodul umfasst mehrere Top-Down-Regeln bezüglich der Orientierung an Kreuzungen. Sie wurden alle aus experimentellen Untersuchungen von Harsenhorst und Lourens (1988) gewonnen. Es wird dabei zwischen Default-Orientierungsregeln und Manöver-Orientierungsregeln sowie zwischen lokalen und globalen Scan-Pfaden unterschieden. Lokale Scan-Pfade repräsentieren die Bottom-Up (unwillkürlich) kontrollierten Augenbewegungen, und globale Scan-Pfade zeigen an, dass eine Suche geplant und deshalb Top-Down kontrolliert ist. In nichtkritischen Situationen herrschen die Default-Regeln vor, und die Augen werden größtenteils zu den Gegenständen im funktionellen Gesichtsfeld geleitet. In kritischen Situationen, wie das Nähern einer Kreuzung, verursachen implementierte Kreuzungsregeln die aktive Suche in der Umgebung durch globales Scannen. Wenn es einen sich bewegenden Gegenstand in der Peripherie gibt, wird der Operator darauf angewandt. Unterschiede zwischen Erfahrenen und Anfänger werden durch Regeln wiedergegeben wie:

- Erfahrene Fahrer nutzen feste Strategien beim Annähern an Kreuzungen und wechseln weniger häufig das Hauptblickfeld, oder
- erfahrene Fahrer schauen auf die relevanten Dinge in den Verkehrsumgebungen und schenken den relevanten Gegenständen früher Aufmerksamkeit als Anfänger, und

- erfahrene Fahrer können sich auf die periphere Sicht in weit größerem Ausmaß verlassen und sind im Stande, die Position bewegender Gegenstände absichtlich zu aktualisieren.

DRIVER ist das einzige Fahrer-Modell aus den kognitiven Architekturen, das das Fahren durch Kreuzungen simulieren kann. Leider gibt es keine Veröffentlichungen über die weitere Entwicklung von DRIVER seit 1995 trotz der sehr agilen Weiterentwicklung der Soar-Architektur selbst. Es werden auch einige bedeutende Probleme dieses Modells geschildert (Plavšic 2010). Die wichtigste Kritik bezieht sich auf das Schlüsselelement von DRIVER, die Sehorientierungsstrategien, wonach die Orientierung auf der Grundlage der scharfen Trennung von FVF und PVF allzu einfach erscheint. Auch die Genauigkeit der Augenbewegungen sowie das fehlende Lernen in der Sehorientierung wird kritisiert. Zusätzlich hat DRIVER ein Problem mit der Arbeitsspeichergröße und dem Vergessen von Information. Neue Soar-Entwicklungen haben diese Probleme überwunden, aber am Modell von DRIVER selbst ist nichts geändert worden.

5.1.3.3 QN-MHP

QN-MHP (Queuing Network – Model Human Processor) ist eine Rechnerarchitektur, welche mathematische Theorien und Simulationsmethoden von Warteschlangen (QN) mit einem Prozessor menschlichen Verhaltens (MHP) verbindet. Letzteres beruht wiederum auf dem Modell GOMS (Goals, Operator, Methods, Selection Rules). QN-MHP ist auf der kommerziell verfügbaren Software Promodell aufgebaut. Auf der Grundlage eines Netzwerkes von 20 Prozesseinheiten sind dabei verschiedene corticale Bereiche und entsprechende Funktionsmodule der menschlichen Informationsaufnahme, -verarbeitung und -umsetzung simuliert. Wegen dieser „gehirnähnlichen" Struktur ermöglicht QN-MHP die Visualisierung internaler Informationsflüsse während der Simulation entsprechender Tätigkeiten.

Auch von QN-MHP wurde ein Fahrermodell abgeleitet, das echtzeitfähig ist und sich weitgehend an der bekannten Informationsverarbeitung des Fahrers orientiert. Es wurde in Verbindung mit einer Fahrsimulatorumgebung getestet (Tsimhoni und Liu 2003). Ähnlich wie bei ACT-R wird für das Steuern ein Fernpunkt auf der Straße ca. 2–4 Sekunden vor dem Fahrer angenommen. Die seitliche Position wird gesteuert durch einen Nahpunkt, der sich 1 Sekunde vor dem Fahrer befindet. Bei Kurvenfahrt wird dabei der avisierte Tangentialpunkt der Kurve benutzt. QN-MHP ermöglicht die Simulation einer Zweitaufgabe. Zukünftige Entwicklungen sollen sich auf die Geschwindigkeitsregelung unter Berücksichtigung des Einfluss nehmenden Verkehrs sowie des Vestibularorgans und auditiven Inputs beziehen. Gegenwärtig arbeitet das Modell jedoch bei einer festen Geschwindigkeit von 72 km/h. Es kann nur von der Universität von Michigan, wo es auch entwickelt worden ist, genutzt werden.

5.1.3.4 COSMODRIVE

Neben diesen auf allgemeinen kognitiven Strukturen aufbauenden Modellen gibt es auch einige sog. kognitive Stand-Alone-Fahrermodelle, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird.

COSMODRIVE (COgnitive Simulation MOdel of the DRIVEr) wurde in Frankreich bei INRETS auf der Grundlage der Programmiersprache *SmallTalk* entwickelt (Bellet et al. 2011; Bornard et al. 2011). Es wurde weniger mit der Zielrichtung der Beurteilung von Assistenzsystemen zu entwickeln, sondern mehr noch als ACT-R und Soar, um die Informationsverarbeitung des Fahrers zu erklären. Wie bei den letztgenannten spielen mentale Modelle bei COSMODRIVE eine entscheidende Rolle. Sie werden alle repräsentiert innerhalb des „Taktischen Moduls". Dieses enthält einen so genannten Antizipationsagenten, der verschiedene Antizipationsrepräsentationen (AR) enthält, welche die möglichen Entwicklungen auf der Basis der gegenwärtigen Situation enthalten. Der Entscheidungsagent wählt eines von diesen verschiedenen Antizipationsrepräsentationen aus, wofür speziell das mit der zugehörigen Handlung verbundene Risiko und der Zeitgewinn Grundlage ist. Der Erfolg der Handlung wird durch das Operationsmodul mit der Erwartung verglichen und für den Fall einer Differenz werden neue *Current Tactical Representations* (CTRs) gebildet. Der beschriebene Prozess wird dann wiederholt, wobei durch das Bilden neuer übergeordneter Antizipationsrepräsentationen auch ein Lernprozess simuliert wird. Letztlich repräsentiert COSMODRIVE also eine programmtechnisch

realisierte Simulation dessen, was in ▶ Abschn. 3.2 genauer ausgeführt ist. Leider steht COSMODRIVE zurzeit nicht öffentlich zur Verfügung, abgesehen davon, dass der größte Teil der Literatur nur in französischer Sprache vorliegt.

5.1.3.5 PADRIC

PADRIC (PATH DRIVer Cognitive) basiert auf der Struktur von COSMODRIVE. Es wurde in Kooperation zwischen dem Institut of Transportation Studies (ITS), der University of California und Caltrans (Hinweis siehe Literaturverzeichnis) entwickelt. Es kann insbesondere kritische Situationen, die durch visuelle Ablenkung entstehen, simulieren. Ansonsten gelten für dieses System die gleichen Einschränkungen wie für das Programm, auf dem es basiert.

5.1.3.6 ACME

ACME wurde bei der DLR mit dem Ziel entwickelt, in Echtzeitsimulation ein Modell des Fahrers zur Verfügung zu stellen, das in verschiedenen Verkehrssituationen kritische Fahrerzustände zu modellieren erlaubt, die für die Entwicklung von Assistenzsystemen genutzt werden können. Der größte Nachteil des Systems ist, dass es für externe Nutzer nicht offen ist. Außerdem befindet es sich immer noch im Zustand der Entwicklung.

5.1.3.7 PELOPS

Das Programm *PELOPS* wurde von BMW in Kooperation mit der RWTH Aachen entwickelt. Es hat den Zweck, die Interaktion von Fahrer, Fahrzeug und Umgebung zu simulieren. Insbesondere kann es den Verkehrsfluss mit hoher Genauigkeit simulieren auch in Verbindung mit komplexen Stop&Go-Situationen. Allerdings ist es ganz auf den Längsverkehr spezialisiert.

5.1.3.8 SSDRIVE

Auch das Programm *SSDRIVE* soll in Echtzeit die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion mit speziellem Fokus auf Fahrerfehler modellieren. Es ist ebenfalls nicht öffentlich zugänglich.

5.1.3.9 Modellvorschlag von Plavšic

Aus den Erfahrungen mit den vorhanden Fahrermodellen entwickelt Plavšic (2010) Empfehlungen für die Konzeption eines neuen Fahrermodells. Gegenstand dieses Modells ist die Unterstützung bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen auf der Führungsebene. Es soll Fahrfehler simulieren und vorhersagen können und zugleich erklären, warum diese geschehen. Es werden Empfehlungen zum Detaillierungsniveau und zur Komplexität des Programmieraufwands gemacht. Hier wird speziell im Hinblick auf die Weiterentwicklungsfähigkeit die ergonomische Forderung nach einer einfach zu erlernenden Programmierung erhoben. Die erhobenen Forderungen werden nach Ansicht von Plavšic sehr gut durch das sog. Multi-Agent-System erfüllt (◘ Abb. 5.6). Folgende Schilderung veranschaulicht auch die Vorgehensweise der zuvor geschilderten Modelle.

Die Agenten selbst lassen sich in drei Gruppen teilen:

- Wahrnehmungsagent: optische, akustische und vestibuläre Information
- Informationsverarbeitungsagent: Kategorisieren, Festhalten, Generieren von mentalen Modellen, Antizipation, Risikoabschätzung und Entscheiden
- Informationsumsetzungsagent: Augenbewegung, Bewegung der oberen und unteren Extremitäten.

Jede der einzelnen Agenten in ◘ Abb. 5.6 sind einzeln zu realisieren. Als Beispiel wird die Modellierung des Wahrnehmungsagenten in ◘ Abb. 5.7 dargestellt. Daneben gibt es jeweils einen Agent für Fahrercharakteristiken, der Aspekte wie Kenntnisse, dauernde Attribute, gegenwärtiger Zustand u. ä. enthält.

Ein Fahrprozess lässt sich dann in Form eines Zyklus mit unterschiedlichen Übergangsmöglichkeiten darstellen (◘ Abb. 5.8). Für jeden der Zustände ist nun wieder ein eigener Agent anzunehmen. Beispielhaft wird dieser für den Fall des freien Fahrens (State 1) in ◘ Abb. 5.9 dargestellt.

In ◘ Abb. 5.8 ist speziell der Übergang zu Kreuzungen und das dortige Verhalten dargestellt. In jedem dort wiedergegebenen Segmente werden das normative und das beobachtete gewöhnliche Verhalten modelliert, worauf hier nicht näher eingegangen werden soll.

Das Fahrerverhalten wird jeweils auf der Ebene der Fahrsituation modelliert und enthält sowohl deterministische als auch probabilistische Beschreibungen. Im ersten Schritt wird die Kenntnis des

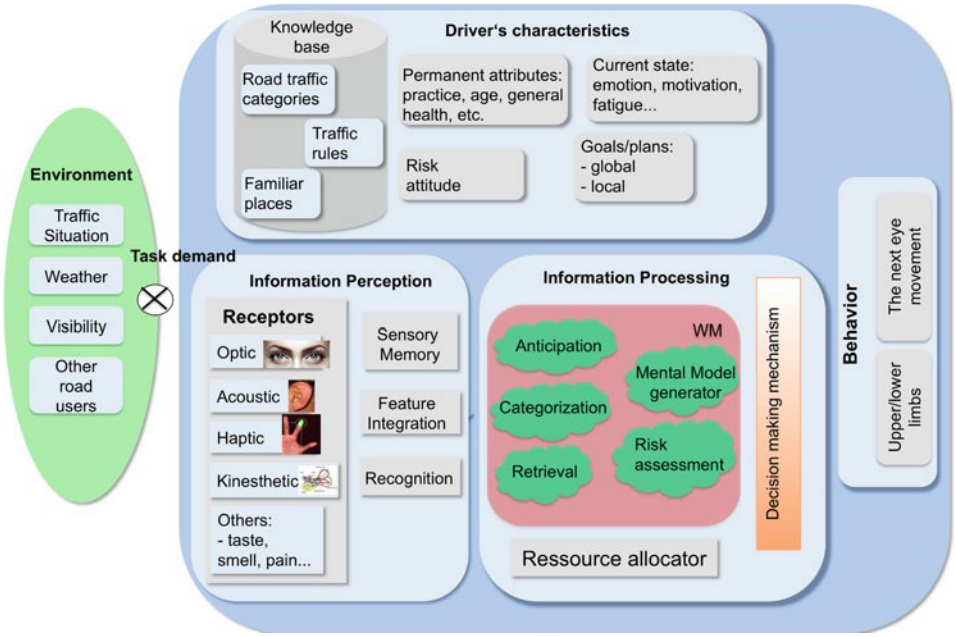


Abb. 5.6 Multi-Agent System (Plavšic 2010)

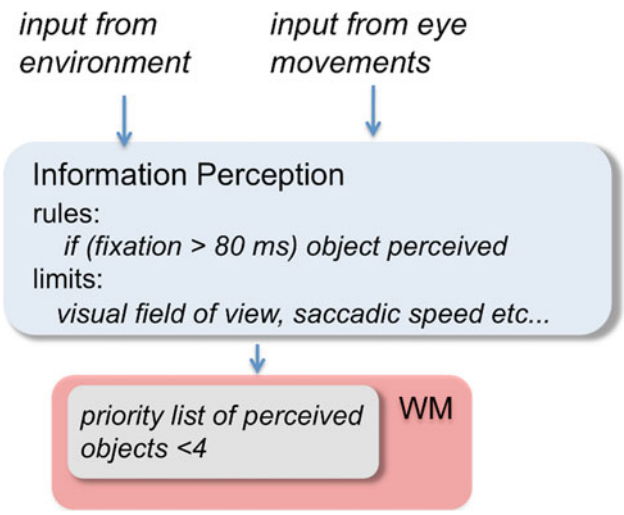


Abb. 5.7 Modellierung der Informationsaufnahmeagenten (Plavšic 2010).

Fahrers als Fuzzy-Wert modelliert, die die anderen Funktionen des Modells beeinflusst. Im Folgenden werden nun im Einzelnen für jede Sequenz das Verhalten des Augenbewegungsagenten sowie die Outputregeln für jeden der möglichen Inputs dargelegt.

Da es in dem Modell von Plavšic besonders um Fahrfehler geht, wird ein besonderes Augenmerk auf die Modellierung der Augenbewegung in all den zuvor genau betrachteten Segmenten gelegt. Insbesondere wird in diesem Zusammenhang ein sog. Fehlerbeobachter (Error watcher) realisiert, welcher die Differenz des normativen Verhaltens zu dem in Versuchen beobachteten Verhaltens zur Grundlage hat.

Das hier beschriebene Modell befindet sich zurzeit am Lehrstuhl für Ergonomie der TUM im Aufbau. Es enthält viele Eigenschaften, die auch in den zuvor genannten Modellen auftauchen. Detaillierte Hinweise dazu finden sich bei Plavšic (2010).

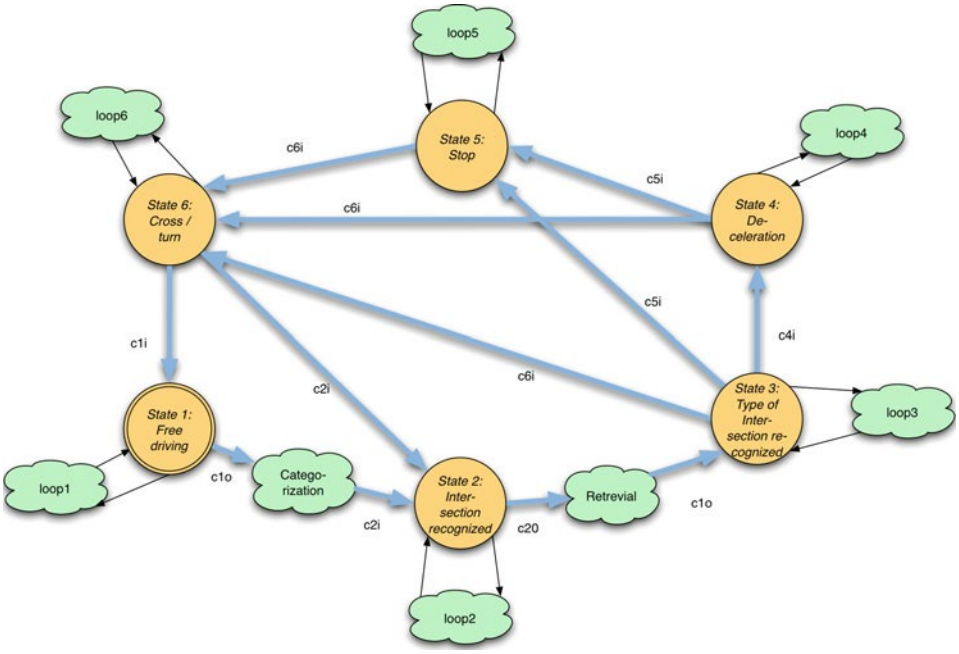


Abb. 5.8 Zeitliche und zufällige Verteilung von Zuständen am Beispiel des Durchqueren einer Kreuzung (nach Plavšic 2010)

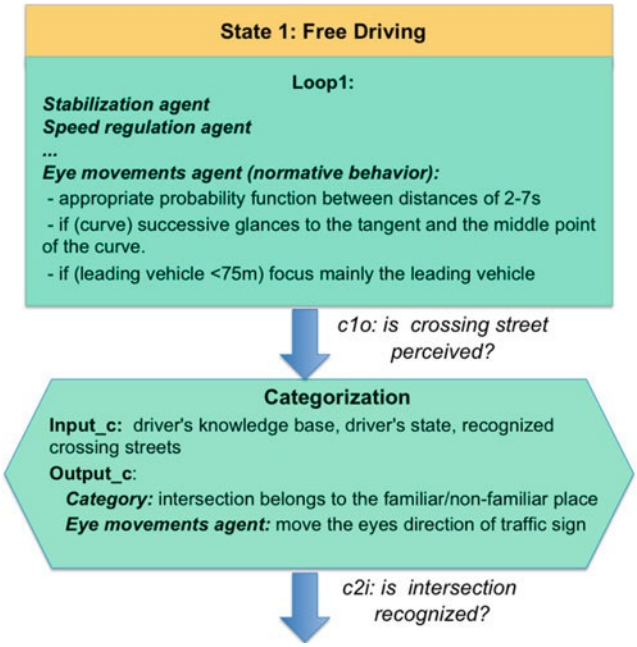
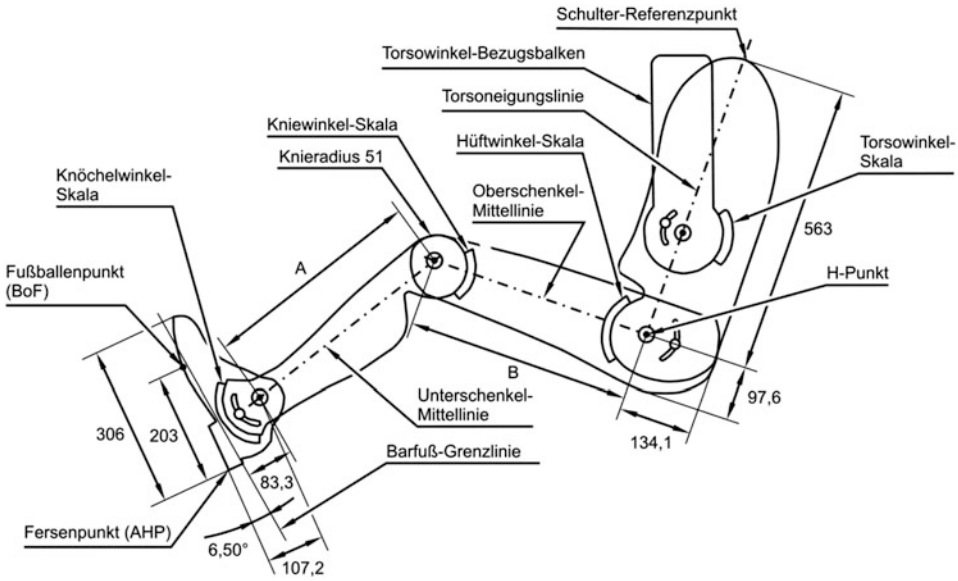


Abb. 5.9 Kognitiver Zustand 1: Freies Fahren. Die Schleife umfasst alle Agenten innerhalb eines Zustands und wird so wegen seiner Wiederholeigenschaft benannt. Der Kategorisierungsagent gehört zum Zustand 1 (nach Plavšic 2010)



	10%M	50%M	95%M Körperumriss-schablone
Unterschenkel (A)	392,7 mm	417,1 mm	459,1 mm
Oberschenkel (B)	407,7 mm	431,5 mm	456,0 mm

Abb. 5.10 SAE- Körperumrissschablone

5.2 Anthropometrische Menschmodelle

5.2.1 Zeichenschablonen

Die Nutzung anthropometrischer Tabellen stößt im Zusammenhang mit der geometrischen Gestaltung von Fahrzeuginnenräumen (sog. Packaging) schnell an ihre Grenzen. Mit geeigneten Körperumrissschablonen lassen sich diese Grenzen teilweise überwinden. Müller (2010) zitiert Seeger (2007), wonach bereits 1928 beim Zeppelin-Luftschiffbau Körperumrissschablonen benutzt worden wären, deren anthropometrische Körpermaße auf firmenspezifischem Fachwissen basierten und deren Genese heute nicht mehr nachvollzogen werden könne. Er berichtet weiter, dass auf der Basis grundlegender Arbeiten auf dem Gebiet der Anthropometrie erstmals Körperabmessungen von Mann, Frau und von Kindern unterschiedlichen Alters (6, 8,11 und 14 Jahre) in Form von Linienzeichnungen unter dem Namen Joe, Josephie und Joe Junior vorgestellt wurden und in dem Fachbuch „The Measure of Man" veröffentlicht wurden (Dreyfuss 1959).

In Verbindung mit der H-Punkt-Messmaschine, die für das SAE-gerechte Packaging von essentieller Bedeutung ist (siehe ▶ Abschn. 7.1.2), wurde bereits 1962 eine Zeichenschablone (SAE J826) entwickelt, die sich aus Unterschenkel (Lower Leg Segment), Oberschenkel (Thigh Segment) und Torso zusammensetzt. Bemerkenswerterweise hat diese Umrissschablone keinen Kopf (siehe Abb. 5.10), was allerdings in Verbindung mit der in SAE J941 definierten Augenellipse gesehen werden muss (siehe hierzu ▶ Abschn. 7.3.1). In seiner ursprünglichen Form repräsentierte diese Körperumrissschablone die Abmessungen eines 50-Perzentil Manns auf der Grundlage der Messungen von Geoffrey (1961). Ergänzend wurden 1969 vom „U.S. Department, Education and Welfare" Daten für den Unterschenkel und den Oberschenkel des 10. und 95. Perzentil Mann angefügt.

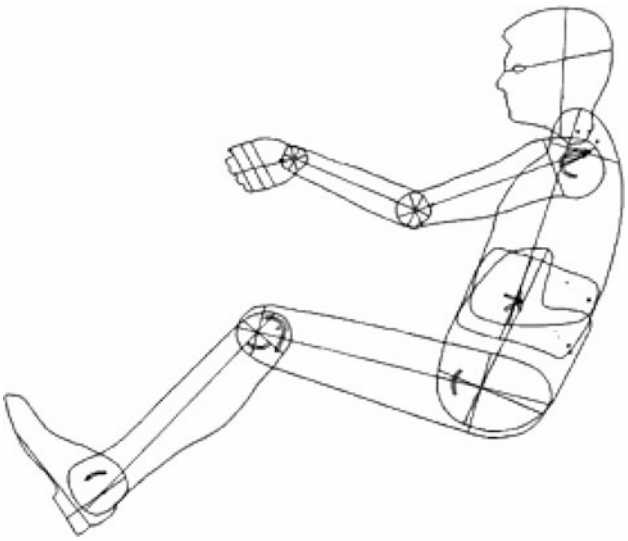


Abb. 5.11 Zeichenschablone der menschlichen Gestalt nach DIN 33 408 (Kieler Puppe)

In den 60er Jahren wurde für die ergonomische Arbeitsplatzgestaltung der Zeichenschablonensatz nach Jenik (1973, DIN 33 416) realisiert, der unter Anwendung geometrischer Grundkenntnisse sogar die dreidimensionale Konstruktion von Arbeitsplätzen gestattete. Allerdings hat sich dieses System für die Konzeption von Fahrzeuginnenräumen nicht durchgesetzt. Eine ungleich größere Bedeutung hat in Deutschland die von Helbig und Jürgens 1977 entwickelte sog. „*Kieler Puppe*" erlangt, die seit 1981 als zweidimensionale Schablone in drei Ansichten in DIN 33 408 genormt ist (siehe Abb. 5.11). Allerdings gestaltet sich die dreidimensionale Konstruktion mit diesen Schablonen extrem aufwändig, so dass in der Praxis meist nur der zweidimensionale Seitenriss Anwendung findet. Die *Kieler Puppe* ist in den Abmessungen der 1. und 5. -Perzentil Frau, sowie des 50., 95. und 99. Perzentil Manns verfügbar. Durch Einstellung der Gelenke an den Zeichenschablonen können unterschiedliche Körperhaltungen dargestellt werden. Um hier keine allzu willkürlichen Haltungen zu erzeugen, werden in DIN 33408-1 sog. Komfortwinkel angegeben (siehe Abb. 5.12), deren experimentelle Grundlage allerdings fraglich ist.

Zumindest wurde von Bubb (1992) aufgrund einer experimentellen Analyse an über 40 Versuchspersonen für die Einstellung der Kieler Puppe eine große Variationsbreite der Winkelwerte angegeben (siehe Tab. 5.1). Sie wurde dadurch gewonnen, dass die Kieler Puppe als Messinstrument über die Fotografien der Versuchspersonen gelegt wurde, die sich in einem variablen Fahrzeug-Mock-Up befanden.

Da die erwähnte SAE Zeichenschablonen und die Kieler Puppe in ihrer Grundstruktur kompatibel sind, stellen sie heute im Automobilbau unverzichtbare Mittel dar, mit deren Hilfe eine schnelle und normengerechte Konzeption des Fahrer Arbeitsplatzes möglich ist.

Der relativ einfachen Handhabung der Zeichenschablonen steht allerdings neben der erwähnten Einschränkung auf eine zweidimensionale Darstellung deren Inflexibilität bezüglich der Darstellung unterschiedlicher Körperhaltungen, der Berücksichtigung von Bewegungen, des Einsinkens in den Sitz und vieles andere mehr entgegen. Dazu kommt die Problematik, dass korrelative Zusammenhänge zwischen den Körpermaßen prinzipiell nicht dargestellt werden können. Aus diesem Grund stellen die dargestellten Körperabmessungen immer einen Kompromiss dar, da sich die Perzentilangaben immer auf bestimmte Körperelemente beziehen, nicht aber auf die individuelle Kombination innerhalb einer Person.

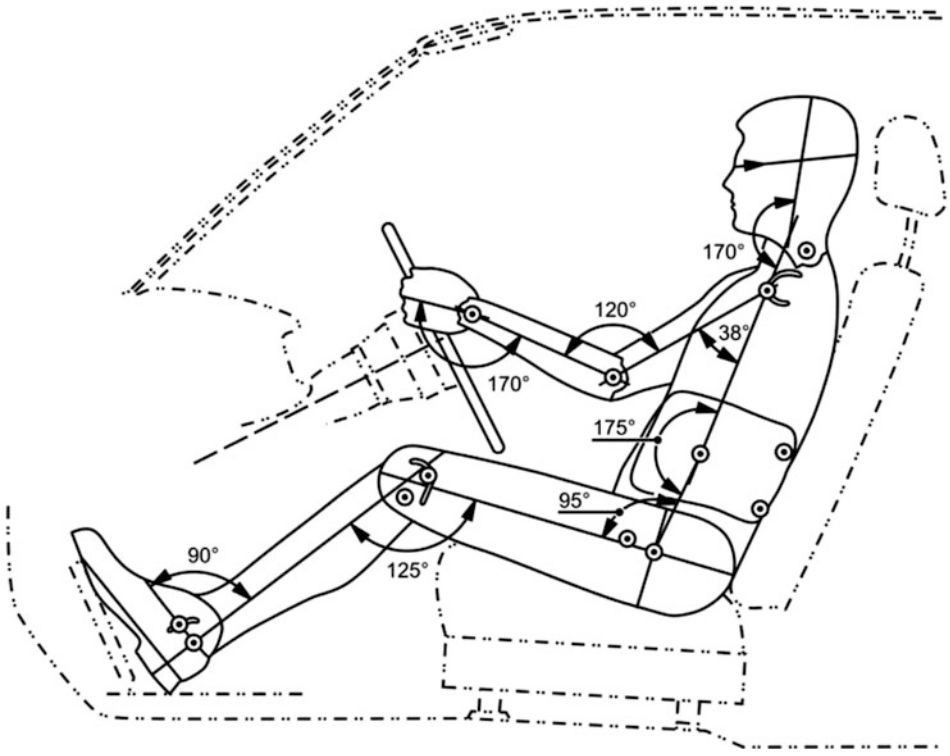


Abb. 5.12 Empfehlungen für die Einstellungen von Zeichenschablonen

Tab. 5.1 Von Versuchspersonen eingenommen Haltung dargestellt durch die Kieler Puppe (Bubb 1992)

Torso	Schulter	Ellenbogen	Hüfte	Knie	Fußg.
25° ± 3°	39° ± 12°	146° ± 17°	107° ± 7°	122° ± 8°	84° ± 16°

5.2.2 Digitale Menschmodelle

5.2.2.1 Entwicklung und Anwendungsgebiete

Mit dem Aufkommen der Computertechnologie, die in Form der CAD-Techniken eine Revolution der Konstruktion im Automobilbau hervorgerufen haben, entstand auch das Bestreben, ein 3-dimensionales Abbild der Gestalt des Menschen im Computer zu realisieren. Die ersten Versuche in dieser Richtung bestanden darin, die vorhandenen Zeichenschablonen in den Computerbereich zu übertragen. Eine ernsthafte Entwicklung von Computermodellen des Menschen hatte ihren Ausgangspunkt in der amerikanischen Luft und Raumfahrtforschung. Dabei war zunächst das Bestreben, das mechanische Verhalten des Menschen in Form von physikalischen Modellen im Computer abzubilden. Ein allgemeineres biomechanisches Modell zur Vorhersage populationsabhängiger Kräfte wurde von Chaffin et al. in den späten 60-ern entwickelt. Hauptziel dieser Arbeit war die Simulation statischer Kräfte, welche von Astronauten aufzubringen sind, die während eines Aufenthalts im All oder auf dem Mond Objekte heben, ziehen oder schieben müssen. Hierzu wurden Kraftmessungen an über 2000 Menschen gemacht. Es entstand daraus das Programm 3DSSPP (3D Static Strength Prediction Program), das vor allem in den USA auch heute noch von Behörden und Organisa-

tionen eingesetzt wird. Fast zeitgleich begann eine eigenständige computerbasierte Menschmodellierung mit der Entwicklung des Modells BOEMAN zur Simulation von Erreichbarkeiten für einen Durchschnittsmenschen in Jagdflugzeugen. Fetter realisierte dafür 1967 das Computermodell *First Man,* das, basierend auf den anthropometrischen Abmessungen eines 50-Perzentil-Manns, auf unterschiedliche Körpergrößen skalierbar war (siehe Abb. 5.13). Es enthielt ein Programm zur Optimierung der Haltungen auf nichtlinearer Basis, welches allerdings für damalige Möglichkeiten der Computertechnologie derart zeitaufwendig war, dass es praktisch nicht für Alltagsfragestellungen herangezogen werden konnte. In den 70er Jahren wurde BOEMAN dann vom medizinischen Forschungslabor für Luft- und Raumfahrt (ARML) der amerikanischen Luftwaffe übernommen. Das Model zur Haltungssimulation wurde vereinfacht sowie die Möglichkeit implementiert, eine größere Anzahl männlicher und weiblicher Anthropometrien simulieren zu können, die in verschiedene Militärflugzeugtypen integriert werden konnten. Das aus den Forschungen des ARML resultierende Menschmodell wurde unter dem Namen COMBIMAN bekannt.

Das erste speziell für den Computer geschaffene anthropometrische Menschmodell von Bedeutung, das auch allgemein verfügbar und nutzbar war, und das unter anderem für die Konzeption von Automobilen herangezogen wird, ist wohl SAMMIE (System for Aiding Man-Machine Interaction Evaluation; Bonney et al. 1969). Es wurde an der University of Nottigham entwickelt und dient vornehmlich sowohl der Gestaltung von Fahrzeuginnenräumen als auch anderen Aktivitäten um das Fahrzeug. Das Modell ist auch heute noch in verfeinerter und weiterentwickelter Form verfügbar (siehe Abb. 5.14). Mit seinem Modul „Fit" können Personen unterschiedlicher Nationalität, unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Körperhöhe modelliert werden. Die Module „Vision" und „Mirror" ermöglichen, Fragestellungen der direkten und indirekten Sicht zu beantworten. Mit dem Modul „Reach" können Greifräume und mit dem Modul „Posture" Haltungen erzeugt und bewertet werden.

Etwa zur gleichen Zeit (1974) entstand das biomechanische Softwaresystem CALSPAN-3D-CVS

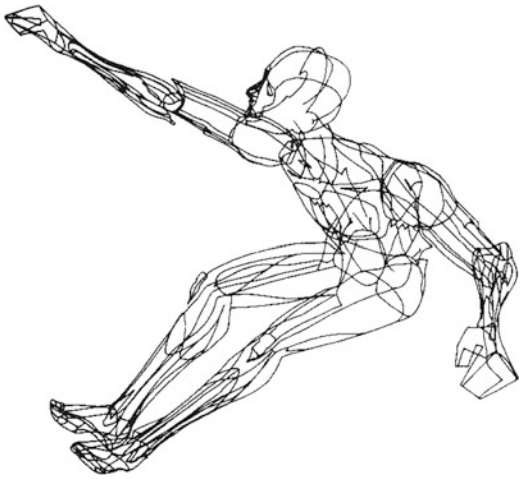


Abb. 5.13 Das Menschmodell First Man

(Crash-Victim-Simulator). Die integrierten dynamischen Analysefunktionen eignen sich für Studien von Sicherheitssystemen (Airbag, Gurte) in Fahrzeugen sowie für Kollisionsanalysen zwischen Automobilen, Fußgängern und Motorrädern (Hickey et al. 1985). Diese beiden Systeme stellen sozusagen den Startpunkt für zwei Entwicklungslinien dar, die nun mehr oder weniger parallel und unabhängig voneinander in Erscheinung treten.

Abbildung 5.15 zeigt die zeitliche Entwicklung der in der Automobilindustrie verwendeten Menschmodelle. Die untere Linie charakterisiert dabei Modelle, welche der Konstruktion und Bewertung der anthropometrischen Auslegung von Arbeitsplätzen dienen. Genannt seine hier Modelle wie ERGOMAN vom Laboratorie d'Anthropologie Appliguée et d'Ecole Hamaine in Paris, WERNER vom Institut für Arbeitsphysiologie an der Universität Dortmund, Tommy der TU Dresden, HEINER von der TU Darmstadt, sowie ANYBODY und ANTHROPOS der deutschen Firma IST und Man3D entwickelt bei INRETS (heute IFSTAR) in Frankreich. Zu den genannten Modellen kommen seit Beginn der 90er Jahre noch Menschmodelle, die Arbeitsabläufe simulieren und so z. B. eine vereinfachte Berechnung der in Abhängigkeit von der Geometrie des Arbeitsplatzes benötigten Arbeitszeit nach der MTM-Methode erlauben (z. B. Tecnomatix: nach einer ursprünglichen Verbindung mit dem eigenen Menschmodell eHuman zunächst realisiert über RAMSIS, später über

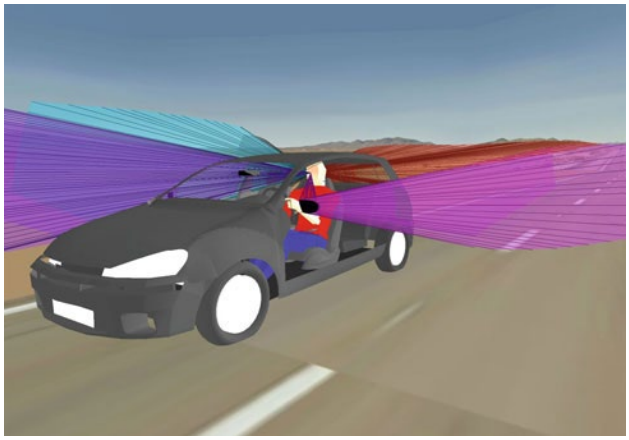


Abb. 5.14 SAMMIE

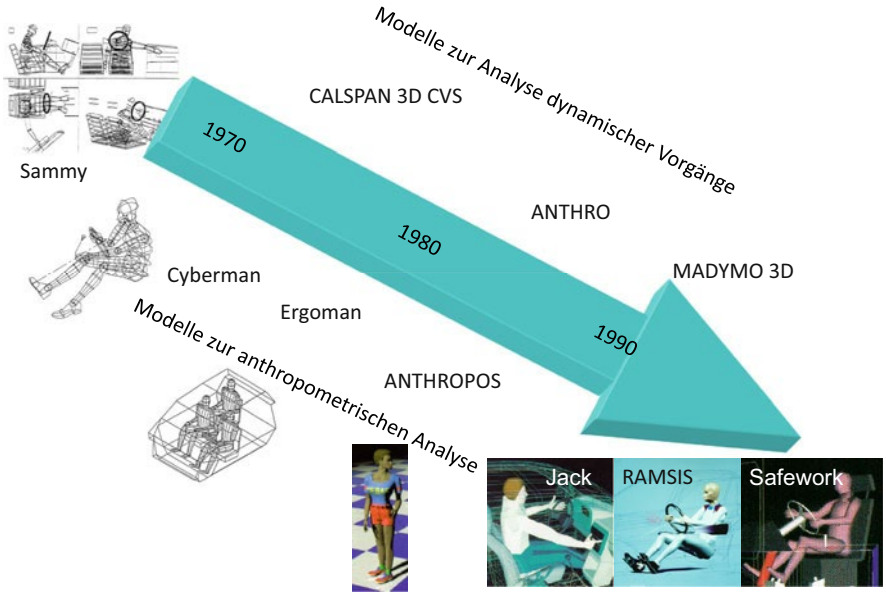


Abb. 5.15 Entwicklung der in der Automobilindustrie verwendeten Mensch-Modelle

Jack unter dem Namen „Siemens PLM“). Neben den für die Automobilentwicklung entstandenen Menschmodellen existieren weltweit rund 130 Menschmodelle, die überwiegend für den allgemeinen Einsatz zur Arbeitsplatzauslegung, Produktgestaltung, sicherheitstechnischen Überprüfung oder Dokumentation von Planungsergebnissen entwickelt wurden (Aune und Jürgens 1989; Waldhier 1989; Hickey et al. 1985). Sie unterscheiden sich in den anthropometrischen Datensätzen nur unwesentlich von den in der Automobilindustrie verwendeten. Allerdings sind die Analysefunktionen der Einzelsysteme stark an den Anwendungsschwerpunkt angepasst.

Eine relativ neue Entwicklung ist das Modell *Santos*, das allerdings bisher nicht als kommerzielle Software zur Verfügung steht. Es entstammt dem Virtual Soldier Research Programm der Universität von Iowa. Hauptzielrichtung dieses Programms ist die Simulation eines Soldaten, um damit Systeme, Komponenten und Produkte im militärischen Bereich evaluieren zu können. Die bisher veröffentlichten Teilaspekte zeigen allerdings einige auch für die kommerzielle Anwendung interessante Eigenschaften. So verfügt das Modell über eine akkurate Biomechanik, präzise Modelle der Muskeln inklusive Kontraktion, deformierbare Haut und Simulation

von Vitalwerten (Herzschlag, Blutdruck, Metabolismus). Weiterhin ist es möglich, Sicht zu überprüfen, Kräfte und Momente bei Lastenhandhabung sowie den Effekt von Kleidung einschließlich der internen Thermodynamik. Ein Modul für künstliche Intelligenz soll willensmäßige Wahrnehmung sowie die Interaktion und Simulation von Gruppen bereitstellen (zitiert nach Mühlstedt et al. 2008).

Die obere Linie in ◘ Abb. 5.14 stellt den Zweig dar, der sich mit der Simulation passiver dynamischer Abläufe befasst. Zu nennen ist hier speziell das bereits erwähnte Modell CALSPAN-3D-CVS, das unter anderen für Studien von Sicherheitssystemen in Fahrzeugen (Airbags, Gurte) sowie für Kollisionsanalysen zwischen Automobilen, Fußgängern und Motorrädern herangezogen wird. Es wurde von verschiedenen Unternehmen weiter ausgebaut und genutzt wurde (Hickey et al. 1985). Mit einer ähnlichen Zielrichtung wurde 1987 für das Berechnungssystem Adams, ein in der Automobilindustrie weit verbreitetes Mehrkörpersimulationssystem, ein Prozessor für die dynamische Modellierung des Menschen entwickelt. 1988 entwickelte die Firma TNO in den Niederlanden das dynamische Crash Analysis System MADYMO-3D (Mathematic Dynamic Models), dessen Aufgabe es vornehmlich ist, Hardware-Dummys (z. B. Hybrid III) im Rechner zu repräsentieren. In jedem der genannten Beispiele soll bereits im virtuellen Computerversuch das Verhalten des menschlichen Körpers, das sonst anhand von Crash-Versuchen mit Hardware-Dummies durchgeführt würde, simuliert werden. Dies hat enorme Kostenvorteile, wenn man den Aufwand für solche Crashtests berücksichtigt (Seidl 1997). Allerdings wird dabei im Hinblick auf die zu erfüllenden gesetzlichen Anforderungen mehr auf die wirklichkeitsnahe Simulation der Crash-Dummys abgehoben als auf die des lebenden menschlichen Organismus.

5.2.2.2 Die wichtigsten geometrisch orientierten Menschmodelle für die Fahrzeuggestaltung

Allen Computermodellen liegt die Annahme zugrunde, durch die Verwendung der drei Perzentile (5., 50. und 95. Perzentil), nach dem Geschlecht getrennt, die Berücksichtigung der Maße des Menschen hinreichend sicherzustellen. Es wird zwar öfters auf die durch den Computer gegebene Möglichkeit verwiesen, dass die Modelle an individuelle anthropometrische Daten angepasst werden können, ein geschlossenes von der Datenerhebung bis zur Simulation und Rechneranalyse konsistentes Menschmodellkonzept existierte bis Anfang der 90er Jahre jedoch nicht (Gärtner und Schweingruber 1992). Erst die neueren Entwicklungen von RAMSIS, Safework/Human Builder und Jack bemühen sich, diese Mängel zu beheben (s. u.) und darüber hinaus den Weg in eine neue Zukunft anthropometrischer Werkzeuge zu eröffnen. Eine Übersicht über Menschmodelle und ihre Anwendungsbereiche gibt Mühlstedt et al. (2008), sowie Seidl (1997) und Bubb (2007).

Der Aufbau eines anthropometrischen digitalen Menschmodells ist einerseits durch das äußere Hautmodell, das ihm ein realistisches Aussehen verleiht, und anderseits durch das innere Skelettmodell charakterisiert. Dieses innere Modell hat die Aufgabe, mit möglichst wenigen Gelenken alle Haltungs- und Bewegungsfunktionen des Menschen nachzubilden (siehe ◘ Abb. 5.16): Dabei ist zu beobachten, dass mit der immer weiter verbesserten Rechnerkapazität diese Restriktion mehr und mehr fällt zugunsten einer realitätsnahen Repräsentation der Funktionalität des Skeletts. Das innere Modell dient als Gerüst für die Haut, die über einen mathematischen Algorithmus fest bzw. elastisch mit diesem verknüpft ist. Der mathematische Algorithmus muss u. a. dafür Sorge tragen, dass bei einer Animation des Dummys harmonische, wirklichkeitsnahe Übergänge und Verformungen der Haut erreicht werden. Zurzeit wird an verschiedenen Stellen daran gearbeitet, die Deformabilität der Haut und des darunter liegenden Muskel- und Fettgewebes nachzubilden u. a. durch Anwendung von Methoden der Finiten Elemente (FEM), um so den Kontakt zu Sitzen u. ä. korrekt zu simulieren (z. B.: Casimir, DYNAMICUS).

Eine besondere Herausforderung für die anthropometrischen digitalen Menschmodelle stellt die korrekte Wiedergabe der Abmessungen der Körperteile, der Beweglichkeit und der Bewegungsräume dar. Eine einfache Übertragung von Werten aus anthropometrischen Tabellen, deren Werte mit konventionellen Messmethoden erhoben worden sind, verbietet sich eigentlich, da kein Individuum durch gleiche Perzentilwerte in allen Körperabmessungen

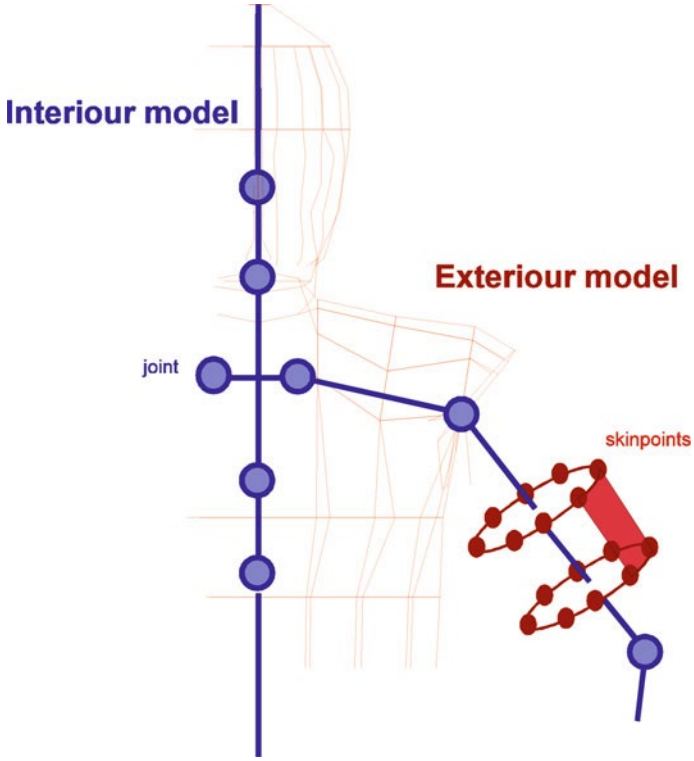


Abb. 5.16 Inneres („Skelett") und äußeres (Haut) Modell eines digitalen Menschmodells

charakterisiert ist und deshalb andererseits die Aneinanderreihung gleicher Perzentilmaße zum Aufbau eines Menschmodells zu widersprüchlichen Ergebnissen führen würde. Dennoch nutzt das Mitte der 80er Jahre in den USA unter der Federführung der NASA entwickelte Modell JACK (s. u.) für die Anthropometrie angepasste Tabellenwerte. Das Menschmodell SAFEWORK (in den 80/90er Jahren entwickelt an der University of Montreal) verwendet dafür Korrelationskoeffizienten, die aus den in Tabellen angegeben Perzentilwerten der einzelnen Körpermaße erschlossen werden, eine pragmatische Lösung, die zwar statistisch nicht korrekt ist, aber zu nutzbaren Ergebnissen führt. Für das Menschmodell RAMSIS (1986–93 entwickelt für die deutsche Automobilindustrie im Rahmen eines FAT-Projektes) wurden die tatsächliche Korrelationen, die bei anthropometrischen Erhebungen in den 80er Jahren in der ehemaligen DDR anfielen, für die Modellierung herangezogen. Bei der Neukonzeption dieses Modells (RAMSIS Nextgeneration) werden die im Rahmen der Meßerhebung „Size-GERMANY" (s. u.) erhobenen Werte und die daraus bekannten Korrelationen für die Modellierung genutzt, was zu präziseren Vorhersagen der anthropometrischen Abmessungen dieses Modells führen wird.

Auch die Modellierung von Muskelkräften ist heute Gegenstand anthropometrischer Modelle. Es konkurrieren dabei Methoden der Nachbildung der anatomisch-funktionalen Eigenschaften des Muskels und deren Verankerung am Skelett (z. B. die Modellierung von ANYBODY) mit rein funktionalen Modellierungen in Form von richtungsabhängigen Drehmomentwerten für jedes Gelenk, die aber auf Messungen an Versuchspersonen beruhen (gegenwärtig in dieser Form bei RAMSIS und bei Santos – dort etwas modifiziert – realisiert) und solchen, die ohne Modellierung des Entstehens der Kräfte auf der Basis von Regressionsanalysen die nach außen abgegebenen Kraftwerte (Kraftanalyse bei Jack) prognostizieren.

Aus den Anwendungsanforderungen für solche Computermodelle des Menschen ergibt sich u. a. die Notwendigkeit der Modellierung von Bewegung. Hierfür sind die unterschiedlichsten Ansätze bekannt, die von einer reinen *Animation*

(= Nachvollziehen einer mittels computergestützter Messung erfassten Bewegung) zu den verschiedenen *Simulationsansätzen* reichen, die partiell mit Animationstools arbeiten (z. B. Visualisierung des Laufens, siehe auch die Bewegungssimulation), aber auch eine eigenständige Bewegungssimulation versuchen. Für Letzteres bestehen die häufigsten Ansätze darin, im Hinblick auf ein Bewegungsziel die Summe des energetischen Aufwandes in den einzelnen Gelenken zu minimieren. Ein anderer viel versprechender Ansatz sieht vor, hinsichtlich des Bewegungsziels quasi den im Gehirn gebildeten Bewegungsentwurf zu simulieren, indem die Bewegungsbahnen für „führende Körperteile" des Bewegungsentwurfes berechnet werden und die übrige Bewegung des Körper einerseits auf der Basis der Minimierung des Kraft-/Energieaufwandes und anderseits der Vermeidung von Kollisionen berechnet wird (bei RAMSIS angewendet).

Anthropometrische Menschmodelle werden hauptsächlich verwendet, um die Abmessungen von Arbeitsplätzen (besonders häufiges Anwendungsgebiet: Gestaltung von Fahrzeugkabinen, aber auch von sonstigen Arbeitsplätzen, z. B. Montagearbeitsplätzen) sowie die Anordnung von Anzeigen und Bedienelementen in Abhängigkeit von der zu erwartenden Verteilung der körperlichen Abmessungen der Nutzerpopulation bereits in der Design- und Konstruktionsphase menschengerecht zu gestalten.

Im Folgenden sollen die heute am häufigsten genutzten anthropometrischen Menschmodelle, die für die Fahrzeugkonzeption herangezogen werden, kurz vorgestellt und charakterisiert werden.

Safework/Human Builder

Während der 80er Jahre wurde in Kanada das Modell SAFEWORK an der Ecole Polytechnique Montreal entwickelt (Carrier et al. 1987). Die erste Version wurde auf PC realisiert und verwendete Module für Anthropometrie, Bewegung sowie die Darstellung der Umgebung (Seidl 1997). SAFEWORK wurde 2000 von der französischen Firma Dessault-Systemes erworben. Durch die Implementierung in das CAD-System CATIA ist dieses Menschmodell heute weit verbreitet. Daneben ist es auch in den Enovia- und Delmiay-Produkt-Familien verfügbar. In allen Fällen wird es heute unter dem Namen *Human Builder* vertrieben. Dem

Abb. 5.17 Human Builder

Modell stehen die anthropometrische Daten aus verschiedenen Ländern (Frankreich, Amerika, Kanada, Japan) zur Verfügung. Wie erwähnt, wird durch eine einfache Nutzung der Standardabweichung in diesen Tabellen ein korrelativer Zusammenhang zwischen den einzelnen Körpermaßen geschätzt, der eine einigermaßen korrekte Wiedergabe der Proportionen erlaubt. Wirbelsäule, Schulter und Hals sind recht detailliert modelliert. Die natürliche Beschränkung der Gelenkswinkel ist berücksichtigt. Durch Verwendung vorpositionierter Haltungen und Anwendung inverser Kinematiken[3] kann eine natürliche Haltung des Modells erzeugt werden. Es kommen vordefinierte Körperhaltungen zur Anwendung. Mithilfe weiterer Module kann die Funktionalität der Anwendung erweitert werden. Speziell für die PKW-Konzeption ist das Modul „Vehikel Occupant Accomodation" von Bedeutung (Müller 2010; Beispiel Abb. 5.17). Es gibt aber auch Werkzeuge mit deren Hilfe statische Haltungsanalysen, Heben und Tragen nach Niosh, Schieben und Ziehen nach Snook & Ciriello, sowie Hand-Arm-Bewegungen (RULA) untersucht werden können. Die „Human Posture Analysis" ermöglicht die quantitative und qualitative Haltungsanalyse, wo-

3 Im Gegensatz zur „Vorwärts-Kinematik", bei der mit Kenntnis der geometrischen Verhältnisse und der Trägheitsmomente der einzelnen Körperelemente durch Annahme von Kräften eine Bewegung bzw. im statischen Fall eine Haltung berechnet wird, wird bei der „inversen Kinemathek" aus der Kenntnis der geometrischen und mechanischen Randbedingungen bei Kenntnis der beobachteten Bewegung bzw. Haltung errechnet, welche Kräfte mit ihren jeweiligen Wirkrichtungen notwendig sind, um die Beobachtungen zu erklären.

Abb. 5.18 JACK

bei für jedes Gelenk Komfort- und Diskomfort-Bereiche (dieser Modellansatz stimmt nicht mit den im ▶ Abschn. 3.3.4 wiedergegebenen Vorstellungen über ein!) durch den Nutzer definiert werden, welche wiederum durch eine farbliche Hervorhebung eine optische Kontrolle ermöglichen. Eine automatische Haltungsoptimierung ist möglich. Die „Human Task Simulation" erlaubt Handlungsanalysen für Arbeitsprozesse zur Überprüfung ergonomischer, gesundheitlicher und sicherheitstechnischer Aspekte (zum Beispiel Treppensteigen, Benutzen einer Leiter, Erstellung macro-artiger Bewegungspfade u.v.m.). Eine Schnittstelle mit dem Programm „Delmia Process Engineer" erlaubt zudem Zeitanalysen (zitiert nach Mühlstedt et al. 2008).

Jack

Das Modell JACK wurde unter Federführung der NASA zusammen mit der Universität von Pennsylvania am Center for Human Modeling and Simulation Mitte der 80er entwickelt. Ursprünglich war dieses Modell, das zunächst den Namen TEMPUS trug, für die Arbeitsplanung beim Zusammenbau der heutigen Raumstation ISS konzipiert worden. Es sollten Fragen geklärt werden, wie z. B. ein Astronaut am besten Gegenstände erreichen und befestigen kann, aber auch, wie die Sicht des Astronauten mit Raumanzug ist. Dieses System ist ein auf Methoden der Robotik aufbauendes Animationswerkzeug, das dynamische Abläufe annähernd in Echtzeit mit einer sehr hochwertigen Visualisierung realisiert. Im Laufe der Jahre wurde JACK auch für Analysen an Militärflugzeugen und anderen Fahrzeugen benutzt. JACK nutzt die anthropometrische Datenbank Ansur. In der Zwischenzeit wird JACK durch sein weibliches Gegenstück mit der Bezeichnung JILL ergänzt. JACK verfügt über eine bewegliche Wirbelsäule und Gelenke mit die natürlichen Bedingungen nachbildenden Begrenzungen. In „Classik JACK" ermöglicht das Modul „Occupant Packaging Toolkit" unter Anwendung der inversen Kinematiken die Positionierung in einen PKW-Innenraum (◘ Abb. 5.18). Auch eine Modellierung der Sichtverhältnisse des Fahrzeugführers kann mit diesem Werkzeug durchgeführt werden. Eine Reihe von weiteren Analysefunktionen ist in das Menschmodell bereits integriert, so dass z. B. kraftgeführte Haltungs- und Bewegungssimulation die Berechnung auch komplexerer Aufgaben ermöglicht. Wie Seidl (1997) feststellt, ist Jack kein ausgesprochenes in sich geschlossenes Ergonomiewerkzeug. Seine Stärke ist, dass der Anwender durch offene Schnittstellen eigene Methoden und Verfahren integrieren und mit Jack anschaulich präsentieren kann. Darin liegt auch heute seine große Bedeutung; denn durch seine Preiswürdigkeit ist es vor allem für wissenschaftliche Einrichtungen als Visualisierungswerkzeug attraktiv, um dort vorgenommene Entwicklungen zu veranschaulichen. Oft werden diese Entwicklungen dann von den Auftraggebern direkt in den Produkt- bzw. Produktionsprozess übernommen.

RAMSIS

Zwischen 1987 und 1994 wurde in Deutschland in Zusammenarbeit mit der deutschen Automobilindustrie und einigen bedeutenden Zulieferern, der Fa. Tecmath, der Katholischen Universität Eichstätt, und dem Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München das Menschmodell RAMSIS (**R**echnergestütztes **A**nthropologisch-**M**athematisches **S**ystem zur **I**nsassen **S**imulation bzw. Engl. Bezeichnung: **R**ealistic **A**nthropological **M**athematical **S**ystem for **I**nterior-comfort **S**imulation) entwickelt. Tecmath hat in der Folgezeit die Vermarktung und Weiterentwicklung von RAMSIS übernommen, während viele mehr wissenschaftlich orientierte Untersuchungen weiterhin vom Lehrstuhl für Ergonomie an der Technischen Universität München übernommen wurden. 2002 hat sich die Firma Human Solutions GmbH, weiterhin mit Sitz in Kaiserslautern, aus der Firma Tecmath herausgelöst und entwickelt und vertreibt nun RAMSIS weiter.

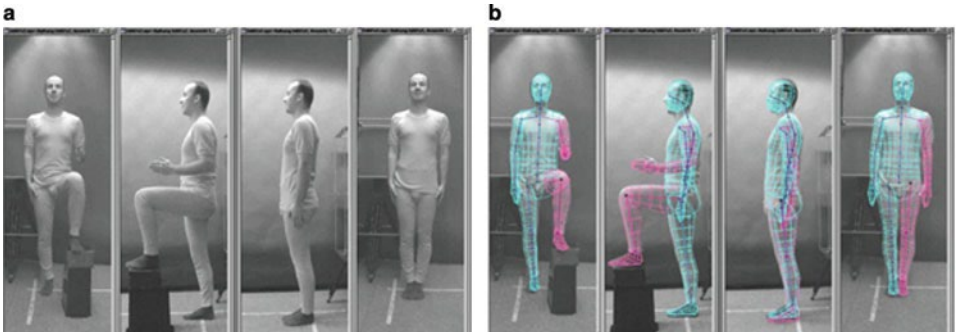


Abb. 5.19 Fotogrammmetrische Erfassung der Versuchsperson (**a**) und Überlagerung mit dem Rechnerdummy (**b**)

Aufgrund der ganzen Entstehungsgeschichte ist RAMSIS zunächst speziell für die Bedürfnisse der Automobilindustrie zugeschnitten. Wegen seiner Bedeutung für die Automobilindustrie wird dieses Modell im Folgenden etwas genauer beschrieben.

Eine Besonderheit des Projektes war von Anfang an, dass das Modell sowohl für die Messung als auch für die Gestaltung herangezogen wurde. Dadurch sollte erreicht werden, dass das Modell immer ganz nah an dem realen Menschen bleibt. Durch ein berührungsloses (optisches) Messverfahren wurden individuell anthropometrische Daten so erhoben, dass ein gutes anthropometrisches Rechenmodell der jeweiligen Versuchsperson auf der Basis des beschriebenen Dummys aufgebaut werden kann. Das Verfahren besteht darin, dass die Versuchsperson durch zwei Kameras, deren optische Achsen senkrecht zueinander stehen, aufgenommen wird. Die durch diese Kameras erfassbaren einfachen Werte (z. B. Körperhöhe, Fingerspitzenhöhe u. ä.) werden benutzt, um den Dummy mittels Superposition (siehe Abb. 5.19) an die Proportionen der Versuchspersonen anzugleichen. Der für diese Superposition benötigte Dummy war ursprünglich auf einem PC programmiert, weshalb er den Namen PCMAN erhielt. PCMAN besitzt die gleichen geometrischen Eigenschaften wie RAMSIS. Durch eine entsprechende Schnittstelle können die durch PCMAN gewonnenen Daten unmittelbar auf RAMSIS übertragen werden. Das weitere anthropometrische Messprogramm sieht verschiedene festgelegte Körperhaltungen vor, durch welche die genaue Lage der Gelenke und im gewissen Umfang auch deren Variation in Abhängigkeit von der Haltung erfasst werden. Indem das äußere Modell des Dummys nun so verändert wird, dass dessen Kontur möglichst nahe an der Kontur der aufgenommenen Personen liegt, erhält man von dieser ein gutes Abbild im Rechner.

RAMSIS ermöglicht nicht zuletzt auf der Basis dieser Datengewinnung insbesondere die perzentilierte und korrekte Darstellung des Menschen unter Zugrundelegung geeigneter Populationen mit den Leitmaßen Körperlänge, Korpulenz und Proportion (Verhältnis von Körperhöhe zu Stammlänge).

Später wurde das beschriebene Messverfahren mithilfe eines eigens von Tecmath/Human Solutions entwickelten Bodyscanners verfeinert. Zwischen 2000 und 2010 wurde die Bekleidungsindustrie auf die Möglichkeiten des Bodyscanners aufmerksam. In Kooperation zwischen den Hohenstein Instituten, der deutschen Fahrzeugindustrie und Human Solutions wurde auf dieser Grundlage das Projekt SizeGERMANY aufgelegt, in dessen Rahmen repräsentative Reihenmessungen an 12.000 Frauen, Männern und Kindern in Deutschland durchgeführt worden sind. Es entstand so ein einmaliger Satz an anthropometrischen Daten, wie er bisher in dieser Präzision weltweit nicht verfügbar war[4]. Auf der Grund-

4 Wenn man für den Erhalt anthropometrischer Daten, wie das normalerweise geschieht, Zufallsstichproben (oder sonst nach bestimmten Kriterien geschichtete Proben) nimmt, so sind aufgrund der Verteilung der Körpergrößen, die mit guter Näherung durch die Gaußverteilung beschrieben werden kann, die Kleinen und die Großen prinzipiell unterrepräsentiert. Da man aber in etwa die Verteilung der Körpergrößentypen kennt, wurde bei SizeGermany darauf geachtet, dass von jeder Größengruppe die gleiche Anzahl gemessen wird. Dadurch erhält man gerade für die Randgruppen weitaus präzisere Werte als dies bei der üblichen Datenerhebung möglich ist.

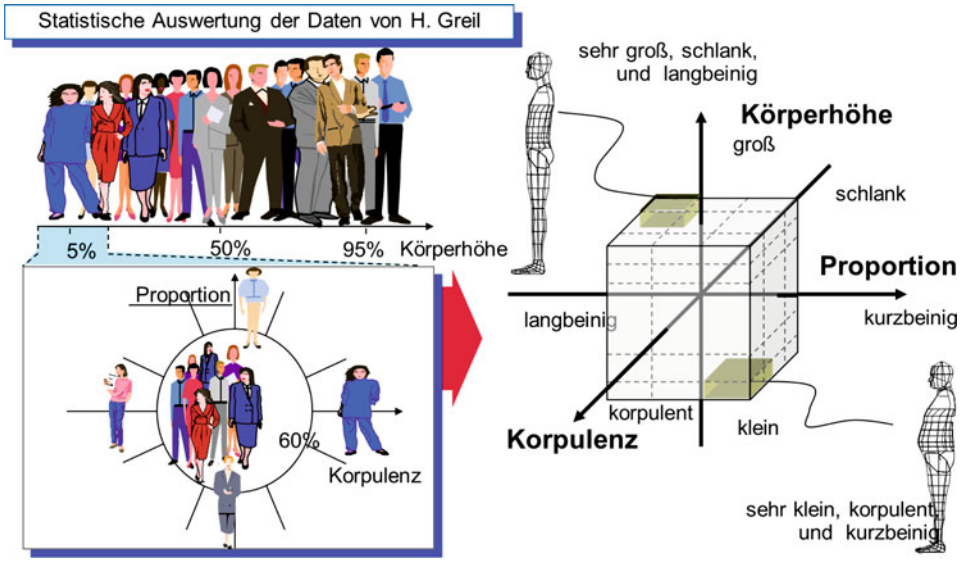


Abb. 5.20 Statistisches Verfahren zur Generierung der 45 RAMSIS-Typen

lage dieses Datensatzes wird in der Folgezeit eine Neuauflage des ramsis entwickelt, die so genannte Ramsis-Next-Generation, die eine noch bessere Anpassung an unterschiedliche Proportionen der menschlichen Erscheinungsform bereitstellen wird. Zurzeit entsteht eine auf der Grundlage von SizeGERMANY basierende Meßreihe „SizeITALY". Ähnliche Daten liegen auch für Frankreich und Spanien vor. Auf diese Art und Weise entsteht sukzessive eine weltumfassende Anthropometrie, die weit über alle bisher vorliegenden Messumfänge hinausgeht.

Zur anthropometrischen Modellierung der erhobenen Daten wurde auf faktoranalytische Ergebnisse Bezug genommen, wonach Körperhöhe und Korpulenz zwei weitgehend unabhängige Faktoren darstellen. Wegen der gerade in engen Fahrzeugkabinen aufkommenden Problemstellungen wurde als dritter Faktor die Proportion hinzugenommen, die durch das Verhältnis von Stammlänge zu Körperhöhe definiert ist. Individuelle Körpermaße können somit in den dreidimensionalen Raum, der durch diese Achsen aufgespannt wird, eingeordnet werden (Geuß 1995). Ausgehend von einem durch die Körperlänge bestimmten Größentyp (z. B. 5. Perzentil mit einem Bereich vom 2,5.–7,5. Perzentil; siehe auch Abb. 5.20, links) werden nun für die verbleibenden Dimensionen „Korpulenz" und „Proportion" eine mittlere Ausprägung und acht extreme Ausprägungen definiert. Auf diese Weise entstehen mit den gewählten fünf Körpergrößentypen 45 Typen für jedes Geschlecht, die in ihren Proportionen den in einer aufwendigen Untersuchung von Greil (1993) gefundenen Proportionen entsprechen (siehe Abb. 5.20). Nachdem für diese Untersuchungen alle entsprechenden Korrelationen gerechnet wurden, ist es in einer weiteren Entwicklungsstufe von RAMSIS für spezielle Untersuchungen möglich, – ausgehend von beliebigen Leitmaßen – durch den sog. „Body-Builder" Extremtypen zusammenzustellen, wobei die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten dieses Typs jeweils angegeben werden kann.

Zur Erstellung eines Modells der Haltungskomfortprognose wurden unterschiedliche Versuche und Studien durchgeführt (Seidl 1994). Das wichtigste Werkzeug dabei war ein variables Fahrzeug-Mock-Up, welches eine flexible Einstellung der Fahrzeuginnenraummaße ermöglichte. Pedal-, Sitz- und Lenkradpositionen waren frei konfigurierbar, so dass Fahrzeugkonzepte vom Sportwagen bis zum Van darstellbar sind. In den Versuchen wurden verschiedene Einstellungen vorgenommen. Die Versuchspersonen hatten in dem Fahrerstand eine Fahraufgabe, die ihnen über einen einfachen Simulator dargeboten wurde. Während des Versuchs wurden die Versuchspersonen mit Videokameras

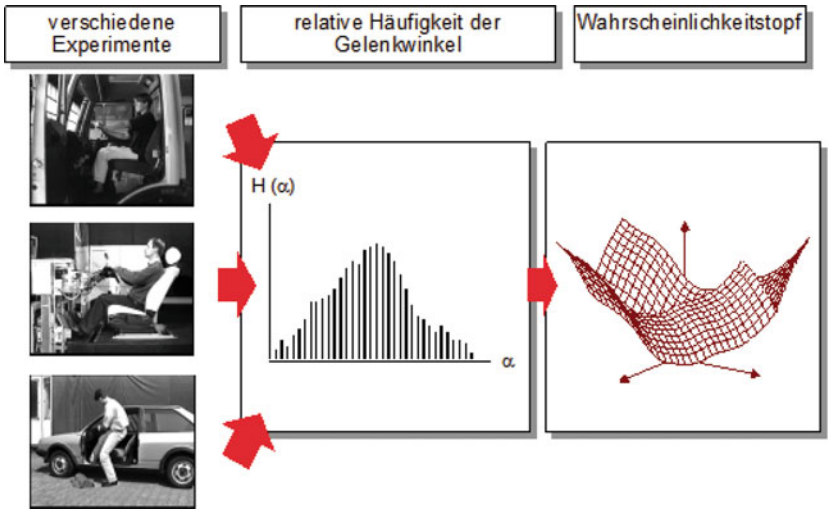


Abb. 5.21 Versuchsablauf zur Bestimmung des Wahrscheinlichkeitstopfs in den Gelenken (Beispiel Schultergelenk)

aufgezeichnet, ihre Körperhaltung wurde mit der oben beschriebenen PCMAN-Methode erfasst. Nach den Versuchen hatten die Versuchspersonen Fragebögen zum Haltungskomfort, zur Ermüdung und zur Verspannung einzelner Körperteile auszufüllen. Weitere Experimente ergänzten diese grundlegende Untersuchung:

- *Erreichbarkeitsuntersuchungen:* Hierbei hatten die Versuchspersonen verschiedene Kfz-typische Bedienelemente zu manipulieren. Die Haltungen bei der Bedienung wurden nach der beschriebenen Methode registriert.
- *Umsichtuntersuchungen*: Die Versuchspersonen wurden aufgefordert, auf aufleuchtende Lampen zu blicken, die um den Fahrerstand aufgebaut waren und in zufälliger Reihenfolge angesteuert wurden. Die Haltungen, die dabei eingenommen wurden, wurden ebenfalls registriert. Dieser Versuch ist eine wesentliche Basis für die Sichtsimulation im RAMSIS-CAD-Ergonomietool. Daraus konnte hergeleitet werden, welche Sichtaufgaben aus den Augenwinkeln gelöst werden, und wann und wie stark der Kopf gedreht werden muss, um Sichtziele noch zu erkennen.
- Weiterhin wurde die Sitzposition von Probanden in *Lastwagen* untersucht. Dazu stellte die Fa. Mercedes Benz AG ein Experimentalfahrzeug zur Verfügung, das ähnlich dem beschriebenen Fahrerstand bezüglich seines Maßkonzeptes frei einstellbar war.

In allen genannten Untersuchungen zur Erstellung des Haltungsmodells wurde die Körperhaltung erfasst. Diese liegt in Form von Raumwinkeln für jedes Körperelement vor. Die Analyse der Winkelverteilungen zeigt, dass sich für einige Körperelemente sehr „scharfe" Verteilungskurven ergeben. Dies bedeutet, dass der Mensch bei diesen Körperelementen immer einen bestimmten Winkel weitgehend unabhängig von der Versuchskonstellation einstellen möchte, den er auch als erträglich empfindet (z. B. in der Hüfte). Bei anderen Körperelementen hingegen ist der Mensch hinsichtlich der Körperelementwinkel unkritisch, die Winkelverteilung ist, abgesehen von den Randbereichen, ziemlich flach: von den Versuchspersonen wurde kein spezieller Winkel bevorzugt bzw. als besonders unkomfortabel eingestuft.

Durch Transformation dieser Messergebnisse in mathematische Formeln (diese müssen stetig differenzierbar sein) entstehen für jedes Gelenk sogenannte Wahrscheinlichkeitstöpfe (Abb. 5.21). Mit einem speziellen Optimierungsverfahren sucht die Software dann in der Anwendung bei gestellten Aufgaben immer den tiefsten Punkt innerhalb des so entstehenden multidimensionalen Gebirges an Winkelwahrscheinlichkeiten. Auf diese Art und Weise errechnet das System stets die wahrscheinlichste Haltung, welche die Personen unter den gestellten Randbedingungen einnehmen würden.

Es fand eine Reihe von Validierungsversuchen statt, die die Relevanz des Wahrscheinlichkeits-

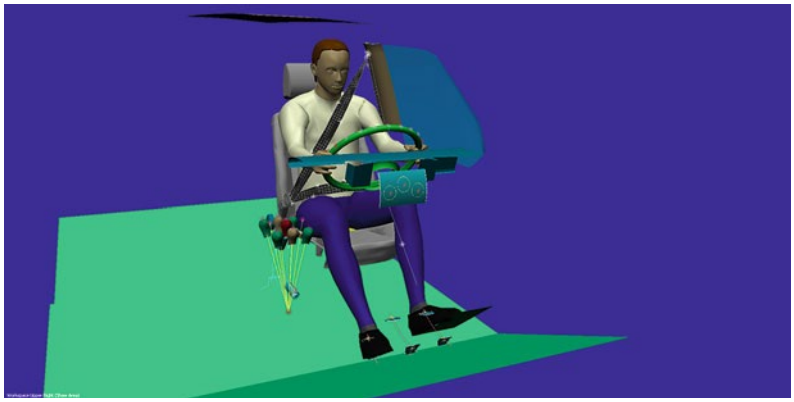


Abb. 5.22 RAMSIS

modells für die Vorhersagen von Haltungen speziell im Kraftfahrzeug eindeutig nachwiesen (zum Beispiel Kolling 1997).

Die beschriebenen Versuche und die Modellierungen deren Ergebnisse sind die Grundlage für die fahrzeugspezifischen Fähigkeiten von RAMSIS, nämlich:

- die Simulation von realistischen und statistisch abgesicherten Körperhaltungen in Abhängigkeit der gegebenen geometrischen Einschränkungen,
- die Bewertung des Komfortempfindens bei gegebener Haltung,
- ergonomische Analysefunktionen z. B. für die Sicht oder den Gurtverlauf.

Diese grundlegenden Funktionen von RAMSIS werden durch noch weitere Module ergänzt. So ermöglicht das Modul „RAMSIS-dynamisch" die auf experimenteller Basis fußende Simulation von Hand- und Fußbewegungen des im Fahrzeug sitzenden Menschmodells. Speziell für die PKW-Maßkonzeption steht heute das Modul „der Package Designer" zur Verfügung (siehe Abb. 5.22). Neben verschiedenen anderen Möglichkeiten liefert das Modul „RAMSIS sitzt" eine weitgehend korrekte Positionierung des Menschmodells in einen durch physikalische Eigenschaften beschriebenen Sitz. Eine signifikante Verbesserung der Funktionalitäten, die mit der Sicht in Verbindung stehen, wurde durch das erst kürzlich erstellte Modul „RAMSIS kognitiv" von Remlinger (2013) erstellt. RAMSIS wurde dabei um wichtige Analyse- und Auslegungsfunktionen zur Berücksichtigung der visuellen Wahrnehmung ergänzt: Das Ziel war u. a., die faktisch gegebene Verzahnung der systemergonomischen Auslegung von Anzeige- und Bedienelementen und der geometrischen Lokalisation, die durch anthropometrische Bedingungen bestimmt wird, gerecht zu werden. Die Analysefunktionen beziehen sich auf Sicht- und Blickfeld, Brillensicht, physiologische und psychologische Blendung, Aspekte der Akkommodation, der Sehschärfe und der verminderten Informationsaufnahme durch Blickabwendungszeiten. Der Vorteil, die Situation aus dem Blickwinkel von Fahrern unterschiedlicher Anthropometrien zu berechnen, wirkt sich auch auf die Analysefunktionen bezüglich der geometrisch-optischen Grenzen der visuellen Wahrnehmung aus. Es wurden besondere Funktionen für die Kalkulation von geometrischen Verdeckungen (A-Säulenproblematik), den eingeschränkten Einblickwinkeln von LCDs und der Positionierung der Optik von HUDs entwickelt. Eine weitere Analysefunktion bezieht sich auf die physiologischen Grenzen, welche die direkte Sicht auf das Verkehrsgeschehen beeinflussen. Ergänzt werden die neuen RAMSIS-Funktionen noch durch das sog. Daimler-Scholly-Verfahren (siehe ▶ Abschn. 6.3), das eine auf experimenteller Basis begründete Bewertung von Sichtbereichen vorsieht.

Nicht zuletzt wegen dieser ganz spezifischen fahrzeugbezogenen Möglichkeiten wird RAMSIS heute fast weltweit (nach Angaben von Human Solutions zu 90 %) in der Automobilindustrie zur Packagebewertung und -konstruktion eingesetzt, da nahezu alle Populationen anthropometrisch repräsentiert werden können (wie z. B. Deutsche, Japaner,

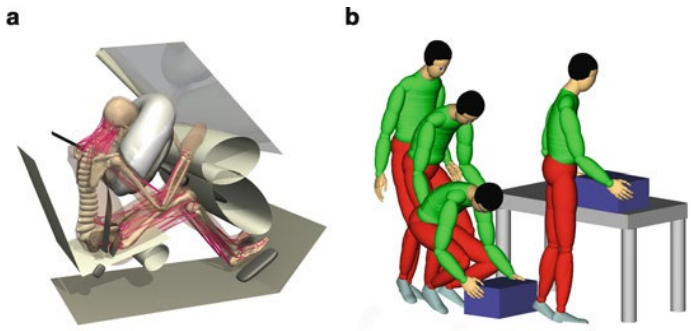


Abb. 5.23 Biomechanisches Modell MADYMO (*links*, "Courtesy TASS International and TNO"; Meijer et al.2012, 2013) www.tassinternational.com und DYNAMICUS *(rechts)*

Koreaner oder Amerikaner). Neben Erwachsenen können auch Kinder simuliert werden. RAMSIS findet darüber hinaus auch Einsatz bei der Auslegung von Motorrädern, Flugzeugen, Baumaschinen und Flurförderfahrzeugen sowie anderen Arbeitsplätzen. Ein weiteres Einsatzgebiet entsteht in Verbindung mit Virtual Reality, da bei dieser das sog „Helm Mounted Display" verwendenden Technik der agierende Operateur seinen eigenen Körper (z. B. die Hände) nicht sehen kann. Die entsprechenden Körperelemente werden dann durch RAMSIS visualisiert, wobei sie von der Position der realen Körperteile des Probanden, an die entsprechende Marker angebracht sind, gesteuert werden (siehe ► Abschn. 10.3.3.2).

5.2.2.3 Biomechanische Menschmodelle

Im Gegensatz zu den anthropometrischen Modellen wird bei den biomechanischen Modellen weniger Wert auf einen präzise Wiedergabe bzw. Modellierung der körperlichen Abmessungen, sondern vielmehr auf die mechanisch-dynamischer Eigenschaften gelegt. Man gibt sich dabei oft sogar mit den drei wichtigen Perzentilen für das jeweilige Geschlecht zufrieden. Biomechanische Modelle nutzen Computerprogramme zur Realisierung von Mehrkörpermechanik, die selbst wieder entweder nach dem d'Alembertschen Prinzip (Realisierung des Kräftegleichgewichts unter Berücksichtigung statischer und dynamischer Kräfte) oder auf der Lagrange-Funktion (ein System ist vollkommen beschrieben durch die Energie der Bewegung und die potentielle Energie) beruhen. Das Programmsystem ADAMS, das ganz allgemein für die Berechnung von mechanischen Problemen entwickelt wurde und das auf das d'Alembertschen Prinzip zurückgreift, stellt ein biomechanisches Menschmodell zur Verfügung. Mit Hilfe des die Lagrange-Funktion nutzenden Systems SIMPACK wurde ebenfalls ein biomechanisches Menschmodell entwickelt, mit dessen Hilfe verschiedene Detailprobleme (z. B. Bewegungsmechanik des Knies) untersucht wurden. Von großer Bedeutung ist heute das bei TNO (Niederlande) entwickelte Menschmodell MADYMO (siehe ◘ Abb. 5.23 links), das zunächst die Eigenschaften von Crash-Dummies im Computer simulieren sollte und deshalb in seinen anthropometrischen Eigenschaften diese wiedergibt. In jüngster Zeit wurden allerdings im Zusammenhang mit verschiedenen Fragestellungen Anpassungen an die Anthropometrie, die RAMSIS zur Verfügung stellt, vorgenommen. Ein Modell, das die Durchgängigkeit von der individuellen Versuchsperson, gemessen mittels PCMAN über RAMSIS, zu einer biomechanischen Repräsentation ermöglicht, ist das Modell DYNAMICUS, das auf dem an der Universität Chemnitz entwickelten Mehrkörpersystem-Programm *alaska* basiert (◘ Abb. 5.23 rechts). Über diesen Weg können zumindest die individuellen Abmessungen der Gelenk-zu-Gelenkabstände sowie die Massen und Trägheitsmomente der einzelnen Körperteile, welche sich aufgrund der weitgehend korrekten RAMSIS-Geometrie und Annahme eines mittleren spezifischen Gewichts der Person berechnen lassen, auf das Modell korrekt übertragen werden. Die Festlegung von Gelenksteifigkeiten, Beschreibung der Muskulatur durch Feder-Dämpferelemente und ähnliches bleibt immer eine dem Geschick des Anwenders überlassene Detailaufgabe.

Biomechanische Modelle können zudem unter Einbeziehung von FEM-Methoden dazu ausgebaut werden, die Flächendruckverteilung im Kontakt

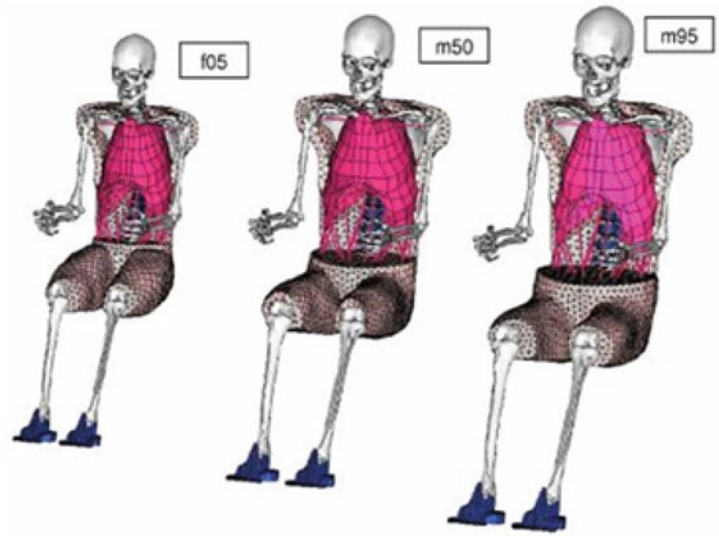


Abb. 5.24 Das biomechanische Menschmodell CASIMIR in drei unterschiedlichen Perzentilen

Abb. 5.25 Das Modell AnyBody, das die bisher präziseste Simulation das Muskeleinsatz ermöglich

kenntnisse versprechende Methode besteht darin, mittels computerbasierter Messung Bewegungen von realen Versuchspersonen zu erfassen und die aktiven Kräfte in biomechanischen Modellen über ein mathematisches Optimierungsverfahren so zu bemessen, dass die Bewegungen des Modells mit den gemessenen Bewegungen übereinstimmen. Auf diese Weise könnte man sozusagen indirekt die aufgewendeten Kräfte messen. Voraussetzung eines solchen Verfahrens ist das Zusammenführen von biomechanischen und anthropometrischen mit der Umgebung (z. B. einem Sitz) zu berechnen, wobei sowohl für den Sitz als auch für das entsprechende Körperteil elastische Eigenschaften modelliert werden. Auf dieser Grundlage entstand das Model CASIMIR, das speziell für Berechnung der Druckverteilung zwischen Sitz und Körper bereits in einer frühen Phase der Entwicklung genutzt werden soll (Abb. 5.24). Nach Knauer (2010) stellt CASIMIR derzeit das umfassendste biomechanische Modell des Menschen dar, welches speziell die komplette Anatomie des sitzenden Menschen insbesondere sämtliche Weichteile der Oberschenkel, des Gesäßes und des Rückens in einem FE-Modell abbildet. Bauch- und Rückenmuskulatur wird dabei über nichtlineare und frequenzabhängig Feder-/Dämpferelemente wiedergegeben. Über einen Optimiermechanismus mit dem Ziel, die vom Körper aufzubringende Energie zu optimieren, wird die Muskelaktivität bestimmt.

Biomechanische Modelle werden verwendet, um die passive Reaktion des Menschen auf äußere Krafteinwirkungen zu untersuchen. Die Berechnung der Reaktionskräfte beim Crash aber auch bei Schwingungsanregungen auf Sitzen sind häufige Anwendungsgebiete. Im Bereich der Sportwissenschaften hat sich etabliert, in diese Modelle aktive Kräfte einzuführen und so den Ablauf komplexer Sportbewegungen aus theoretischer Sicht zu untersuchen. Eine in der Zukunft wichtige Er-

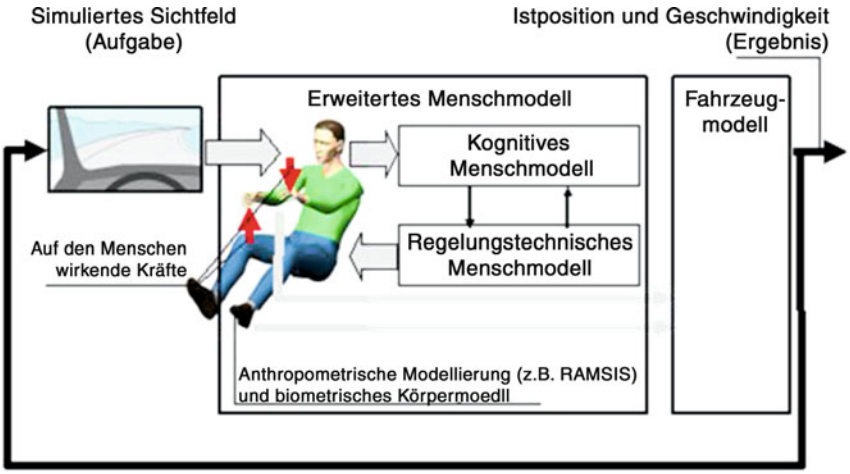


Abb. 5.26 Gesamtstruktur eines biomechanisch-anthropometrisch-kognitiven Menschmodells zum Zweck der Anpassung von Fahrzeugeigenschaften an generelle Eigenschaften des Fahrers

Modellen, die an die individuellen Maße der jeweiligen Versuchsperson angepasst sind. Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekte REALMAN wurde ein erster Ansatz eines solchen Vorgehens bereits durchgeführt. Auch das an der Dänischen Universität Aalborg entwickelte Modell AnyBody, welches eine sehr präzise Modellierung der Muskelanbindung an das Skelett bereitstellt (siehe Abb. 5.25), wird heute in der Automobilindustrie genutzt, um den Komfort anbelangende Fragen zu objektivieren. Es besteht ein Kooperationsprozess zwischen diesem Modell und RAMSIS, so dass AnyBody von dessen guten anthropometrische Daten profitieren kann. Desgleichen existiert zurzeit ein Kooperation Projekt zwischen CASIMIR (Wölfel und Partner), RAMSIS (HumanSolutions GmbH) und dem Lehrstuhl für Ergonomie (TUM), mit dem Ziel, Sitzdruckverteilungen bereits in der Konzeptphase zu messen und unter Diskomfortaspekten zu bewerten.

5.3 Zusammenfassende Würdigung des Nutzens von Menschmodellierung

Wie eingangs bereits angedeutet, kann es eine durchaus Erfolg versprechende zukünftige Entwicklung der Modellierung sein, nicht nur regelungstechnische und kognitive Modelle miteinander zu verbinden, sondern auch anthropometrische bzw. biomechanische Modelle (siehe hierzu Sträter 2001). Besonders durch die Methoden der Multi-Body-Simulation und der inversen Kinematik ist es damit möglich, beispielsweise den Einfluss der Körperhaltung auf die Lenkpräzision und diese wiederum in Abhängigkeit von unterschiedlichen Körperbautypen zu prognostizieren (siehe hierzu auch Jürgensohn 2002). Abbildung 5.26 zeigt das Konzept eines solchen integrierten Modells, wie es auch von Bubb (2002) vorgeschlagen wurde. Auch eine solche Modellierung hat zum Ziel, technische Maßnahmen abzuleiten, durch die eine immer bessere Anpassung an generelle Eigenschaften des Menschen erreicht werden soll. Individuelle Anpassungen an anthropometrische Bedingungen und gegebenenfalls sogar individuelle Anpassungen an kognitive Eigenschaften des Menschen sind ein weiteres zukünftiges Forschungsfeld.

Literatur

Verwendete Literatur

Aasman, J.: Modelling Driver Behaviour in Soar. Dissertation, Rijksuniversiteit te Groningen (1995)

Anderson, J.: How Can the Human Mind Occur in the Physical Universe? Oxford University Press, New York (2007)

Anderson, J.R., Byrne, M.D., Douglass, S., Lebiere, C., Qin, Y.: An Integrated Theory of the Mind. Psychological Review **111**(4), 1036–1050 (2004)

Appel, A., Mitschke, M.: Adjusting Vehicle Characteristics by Means of Driver Models. International Journal of Vehicle Design **18**(6), 583–596 (1997)

Aune, I.A., Jürgens, H.W.: Computermodelle des menschlichen Körpers. Bericht Nr. 27 - Auftragsstudie des Bundesamtes

für Wehrtechnik und Beschaffung. Dokumentationszentrum der Bundeswehr, Koblenz (1989)
Baron, S., Kleinmann, D.L.: The Human as an Optimal Controller and Information Processor. IEEE Transactions on Man-Machine-Systems **10**(1), 9–17 (1969)
Baron, S., Levison, W.H.: Display Analysis with an optimal control model of the human Operator. Human Factors **19**, 437–457 (1977)
Baron, S., Levison, W.H.: The Optimal Control Model: Status and Future Directions. IEEE Transactions on Man-Machine-Systems **21**, 90–100 (1980)
Bellet, T., Bornard, J.C., Mayenobe, P., Gruyer, D.: A computational model for car drivers Situation Awareness simulation : COSMODRIVE. In: . Proceedings of the First International Symposium on Digital Human Modeling Lyon, France, June 14-16. (2011)
Bolte, U., Bubb, H.: Regelungstechnische Simulation der Schnittstelle Mensch-Maschine. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft **44**, 6–13 (1990)
Bonney, M.C., Evershed, D.G., Roberts, E.A.: Sammie – A Computer Model of Man and His Environment. In: Proceedings of the 1969 Annual Scientific Meeting of the Ergonomics Research Society. Bristol (1969)
Bornard, J.-C., Bellet, T., Mayenobe, P., Gruyer, D., Claverie, B.: A perception module for car drivers' visual strategies modeling and visual distraction effect simulation. In: Proceedings of the First International Symposium on Digital Human Modeling Lyon, France, June 14-16, 2011. (2011)
Bösch, P.: Der Fahrer als Regler. Dissertation, TU Wien (1991)
Braess, H.-H.: Untersuchung des Seitenwindverhaltens des Systems Fahrer-Fahrzeug Deutsche Kraftfahrtforschung, Bd. 206. (1970)
Braun, H.: Rechnerische Simulation der Fahrdynamik von Nutzfahrzeugen unter Einschluss von Fahrer und Umwelt VDI-Broschüre, Bd. 613. VDI-Verlag, Düsseldorf (1986)
Bubb, H.: Menschliche Zuverlässigkeit. – Definitionen, Zusammenhänge, Bewertung. Ecomed, Landsberg (1992)
Bubb, H.: Computer Aided Tools of Ergonomics and System Design. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing **12**(3), 249–265 (2002)
Bubb, H.: Digitale Mensch-Modelle. In: Landau, K. (Hrsg.) Lexikon der Arbeitsgestaltung, S. 454–458. Gentner-Verlag, ergonomie Verlag, Stuttgart (2007)
Carrier, R., Gilbert, R., Schiettekatte, J., Belanger, A., De Chamlain, B., Fortin, C.: A Micro Computer-Aided Workstation Design and Analysis. In: Proceedings of the 20th Annual Conference of Human Factors Association of Canada October 14 – 17, 1987. Human Factors Association of Canada, Mississanga, Ontario (1987)
Carson, J.M., Wierwille, W.W., Eastman, C.: Development of a Strategy Model of the Driver in Lane Keeping. Vehicle System Dynamics **7**(4), 233–253 (1978)
Crossman, E. R. F. W., Szostak, H., Cesa, T. L.: Steering Performance of Automobile Drivers in Real in Contact-Analog Simulated Tasks. Human Factors Society 10th Annual Meeting, Anaheim, Kalifornien, (zitiert nach McRuer und Klein, 1975) 1968 (1966).
Crossman, E.R.F.W., Szostak, H.: Man-Machine-Models for Car-Steering. Forth Annual NASA – University Conference on Manual Control. National Aeronautics and Space Administration, Washington (1969)
Dey, D., Kirchhoff, U.: Beschreibungsmöglichkeiten für Mehrgrößenregeleigenschaften des Menschen bei der Fahrzeugführung ILR-Bericht, Bd. 6. Institut für Luft und Raumfahrt, Technische Universität Berlin, Nr (1975)
Donges, E.: Ein Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug Bericht, Bd. 27. Gesellschaft für angewandte Naturwissenschaften, Forschungsinstitut für Anthropotechnik, Meckenheim (1977)
Donges, E.: Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug. Zeitschrift für Verkehrssicherheit **24**, 98–112 (1978)
Donges, E.: Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. Automobil-Industrie 27(2), 183–190 (1982)
Dreyfuss, H.: The Measure of Man: Human Factors in Design. Whitney Library of Design, New York (1959)
Eckstein, L.: Entwicklung und Überprüfung eines Bedienkonzepts und von Algorithmen zum Fahren eines Kraftfahrzeugs mit aktiven Sidesticks Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 12, Bd. 471. VDI-Verlag, Düsseldorf (2001)
Elkind, J.I.: Characteristics of Simple Manual Control Systems TR, Bd. 111. MIT (1956)
Elkind, J.I.: A Survey of the Development of Models for the Human Controller. In: Longford, R. (Hrsg.) C. Guidance and Control II. Munde, New York. (1964)
Elkind, J.I., Fall, P.L., Baron, S., Kleinmann, D.L., Levison, W.H.: An Optimal Control Method for Predicting Control Characteristics and Displays. Requirements of Manned Vehicle Systems (1968). AFFDL-TR-67-187
Feraric, J. P.: Echtzeitfähige Modellierung des individuellen Fahrerverhaltens zur Realisierung adaptiver Unterstützungsfunktionen in einem Monitor- und Warnsystem. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 1996 (1996)
Feraric, J.P., Onken, R.: DAISY- A Driver Assisting System Which Adapts to the Driver. In: Proc. of the Man-Machine-Systems (MMS '95) Cambridge, Mass., 27.-29. Juni 1995 (1995)
Feraric, J.P., Onken, R., Kopf, M.: Modellierung eines Fahrernormalverhaltens mit Hilfe Neuronaler Netze und Interpretation der Abweichung in einem Monitor- und Warnsystem. In: Gärtner, K.-P. (Hrsg.) Menschliche Zuverlässigkeit. Maßnahmen zur Eingrenzung menschlichen „Versagens" DGLR-Bericht, Bd. 92-04, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e. V., Bonn (1992)
Fiala, E.: Lenken von Fahrzeugen als kybernetische Aufgabe. Automobiltechnische Zeitschrift **68**(5), 156 (1966)
von Garrel, U., Otto, H.J., Onken, R.: Adaptive Modellierung des fertigkeits- und regelbasierten Fahrerführungsverhaltens VDI-Berichte, Bd. 1613., S. 239–262 (2001)
Gärtner, K.P., Schweingruber, J.: Innenraumgestaltung mit rechnergestützten Mensch-Modellen VDI-Bericht, Bd. 948. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf (1992)
Geoffrey, S.P.: A 2-D Manikin – The Inside Story Paper, Bd. 267 A. Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale (1961)

Geuß, H.: Entwicklung eines anthropometrischen Meßverfahrens für das CAD-Menschmodell RAMSIS; Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie der TU-München (1995)

Greil, H.: „Körperbaugerechte Mittelwerte und Variabilitätsbereiche von Körpermaßen im Erwachsenenalter zur Regenerierung mit dem Programmsystem RAMSIS", Abschlußbericht einer Auftragsstudie vom 5.3.93, unveröffentlicht (1993)

Harsenhorst, Jd.V., Lourens, P.: Classification of Driver Errors and Analysis of Driver Performance Parameters Technical Report, Bd. 87-25. University of Groningen, Traffic Research Center, The Netherlands (1988)

Hayhoe, G.E.: A Driver Model Based on the Cerebellar Modell Articulation Controller. Vehicle System Dynamics 8(8), 49–72 (1979)

Helbig, K., Jürgens, H.W.: Forschungsbericht/Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung Entwicklung einer praxisgerechten Körperumrißschablone des sitzenden Menschen, Bd. 187. Wirtschaftsverl. NW in Komm., Dortmund. Bremerhaven (1977)

Hickey, D., Pierrynowski, M.R., Rothwell, P.: Man-Modeling CAD-Programs for Workspace Evaluations. University of Toronto, Kanada (1985). Vortragsmanuskript

Horn, A. (1986): Fahrer-Fahrzeug-Kurvenfahrt auf trockener Straße. Dissertation, Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig.

Hosman, R.J., Benard, B., Frourquet, H.: Active and Passive Sidestick Controllers in Manual Aircraft Control. In: Proceeding of the IEEE, International Conference on Systems, Man and Cybernetics L.A. (CA) USA, Nov. 4 – 7, 1990. S. 527–529. (1990)

Huang, P.: Regelkonzepte zur Fahrzeugführung unter Einbeziehung der Bedienelementeigenschaften, Dissertation an der Technischen Universität München (2004)

Jenik, P.: Biomechanische Analyse ausgewählter Arbeitsbewegungen des Armes. Beuth-Verlag, Berlin, Köln, Frankfurt (1973)

Johannsen, G., et al.: Parametrische quasi-lineare Modelle für den Menschen als Regler. In: Johannsen, G., Boller, H.E., Donges, E. (Hrsg.) Der Mensch im Regelkreis – Lineare Modelle. R. Oldenbourg Verlag, München Wien (1977)

Jürgensohn, G.: Hybride Fahrermodelle. Dissertation an der Technischen Universität Berlin ZMMS Spektrum, Bd. 4. Pro Universitate Verlag, Würzburg (1997)

Jürgensohn, T.: Bedienermodellierung. In: Timpe, K.-P., Jürgensohn, T., Kolrep, H. (Hrsg.) Mensch-Maschine-Systemtechnik - Konzepte, Modellierung, Gestaltung, Evaluation. Symposion Publishing, Düsseldorf (2002)

Kleinmann, D.L.: Optimal Control of Linear Systems with Time-Delay and Observation Noise. IEEE Transactions on Automatic Control **AC-14**, 524–527 (1969)

Kleinmann, D.L., Curry, R.E.: Some New Control Theoretic Models for Human Operator Display Monitoring. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics **SMC-7**, 778–784 (1977)

Kleinmann, D.L., Baron, S., Levison, W.H.: A Control Theoretic Approach to Manned-Vehicle Analysis. IEEE Transactions on Automatic Control **AC-16**(6), 824–832 (1971)

Knauer, P.: Objektivierung des Schwingungskomforts bei instationärer Fahrbahnanregung. Dissertationsschrift an der Technischen Universität München (2010)

Kolling, J.: Validierung und Weiterentwicklung eines CAD-Menschmodells für die Fahrzeuggestaltung, Dissertation an der Technischen Universität München, 1997 (1997)

Kondo, M.: Richtungsstabilität (wenn Steuerbewegungen hinzukommen). Journal of the Society of Automotive Engineers of Japan **7**(5, 6), 104–106 (1953). auf Japanisch

Kramer, U.: On the Application of Fuzzy Sets to the Analysis of the System Driver-Vehicle-Environment. Automatica **21**(1), 101–107 (1985)

Kramer, U., Rohr, G.: A Model of Driver Behaviour. Ergonomics **25**(10), 891–907 (1982)

Kroll, C.V., Roland, R.D.: A Preview-Predictor Model of Driver Behaviour in Emergency Situations Report, Bd. VJ-2251-V-6. Cornell Aeronautical Laboratory (1970)

Lieberman, E.B., Goldblatt, R.A.: A Review of Driver-Vehicle Effectiveness Model Final Report under NHTSA Contract, Bd. DTNH22-80-C-07082 (DOT-HS 806110. (1981)

McRuer, D.T., Jex, H.R.: A Review of Quasi-linear Pilot Models. IEEE Trans. Human Factors in Electronics HFE-3, 231–249 (1967). NASA CR-1212

McRuer, D.T.: Human Dynamics in Man-Machine-Systems. Automatica **16**, 237–253 (1980)

McRuer, D.T., Jex, H.R.: A Review of Quasi-Linear Pilot Models. IEEE Transactions on Human Factors in Electronics **8**(3), 231–249 (1967)

McRuer, D.T., Krendel, E.S.: Dynamic Response of Human Operator (1957). WADC-TR-56-523

McRuer, D.T., Krendel, E.S.: Mathematic Models of Human Pilot Behaviour AGAR Dograph, Bd. 188. Advisory Group for Aerospace Research and Development, Neuilly sur Seine, France (1974)

McRuer, D.T., Allen, R.W., Weir, D.H., et al.: New Results in Driver Steering Control Models. Human Factors **19**(4), 381–397 (1977)

McRuer, D.T., Jex, H.R., Clement, W.F., Graham, D.: Development of a Systems Analysis Theory of Manual Control Displays Report, Bd. TR-163-1. System Technology Inc., (1967)

Meijer, R., Elrofai, H., Broos, J., van Hassel E. (2013): Evaluation of an Active multi-body human model for braking and frontal crash events, 23rd Enhanced Safety of Vehicles (ESV) conference, Seoul, Korea

Meijer R., van Hassel E., Broos J., Elrofai H., van Rooij L., van Hooijdonk P. (2012): Development of a Multi-Body Human Model that Predicts Active and Passive Human Behaviour, International Research Council on Biomechanics of Injury (IRCOBI) conference, Dublin, Ireland

Miura, T.: Coping with Situational Demands: A Study of Eye-Movements and Peripheral Vision Performance. North-Holland, Amsterdam, S. 126–137 (1986)

Mühlstedt, J., Kaußler, H., Spanner-Ulmer, B.: Programme in Menschengestalt: Digitale Menschmodelle für CAx und PLM-Systeme. ZfA 2–2008, 79–86 (2008)
Müller, A.: Systematische und nutzerzentrierte Generierung des Pkw-Maßkonzepts als Grundlage des Interior- und Exterioordesign. Dissertation an der Universität Stuttgart (2010)
Nagai, M.: Adaptive Behaviour of Driver-Car Systems in Critical Situations. In: Proc. of the International AMSE Summer Conference „Modelling and Simulation" Nice, France (1983)
Neculau, M.: Modellierung des Fahrerverhaltens: Regel- und Steuerstrategien. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik (Hrsg.) Das Mensch-Maschine-System im Verkehr VDI Berichte, Bd. 948, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf (1992)
Neculau, M., Jürgensohn, T., Willumeit, H.-P.: Model of the Driver Lateral Control behaviour and scanning pattern. In: Proc. of the 9th European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control Lyngby, Denmark, 1989. (1990)
Newell, A.: Unified Theories of Cognition. Harvard University Press, Cambridge, MA (1990)
Niemann, K.: Messungen und Berechnungen über das Regelverhalten von Autofahrern. Dissertation, TU Braunschweig, Institut für Fahrzeugtechnik, 1972 (1972)
Oppelt, W., Vossius, G.: Der Mensch als Regler. VEB Verlag Technik, Berlin (1970)
Perel, M.: The Development of a Computer Simulation Model of Driver Performance to Predict Accident Probability. In: Proc. of the Human Factors Society, 26th Annual Meeting, S. 239–244 (1982)
Pew, R. W.: Temporal Organization in Skilled Performance. Ph.D. Thesis, Univ. of Michigan (1963)
Plavšic, M.: Analysis and Modeling of Driver Behavior for Assistance Systems at Road Intersections. Dissertation an der Technischen Universität München (2010)
Plavšic, M., Guzman, E., Bengler, K.: Modelling Control Behavior for the Cognitive Driver Model. In: The Second European Conference on Human Centered Design for Intelligent Transport System, HUMANIST Berlin, Germany, April, 2010 (2010)
Plöchl, M., Lugner, P.: Theoretical Investigation of the Interaction Driver – Feedback-Controlled Automobile SAE Paper, Bd. 9438006 (1994)
Pommerleau, D.A.: Efficient Training of Artificial Neural Networks for Autonomous Navigation. Neural Computation (3), (1991)
Poulton, E.C.: Tracking Skill and Manual Control. Academic Press, New York (1974)
Prokop, G.: Fahrermodellierung durch Model-prädiktive Optimierung. In: Der Fahrer im 21. Jahrhundert VDI-Berichte, Bd. 1613, S. 219–238 (2001)
Radonjic, R.: Definition and Measurement of Vehicle Handling Characteristics. International Journal of Vehicle Design **11**(2), 166–170 (1990)
Rasmussen, J., et al.: The definition of human error and a taxonomy for technical system design. In: Rasmussen, J. (Hrsg.) New technology and human error. Wiley & Sons Ltd., New York (1987)
Reddy, R.N., Ellis, J.R.: Contribution to the Simulation of Driver Vehicle Road System SAE Paper, Bd. 810513 (1982)
Reichelt, W.: Ein adaptives Fahrermodell zur Bewertung der Fahrdynamik von Pkw in kritischen Situationen. Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig (1990)
Reichelt, W., Strackerjan, B.: Bewertung der Fahrdynamik von Pkw im geschlossenen Regelkreis mit Hilfe von Fahrsimulatoren und Fahrermodellen. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik (Hrsg.) Das Mensch-Maschine-System im Verkehr VDI Berichte, Bd. 948, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf (1992)
Reid, L.D., Solowka, E.N., Billing, A.M.: A Systematic Study of Driver Steering Behavior. Ergonomics **24**(6), 447–462 (1981)
Remlinger, W.: Analyse von Sichteinschränkungen im Fahrzeug. Dissertation an der TUM (2013)
Rühmann, H.: Schnittstellen in Mensch-Maschine-Systemen. In: Schmidtke, H. (Hrsg.) Ergonomie. Hanser Verlag, München (1993)
SAE J826. 2008-11. Devices for Use in Defining and Measuring Vehicle Seating Accommodation. Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc.
SAE J941. 2002-09. Motor Vehicle Drivers' Eye Locations. Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc (2002)
Salvucci, D.: A Model of Eye Movements and Visual Attention. In: Proceedings of the International Conference on Cognitive Modeling, S. 252–259 (2000)
Schmidt, R.F., Thews, G.: Physiologie des Menschen, 24. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg, New York (1990)
Schweizer, G.: Das Systemglied „Mensch" in der Simulation. In: Schöne, A. (Hrsg.) Simulation stetiger Systeme. München, Wien (1975)
Seeger, H.: Vom Königsschiff zum Basic Car: Entwicklungslinien und Fallstudien des Fahrzeugdesign. Wasmuth, Tübingen (2007)
Seidl, A. (1994): Das Menschmodell RAMSIS: Analyse, Synthese und Simulation dreidimensionaler Körperhaltungen des Menschen. Dissertation an der Technischen Universität München, 1994
Seidl, A.: Computer Man Models in Ergonomic Design. In: Schmidtke, H. (Hrsg.) Handbuch der Ergonomie (Part A – 3.3.3). Hanser Verlag, Koblenz (1997). Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung
Senders, J.W.: The Human Operator. In: NASA (Hrsg.) Bioastronautics Data Book, Section 18, NASA SP-3006. National Aeronautics and Space Administration, Washington D.C (1964)
Sheirko, F.: Experimentelle Untersuchung des Geradeauslaufs von Straßenfahrzeugen unter dem Einfluss von Seitenwind und Straßenunebenheiten. Automobil-Industrie **1**, (1972)
Stein, W.: Vergleichende Untersuchung einachsiger manueller Regelvorgänge und Beurteilung ihrer linearen Modellierung Bericht, Bd. 21. Forschungsinstitut für Anthropotechnik, Meckenheim (1974)
Stein, W., Pioch, E.: Zur Anwendung von Regelaufgaben bei ergonomischen Untersuchungen Bericht, Bd. 23. Forschungsinstitut für Anthropotechnik, Meckenheim (1975)

Sträter, O.: Modellierung und Bewertung kognitiver Aspekte der Aufgaben des Fahrers VDI-Berichte, Bd. 1613., S. 263–274 (2001)

Tsimhoni, O., Liu, Y.: Modeling Steering Using the Queueing Network–Model Human Processor (Qn-Mhp). In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 47th Annual Meeting, S. 1875–1879 (2003)

Tustin, A.: An Investigation of the Operators Response in Manual Control of a Power Driven Gun C. S. Memorandum, Bd. 169. Metropolitan Vickers Electrical Co., Sheffield, England, S. 172–186 (1944)

Tustin, A.: The Nature of the Operator's Response in Manual Control and Its Implications for Controller Design. Journal, IEE **94**(Part II A2), 190–202 (1947)

Waldhier, T.: Menschmodellierende Verfahren zur rechnergestützten Arbeitsplatzgestaltung – Eine Übersicht. Marktanalyse am Lehrstuhl für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der TH Karlsruhe (1989)

Wickens, C.D., Hollands, J.G.: Engineering Psychology and Human Performance, 3. Aufl. Prentice Hall, Upper Saddle River (2000)

Wierwille, W.W., Gagné, G.A., Knight, J.R.: An Experimental Study of Human Operator Models and Closed-Loop Analysis Methods for High-Speed Automobile. IEEE Transactions on Human Factors in Electronics **8**(3), 187–201 (1967)

Willumeit, H.-P., Kramer, U., Rohr, G.: Closed-Loop Simulation of the Driver-Vehicle-Environment System. Vehicle Dynamics **12**(1), 1 (1983)

Wohl, J.G.: Man-Machine Steering Dynamics. Human Factors (3), (1961)

Wolf, J.D., Barret, M.F.: Driver-Vehicle Effectiveness model NHTSA Report, Bd. 78113. (1978)

Young, L.R.: Human Control Capabilities. In: NASA (Hrsg.) Bioastronautics, Data Book, 2. Aufl. NASASP, Bd. 3606, Scientific and Technical Information Division, National Aeronautics and Space Adminstration, Washington D.C. (1973)

Yuhara, N., Horiuchi, S., Asanuma, N., et al.: Improvement of Vehicle Handling Quality Through Active Control of Steering Reaction Torque. In: Proceeding of AVEC Jokohama, 1992. S. 407–412. (1992)

Yuhara, N., Horiuchi, S., Asanuma, N., et al.: Improvements of Vehicle Handling Qualities by Means of Kinesthetic Information. In: Proceeding of the Trienial Congress of the international Ergonomics Association Toronto, 1994. Bd. 5. (1994)

Weiterführende Literatur

ACT-R Theory and Architecture of Cognition. http://act-r.psy.cmu.edu/.

Assmann, E.: Untersuchung über den Einfluss einer Bremsweganzeige auf das Fahrerverhalten. Dissertation an der Technischen Universität München (1985)

Bachmann, T.: Wechselwirkungen im Prozess der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn VDI Fortschrittsberichte, Reihe 12. VDI Verlag, Düsseldorf (1998)

Bernotat, R.: Anthropotechnik in der Fahrzeugführung. Ergonomics **13**(3), 353–377 (1970)

Bollere, H.E., Krüger, W.: Untersuchung eines Bedienelements mit Krafteingabe und Wegrückmeldung bei der manuellen Lenkung von Unterwasserfahrzeugen Bericht, Bd. 38. Forschungsinstitut für Anthropotechnik, Meckenheim (1978)

Bolte, U.: Das aktive Stellteil – ein ergonomisches Bedienkonzept Fortschrittsberichte VDI-Reihe 17, Bd. 75. VDI-Verlag, Düsseldorf (1991)

Breitling, T., Breuer, J., Petersen, U.: Enhancing Traffic Safety by Active Safety Innovations. In: CONVERGENCE 2004 Proceedings SAE Paper, Bd. 2004-21-0056. (2004)

Bubb, H. Untersuchung über die Anzeige des Bremsweges im Kraftfahrzeug. Dissertation, Technische Universität München (1975)

Bubb, H.: Analyse der Geschwindigkeitsschätzung im Kraftfahrzeug. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft **31**, 103 (1977)

Bubb, H.: Informationswandel durch das System. Kap. 5.2. In: Schmidtke, H. (Hrsg.) Ergonomie, 3. Aufl. Carl Hanser-Verlag, München-Wien (1993)

Bubb, H.: Systemergonomische Gestaltung. Kap. 5.3. In: Schmidtke, H. (Hrsg.) Ergonomie, 3. Aufl. Carl Hanser-Verlag, München-Wien (1993)

Bubb, H., Schmidtke, H.: Systemstruktur. Kap. 5.1. In: Schmidtke, H. (Hrsg.) Ergonomie, 3. Aufl. Carl Hanser-Verlag, München-Wien (1993)

Bubb, P.: Ergonomie in der Fahrzeugentwicklung. In: Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.) Entwicklung im Karosseriebau. VDI Berichte, Bd. 968, S. 481–501. Gesellschaft Fahrzeugtechnik. Entwicklungen im Karosseriebau, Hamburg (1992). 25. und 26. Mai. Düsseldorf

Caltrans http://www.dot.ca.gov/aboutcaltrans.htm

Chaffin, D.: Digital Human Modeling for Vehicle and Workplace Design. Society of Automotive Engineers, Inc., 2001 (2001)

Dutke, S.: Mentale Modelle: Konstrukte des Wissens und Verstehens. Verlag für Angewandte Psychologie, Göttingen (1994)

Engels, A. (1994): Geradeauslaufkriterien für PKW und deren Bewertung, Dissertation, TU Braunschweig.

Autofahrer und Verkehrssituation. In: Fastenmeier, W., Häcker, H. (Hrsg.) Reihe Mensch-Fahrzeug-Umwelt, Bd. 33, Verlag TÜV Rheinland, Köln (1995)

Fleck, R.:„Aktivlenkung" - ein wichtiger erster Schritt zum Steer-by-Wire Tagung„PKW-Lenksysteme - Vorbereitung auf die Technik von morgen", Haus der Technik e. V., Essen, 02.-03. April (2003)

Geiser, G.: Mensch-Maschine-Kommunikation im Kraftfahrzeug. ATZ **87**, 77–84 (1985)

Gengenbach, R.: Fahrerverhalten im Pkw mit Head-Up-Display. Gewöhnung und visuelle Aufmerksamkeit VDI Fortschrittsberichte Reihe 12: Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik, Bd. 330 (1997)

Gillet, G.: Ergonomische Optimierung eines Aktiven Stellteils. Dissertation, an der Technischen Universität München (1999)

Godthelp, H.: Studies on Human Vehicle Control. TNO, Institute for Perception, Soesterberg (1984)

Guan, H., Gao, Z., Guo, K., et al.: An Optimal Preview Acceleration Model for Velocity Control in Driver-Vehicle-Environ-

ment System. In: Proceeding of AVEC Ann Arbor, 2000. S. 525–530 (2000)
Hale, A.R., Stoop, J., Hommels, J.: Human error models as predictor of accident scenarios for designer in road transport systems. Ergonomics **33**, 1377–1387 (1990)
Helander, M.: Handbook of Human-Computer Interaction. North-Holland, Amsterdam (1988)
Herrin, G.D., Neuhardt, J.B.: An Empirical Model for Automobile Driver Horizontal Curve Negotiation. Human Factors **16**(2), 129–133 (1974)
Hickey, D., Pierrynowski, M.R., Rothwell, P.: Man-Modeling CAD-Programs for Workspace Evaluations. University of Toronto, Kanada (1985). Vortragsmanuskript
Honda Motor Co: Fact Book, S2000 TypeV. (2000). auf Japanisch. http://www.honda.co.jp/factbook/auto/s2000/ 200007/index.html
Kramer, U., Rohr, G.: A Fuzzy Model of Driver Behaviour: Computer Simulation and Experimental Results. In: Proc. of the IFAC Congress on Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine-System Baden-Baden, Germany, 1982 (1982)
Lindsay, P.H., Norman, D.H.: Human Information Processing. An Introduction to Psychology. Academic Press, New York, London (1972)
McRuer, D.T., Magdaleno, R.E., Moore, G.P.: A Neuromuscular Actuation System Model Third Annual NASA-University Conference on Manual Control., S. 281 (1967). NASA SP-144
Merz, L.: Grundkurs der Regelungstechnik. Einführung in die praktischen und theoretischen Methoden. Hochschultaschenbücherei, München, Wien (1973)
Michon, J.A.: A critical view of driver behaviour models. What do we know, what should we do? In: Evans, L., Schwing, R. (Hrsg.) Human behavior and traffic safety. Plenum Press, New York (1985)
Mitschke, M.: Beurteilung des Geradeauslaufverhaltens und des Center Point Feelings IfF-Bericht, Bd. 631. Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, Braunschweig (1984)
Ohno, T.: Steering Control on a Curved Course. Japan SAE Review **20**(5), 413–419 (1966)
Penka, A. (2001): Vergleichende Untersuchung zu Fahrerassistenzsystemen mit unterschiedlichen aktiven Bedienelementen. Dissertation an der Technische Universität München.
Pressler, G.: Regelungstechnik, Grundelemente Hochschultaschenbücher. Bibliographisches Institut Mannheim, Mannheim (1967)
Reichart, G.: Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen Fortschritt-Berichte, Reihe 22, Mensch-Maschine-Systeme, Bd. 7. VDI-Verlag, Düsseldorf (2001)
Salvatore, S.: The Influence of Sensory Pattern and Alcohol on Vehicular Velocity Sensing. Public Health Service and Mental Health Administration, Sudbury, Ontario, London (1972)
Schmidtke, H.: Der Leistungsbegriff in der Ergonomie. In: Schmidtke, H. (Hrsg.) Ergonomie, 3. Aufl. Carl Hanser-Verlag, München-Wien (1993)
Schulze, B.G.: The Application of Ergonomic Principles in the Design of Operating Controls. In: Human Factors in Transport Research, Bd. 1, S. 337–344. (1981)
Schweigert, M., Bubb, H.: Eye-Movements, Performance and Interference when Driving a Car and Performing Secondary Tasks. In: Gale, A.G. (Hrsg.) Vision in Vehicles, Bd. IX, Elsevier North Holland Press, Amsterdam (2002)
Shannon, C.E., Weaver, W.: The Mathematical Theory of Communication. University of Illinois Press, Urbana (1949)
Sheridan, T.B., Ferrel, W.R.: Man-Machine-Systems: Information, Control, and Decision Models of Human Performance. The MIT Press, Cambridge, MA (1974)
Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie (1973)
Steward, J.D.: Human Perception of Angular Acceleration and Implications on Motion Simulator. J. Aircraft **8**(4), 248–253 (1971)
Unselt, T., Breuer, J., Eckstein, L., Frank, P.: Avoidance of „Loss of Control Accidents" Through the benefit of ESP. In: FISITA 2004 Congress Proceedings (2004)
Weiser, M.: The computer for the 21st century. Scientific American **265**(3), 94–104 (1991)
Wickens, C.D.: Engineering psychology and human performance. Charles E. Merrill publishing company, Ohio (1984)
Wiener, N.: Cybernetics or control and communication in the animal and the machine. The Massachusetts Institute of Technology, New York (1948)
Wierwille, W.W., Tijerina: Eine Analyse von Unfallberichten als Mittel zur Bestimmung von Problemen, die durch Verteilung der visuellen Aufmerksamkeit und der visuellen Belastung innerhalb des Fahrzeuges verursacht werden. Zeitschrift Für Verkehrssicherheit **41**, 164–168 (1995)
Willumeit, H.-P., Jürgensohn, T.: Fahrermodelle – ein kritischer Überblick - Teil I und Teil II. Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) **99**(9), 424–428 (1997)
Yuhara, N., Tajima, L., Sano, S., et al.: Steer-by-Wire-Oriented Steeling System Design: Concept and Examination. Vehicle System Dynamics Supplement **33**, 692–703 (1999)
Zwahlen, H.T., Adams Jr., C.C., DeBald, D.P.: Safety aspects of CRT touch panel controls in automobiles. In: Gale, A.G. (Hrsg.) Vision in Vehicles II, S. 335–344. Elsevier North Holland Press, Amsterdam (1988)

Systemergonomie des Fahrzeugs

Heiner Bubb, unter Mitarbeit von Klaus Bengler, Jurek Breuninger, Christian Gold, Magnus Helmbrecht

6.1 Allgemeine systemergonomische Gestaltungsrichtlinien – 260
6.1.1 Funktion – 263
6.1.2 Rückmeldung – 269
6.1.3 Kompatibilität – 269

6.2 Mensch – Maschine – Interaktion – 272
6.2.1 Anzeigen – 275
6.2.2 Bedienelemente – 291

6.3 Systemergonomische Empfehlungen für die jeweiligen Fahraufgabenniveaus – 303
6.3.1 Primäre Fahraufgabe – 303
6.3.2 Sekundäre Fahraufgabe – 309
6.3.3 Tertiäre Aufgaben – 310

6.4 Gestaltung der fahrrelevanten Eigenschaften – 312
6.4.1 Querdynamik: Das Lenkgefühl – 313
6.4.2 Längsdynamik – 328
6.4.3 X-by-Wire – 333

Literatur – 340

H. Bubb et al., *Automobilergonomie,* ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-8348-2297-0_6, © Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

6.1 Allgemeine systemergonomische Gestaltungsrichtlinien

Wie bereits in ▶ Kap. 1 dargelegt, spielt für den Umgang mit dem Automobil und damit für dessen Gestaltung der Informationsfluss zwischen Fahrer und Fahrzeug eine dominante Rolle. Die Untersuchung und Beschreibung dieses Informationsflusses ist Gegenstand der sog. Systemergonomie (Bubb 1993). Ausgangspunkt jeder systemergonomischen Analyse ist die der Aufgabe zugrunde liegende Information. Im Sinne des Regelkreisbildes der ◘ Abb. 1.9 wird durch die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug die Information der Aufgabe in die des Ergebnisses überführt. Dieser Gedanke gilt für jede Form der Aufgabe. Es ergeben sich aber beim Autofahren unterschiedlichste Formen der Aufgabe. Für die ergonomische Gestaltung eines Fahrzeuges ist deshalb zuerst zu untersuchen, für welchen Einsatzzweck es gedacht ist. ◘ Tabelle 6.1 gibt hierfür im Sinn von Nutzungsszenarien einen exemplarischen Überblick mit einigen Beispielen und ist auch beliebig erweiterbar.

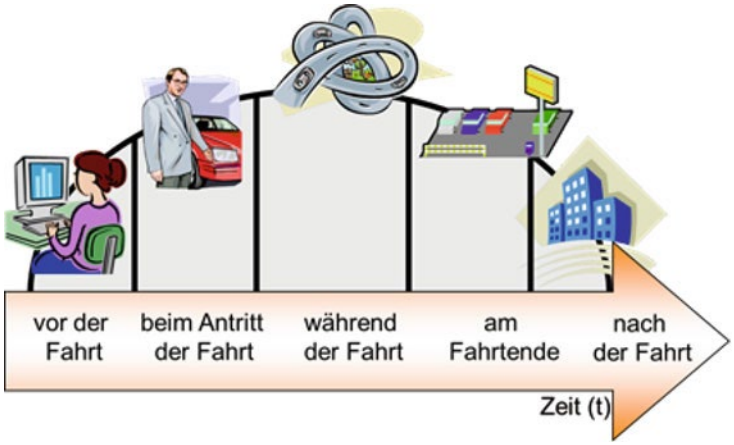
Zu jeder der in ◘ Tab. 6.1 aufgeführten Fahrmissionen gehört der in ◘ Abb. 6.1 dargestellte Fahrtverlauf, der sich in einzelne Teilabschnitte gliedert. Die unter ◘ Abb. 6.3 aufgeführten systemergonomischen Regeln sind im Prinzip auf jeden dieser Teilabschnitte einzeln anzuwenden. Es ergibt sich also in jedem Teilabschnitt eine spezielle Aufgabe, deren Erfüllungsgrad mit dem jeweiligen Ergebnis beschrieben werden kann. Für die Erfüllung der Aufgabe werden ein oder mehrere spezifische technische Systeme genutzt (z. B. das Auto für die Erfüllung der Fahraufgabe, der Wischer für die Erfüllung der Aufgabe „freie Sicht bei Regen“). Das jeweilige technische System wird dabei durch seine Funktion beschrieben. Unter Berücksichtigung der grundlegenden Vorstellung des Regelkreises 1–9 lässt sich festlegen:

Definition

Die Funktion eines technischen Systems bzw. Systemelements stellt die definierte Überführung der Eingangsgrößen in die umgewandelten Ausgangsgrößen unter Berücksichtigung von Parametern dar. In dieser Eigenschaft ist es ein Teil eines Mensch-Maschine Systems, woraus sich unter Berücksichtigung des Nutzungskontextes die ergonomischen Anforderungen für das technische System ableiten.

Im Folgenden seien plakativ einige Beispiele aufgeführt, um die Vielfältigkeit der Gestaltungsnotwendigkeiten, die sich aus diesen Betrachtungen ergeben, aufzuzeigen. So kann beispielsweise davon ausgegangen werden, dass eine Dienstreise – zumal wenn sie von einer Personengruppe durchgeführt wird – außerhalb des Fahrzeugs, also beispielsweise im Büro, geplant wird. Es ist dann sinnvoll, die Navigationsplanung am PC vorzunehmen und das Ergebnis auf das Navigationssystem des Fahrzeugs in geeigneter Weise (z. B. über Funk; USB-Stick, Speichermedium) zu übertragen. Ganz anders kann es beispielsweise bei einer Rundfahrt aussehen, die von einer Einzelperson aus Spaß durchgeführt wird. Hier stehen mittlerweile über soziale Netzwerke Rundreisen zum download und Austausch zwischen Nutzern zur Verfügung. Die Planungsaufgabe wird also mehr zu einer Such- und Entscheidungsaufgabe. Dann können ganz spontan auch während der Fahrt Navigationswünsche entstehen, an die vor Fahrtbeginn gar nicht gedacht wurde, die dann über die Funktion „point of interest“ erfüllt werden können. Überhaupt stellt die Mission „Fahren aus Spaß“ oder auch der Wunsch nach aktiver Benutzung des Fahrzeugs eine ganz eigene Herausforderung für die ergonomische Gestaltung dar. Während beispielsweise – wie mehrfach erwähnt – aus Sicht des Informationswandels die Notwendigkeit des Schaltens entfallen sollte, kann gerade dies für einen engagierten Fahrer, der das Beherrschen der Maschine als Kompetenz erlebt, ein Anlass zur Freude sein. Dieser Faktor ist auch bei dienstlich genutzten Fahrzeugen und Missionen nicht zu unterschätzen. Den rechten Kompromiss zwischen den Anforderungen des Komfort (= „Gefallen“) und der Vermeidung des Diskomforts (Vermeiden des „Erleidens“; siehe

Abb. 6.1 Fahrtverlauf



Tab. 6.1 Generelle Fahrmissionen und Beispiele

Beteiligte Auftrag	Einzelperson	Personengruppe	Objekt
dienstlich	– Fahrt zur Arbeit – Fahrt zu einem Gesprächs-/ Behandlungstermin – Kundenbesuch (z. B. Vertreter)	– Reise zu einem Besprechungstermin – Verschiedene Ziele für die Reisenden – Fahrgemeinschaft mit gemeinsamen Ziel	– Transport eines Gegenstandes – Transport mehrerer Gegenstände
privat	– Besuch bei Verwandten, Freunden – Besorgung – Abholen/Bringen von Objekten – Rundfahrt – Urlaubsreise mit einem Ziel – Urlaubsreise mit mehreren Zielen	– Verwandtengruppe – Gruppe aus Erwachsene, Kindern oder gemischt – Unbekannte Fahrgemeinschaft – Bekannte – Rundfahrt – Urlaubsreise mit einem Ziel – Urlaubsreise mit mehreren Zielen – Verschiedene Ziele für die Reisenden	– Transport eines Gegenstandes – Umzug – Abholen/Bringen von Objekten – Transport fremder Gegenstände – Transport von Sportgeräten (Golfbag, Fahrräder, Ski, Boot u. ä.)

hierzu ► Abschn. 3.3.4) zu finden, ist eine immer wieder auftauchende Herausforderung, die sich bei der systemergonomischen Gestaltung der Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug aber auch bei der anthropometrischen Gestaltung stellt.

Ist eine Mission der Fahrt der Transport von Gegenständen, so spielt die Frage des komfortablen Beladens (und später beim Fahrtende des Entladens) eine wichtige Rolle. Dies ist ein spezieller Teil der anthropometrischen Gestaltung des Fahrzeugs, welche in diesem Fall natürlich auch von der Art der avisierten Gegenstände abhängt. So ist es ein Unterschied, ob im Gepäckabteil des Fahrzeuges handliche Koffer oder Kisten transportiert werden sollen oder Möglichkeiten für den Transport sperriger Sportgeräte geschaffen werden müssen. Aus physikalischen Gründen ändert der Beladungszustand die Fahreigenschaft des Fahrzeugs. Eine ergonomische Forderung ist, dass diese Änderungen keine geänderten Verhaltensweisen des Fahrers notwendig machen. In Abhängigkeit von der Fahrmission entstehen auch während der Fahrt ganz spezifische Aufgaben und damit Anforderungen an das Fahrzeug. So werden beispielsweise bei zur Neige gehender Restreichweite inzwischen bei manchen Fahrzeugen und Systemen automatisch

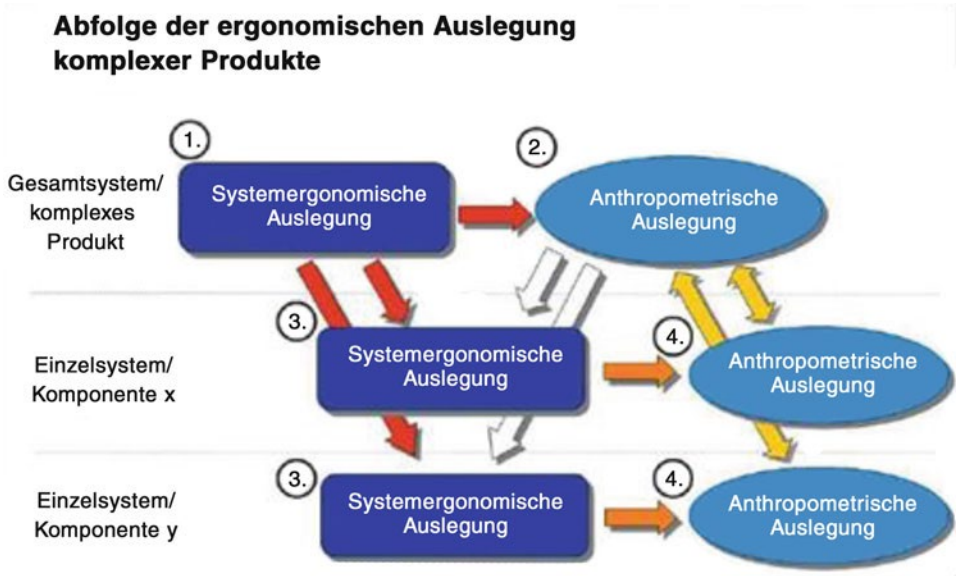


Abb. 6.2 Abfolge der ergonomischen Auslegung komplexer Produkte nach Remlinger und Bubb (2007)

Hinweise auf zur Verfügung stehende Tankstellen (bei Elektrofahrzeugen Ladestationen oder Batteriewechselstationen) im Navigationsgerät angezeigt werden. Bei grenzüberschreitenden Fahrten sollten zudem an der Grenze, die heute oftmals als solche gar nicht augenfällig erkennbar ist, die landesspezifischen Verkehrsvorschriften – insbesondere Geschwindigkeitsvorschriften – unmittelbar angezeigt werden und nicht nur durch den Nutzer abrufbar sein. Dem Fahrtende sind die Aufgaben Parkplatzsuche und Parken zugeordnet. Dies stellt bei einer Familienfahrt zu Verwandten unter Umständen ganz andere Anforderungen als bei einer dienstlichen Geschäftsreise. Während im ersten Fall das Fahrzeug Hilfe bei der Suche eines freien Parkplatzes in einem Wohngebiet leisten sollte, steht im letzten Fall u. U. ein Firmenparkplatz zur Verfügung oder es muss in einer Innenstadt ein nahe gelegenes Parkhaus und seine Auslastung gefunden werden. Entsprechende Hinweise sind in einem modernen fahrzeugintegrierten Navigationssystem inzwischen verfügbar. Ganz neue Szenarien ergeben sich im Zusammenhang mit dem heute intensiv diskutierten Car-Sharing. In all den hier nur skizzenhaft angedeuteten Zusammenhängen besteht die grundsätzliche ergonomische Vorgehensweise immer darin, die entsprechenden Szenarien speziell aus der Sicht und den Bedarfen des Nutzers zu betrachten. Allerdings führen viele der genannten Informationsfunktionen inzwischen zu gesteigerten Anforderungen bezüglich ihrer Benutzung während der Fahrt, um die Fahrerablenkung minimal zu halten.

Aus systemergonomischen Forschungsergebnissen leiten sich Gestaltungsregeln ab, durch deren Beachtung es möglich ist, konkrete Hinweise für die Auslegung dieses Informationsflusses, d. h. insbesondere für die Gestaltung von Bedienelementen und Anzeigen, zu geben. Im idealen Fall erfolgt auf der Basis der systemergonomisch festgelegten Gestaltung die anthropometrische Auslegung des Fahrzeugs, also die geometrische Zuordnung von Anzeigen, Bedienelementen und sonstigen für das Fahren notwendigen Objekten zum Fahrer und auch zu den übrigen Passagieren. Nach der anthropometrischen Festlegung sollte dann idealerweise die umweltergonomische Gestaltung erfolgen, d. h. konkret die Festlegung von Beleuchtungs-, Schall- und Klimabedingungen sowie die der mechanischen Schwingungen (Schwingungsdämpfung). In der Praxis erfolgt die Gestaltung allerdings nicht in dieser idealen Reihenfolge, sondern stellt einen iterativen, interaktiven Prozess der mit den jeweiligen Teilbereichen befassten Abteilungen dar. In den seltensten Fällen geschieht die Entwicklung

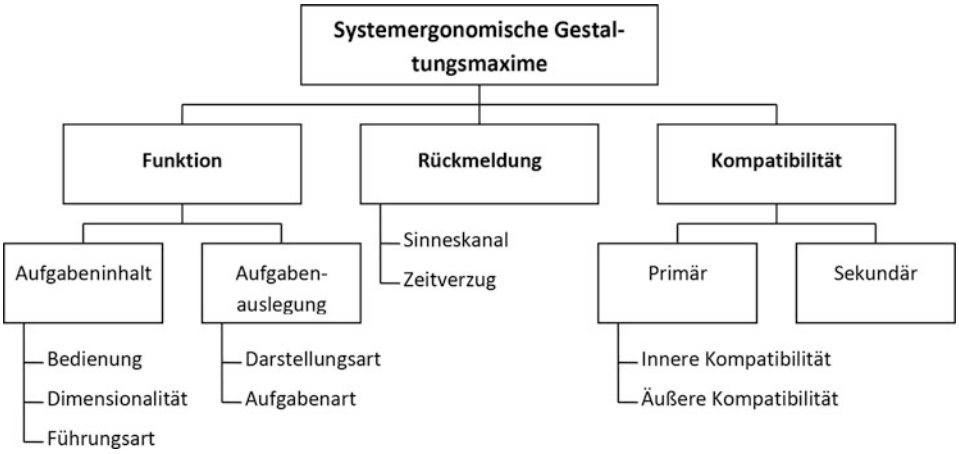


Abb. 6.3 Übersicht über die systemergonomischen Gestaltungsmaxime Funktion, Rückmeldung und Kompatibilität

eines neuen Fahrzeugs zudem auf der „tabula rasa", sondern nimmt vielmehr ihren Ausgangspunkt von einem bereits entwickelten Vorgängermodell. Remlinger und Bubb (2007) stellen modellhaft die Reihenfolge der Bearbeitung für die Auslegung des Gesamtsystems und der Einzelsysteme bzw. Komponenten in Abb. 6.2 zusammen, wobei die Numerierung von 1. bis 4. die Reihenfolge der Bearbeitung der einzelnen Arbeitsschritte zeigt und die Pfeile verdeutlichen, welche Schritte nachfolgende beeinflussen.

Im vorliegenden Kapitel werden zunächst die systemergonomischen Gestaltungsrichtlinien allgemein und dann ihre Auswirkungen auf die verschiedenen Fahraufgaben dargestellt. Insbesondere die Gestaltung der Anzeigen und Bedienelemente dienen der Bediensicherheit. Die Aspekte der anthropometrischen Gestaltung werden in ▶ Kap. 7 behandelt. Dem wichtigen Aspekt der Sicht ist dabei ein eigenes Kapitel gewidmet. Die oben genannte Gestaltung der Umwelt erfolgt unter der Überschrift „Konditionssicherheit", da Umweltbedingungen, welche möglichst wenig Diskomfort verursachen, grundsätzlich der Ermüdung des Fahrers vorbeugen.

Für die ergonomische Gestaltung der Aufgabe, die sich aus dem Systemauftrag, aus der speziell gewählten Auslegung des Systems und der Systemkomponenten (z. B. Auslegung der Bedienelemente, der Anzeigen, Gestaltung der Software) ergeben, müssen die folgenden grundlegenden Fragen in befriedigender Weise beantwortet werden:

a) *Funktion*: „Was beabsichtigt der Fahrer/Nutzer und inwieweit unterstützt ihn dabei das technische System?"
b) *Rückmeldung*: Kann der Fahrer/Nutzer erkennen, ob er etwas bewirkt hat und was das Ergebnis seiner Handlung war oder sein wird?"[1]
c) *Kompatibilität*: „Wie groß ist der Umcodieraufwand für den Fahrer/Nutzer zwischen verschiedenen Informationskanälen?

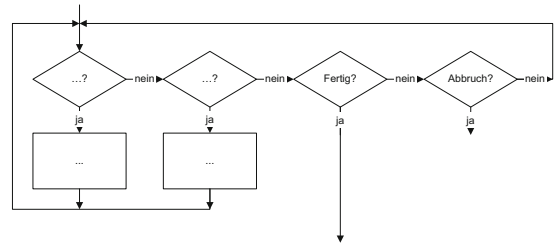
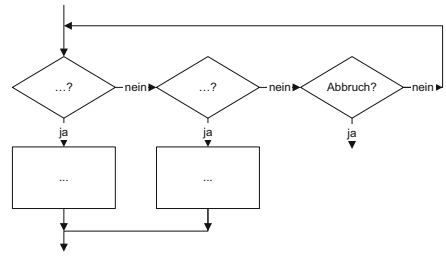
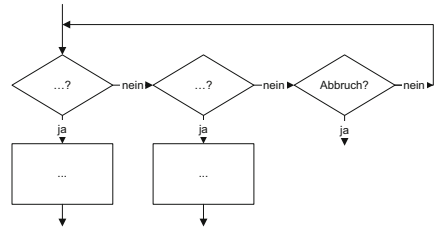
Abbildung 6.3 gibt eine Übersicht, wie die systemergonomischen Gestaltungsmaxime Funktion, Rückmeldung und Kompatibilität weiter untergliedert sind. Auf diese einzelnen Aspekte wird im Folgenden speziell eingegangen.

6.1.1 Funktion

Die *Funktion* bezieht sich einerseits auf den eigentlichen *Aufgabeninhalt*, der festliegt und wesentlich die vom Menschen abverlangte Informationsverarbeitung beschreibt, und andererseits auf die *Aufgabenauslegung*, die im Rahmen der jeweiligen technischen Möglichkeiten von dem Systemgestalter beeinflusst werden kann. Die mentale Belastung des Operateurs wird also sowohl durch seine Vor-

1 Dabei müssen gegebenenfalls auch unerwünschte Nebenwirkungen am Fahrzeug selbst oder auf die Umwelt rückgemeldet werden.

Tab. 6.2 Zusammenfassung der drei Unterarten der simultanen Bedienung. Je nach vorherrschenden simultanen Auswahlmöglichkeiten stellt sich diese unterschiedlich dar

Zwingende Art	• Mehrere Arbeitsschritte stehen zur zeitgleichen Entscheidung an • Jeder Arbeitsschritt muss durchgeführt werden • Reihenfolge der Abarbeitung ist für das Ergebnis irrelevant	
Variierende Art	• Mehrere Arbeitsschritte stehen zur zeitgleichen Entscheidung als Alternativen an • Nur ein Arbeitsschritt muss/kann zur Aufgabenerfüllung durchgeführt werden • Jeder Arbeitsschritt führt zum Ergebnis/Ziel	
Divergierende Art	• Mehrere Arbeitsschritte stehen zur zeitgleichen Entscheidung an • Nicht jeder Arbeitsschritt muss durchgeführt werden • Die einzelnen Arbeitsschritte führen zu unterschiedlichen Ergebnissen	

kenntnisse und die Komplexität der Aufgabe beeinflusst als auch durch solche Aspekte der Aufgabe, die durch das bereitgestellte technische System festgelegt sind[2]. Aufgabe des Fahrzeuggestalters ist es somit, durch eine günstige Gestaltung die auslegungsbedingte Bedienschwierigkeit so weit zu reduzieren, dass idealerweise nur die aufgabenimmanente Schwierigkeit übrig bleibt.

6.1.1.1 Aufgabeninhalt

Bedienung: Jede Aufgabe kann durch ihre zeitliche und räumliche Ordnung der zu ihrer Lösung notwendigen Aktivitäten beschrieben werden. Beispielsweise muss der Fahrer bei einem Überholvorgang auf der Landstraße zuerst abschätzen, ob die verfügbare freie Strecke für das Überholen ausreichend ist, sich dann im Rückspiegel davon überzeugen, dass kein schnelleres Fahrzeug soeben auch zum Überholvorgang angesetzt hat, dann den linken Blinker setzen, nochmals die verfügbare freie Strecke abschätzen und schließlich das Fahrzeug maximal beschleunigen und zugleich den Fahrstreifenwechsel auf die linke Fahrbahn vornehmen.

2 Beispielsweise spielt für die Regelung der Längsdynamik des Fahrzeugs (Geschwindigkeit) wesentlich die Fahr- und Verkehrssituation (Fahrbahnverlauf und die Bewegungen anderer Fahrzeuge und Verkehrsteilnehmer) eine Rolle, aus der der Fahrer die adäquate Geschwindigkeit abzuleiten hat. Über das Fahrpedal (Gaspedal) und gegebenenfalls das Bremspedal versucht er diese mental erarbeitete Geschwindigkeit einzuhalten. In einem handgeschalteten Fahrzeug erschwert die richtige Gangwahl somit die Aufgabenbewältigung zusätzlich. Die Schwierigkeit der Aufgabenbewältigung ergibt sich also nicht nur aus dem Aufgabeninhalt, sondern auch aus der technischen Auslegung des Fahrzeugs.

Zeitliche Aspekte können durch die Unterscheidung in *simultane* und *sequentielle* Bedienung kategorisiert werden. Ist die Reihenfolge der notwendigen Arbeitsschritte wie im obigen Beispiel zeitlich vorgegeben, spricht man von einer sequentiellen Bedienung. Sie bezeichnet die Tatsache, dass aus sachlichen, nicht durch die realisierte Technik bedingten Gründen bestimmte Vorgänge nur in dieser Reihenfolge abzuhandeln sind. Gibt es dagegen keine sachlich vorgegebene zeitliche Reihenfolge der Arbeitsschritte, liegt ein simultaner Vorgang vor. Simultan drückt hierbei eine gleichrangige Anordnung verschiedener Auswahlmöglichkeiten aus, d. h. dass verschiedene Aufgaben zeitgleich anstehen und es aus sachlichen Gründen ins Belieben des Operateurs gestellt ist, in welcher Reihenfolge er die Aufgaben erledigt. Es ist zum Beispiel für die Programmierung eines Navigationsrechners gleichgültig, ob der Fahrer zuerst den Zielort eingeben will oder zunächst die generelle Streckenwahl (schnelle, ökonomische oder kürzeste Strecke).

Sobald sich der Anwender mehreren Auswahlmöglichkeiten ausgesetzt sieht, wird von ihm eine simultane Bedienung abverlangt. Dabei können ausgehend von diesen Entscheidungsmöglichkeiten drei verschiedene Typen unterschieden werden, nämlich simultane Bedienung zwingender, variierender und divergierender Art (Rassl 2004). Bei der zwingenden Art stehen mehrere Arbeitsschritte zeitgleich zur Entscheidung an. Alle müssen zur Erfüllung der Aufgabe durchgeführt werden. Ein typisches Muster für eine simultane Bedienung zwingender Art ist das komplette Ausfüllen eines Personalbogens. Die Aufgabe besteht zwar darin, alle Daten anzugeben. Ob jedoch zuerst der Vor- oder Nachname in den Bogen eingetragen wird, ist für das Ergebnis irrelevant. Auch bei der variierenden Art stehen unterschiedliche Arbeitsschritte gleichzeitig zur Entscheidung an. Jedoch müssen nicht alle bearbeitet werden, weil jeder mögliche Schritt zum Ziel führt. Zur Erfüllung der Aufgabe reicht es, nur einen Arbeitsschritt auszuführen. Ein Beispiel ist die Auswahl unterschiedlicher Routenvorschläge (Autobahn ja/nein, Mautstraßen vermeiden ja/nein, schnellste Strecke/kürzeste Strecke usw.), die aber alle zum selben Ziel führen. Eine simultane Bedienung divergierender Art liegt vor, wenn die Auswahl zu unterschiedlichen Ergebnissen führt. Ein Beispiel dafür ist die Auswahl von Zielen aus dem Adressenspeicher eines Navigationssystems. In ◘ Tab. 6.2 sind die drei Typen der simultanen Bedienung mit jeweils einem schematischen Flussdiagramm dargestellt.

Die zeitliche Ordnung von Aufgaben wird zweckmäßigerweise durch ein Flussdiagramm dargestellt (siehe hierzu u. a. auch ◘ Abb. 2.3). In diesem Flussdiagramm werden durch Rauten der Informationsbedarf seitens der Maschine charakterisiert (Die Maschine kann nicht wissen, was der Operateur will, stellt ihm also eine „Frage“) und durch Rechtecke Handlungen des Operateurs, durch die er auf die Maschine Information überträgt. Im ersten Schritt eines systemergonomischen Lösungszyklus ist ein sog. Soll-Flussdiagramm zu erstellen, das die notwendige zeitliche Ordnung der Informationsübertragung auf die Maschine aus der Sicht des Operateurs ohne Berücksichtigung irgendwelcher technischen Realisierungsmöglichkeiten darstellt. Aus ihm ist dann bereits abzuleiten, welche Aufgaben simultan sind und welche sequentiell. Bei simultanen Aufgaben muss es dem Operateur freigestellt sein, welchen Bedienschritt er zuerst wählt. Die Reihenfolge einer sachlich notwendigen Sequenz sollte demgegenüber fest in dem Softwareprogramm oder durch die Anordnung der Bedienelemente vorgegeben sein, wobei der Operateur in geeigneter Weise Rückmeldung darüber haben muss, bei welchem Schritt sich das System gerade befindet.

Die Analyse der Bedienung ist grundlegend für jede systemergonomische Gestaltung. In den nächsten Analyseschritten muss nun für jeden der einzelnen Aktionen, die im Flussdiagramm durch Rechtecke charakterisiert sind, die jeweilige ergonomische Auslegung erfolgen.

Dimensionalität: Der Anspruch der *räumlichen Ordnung* der Aufgabe steigt mit der Zahl der Dimensionen, auf die der Bedienende Einfluss nehmen muss. Eine Aufgabe ist einfach, wenn nur *eine Dimension* (z. B. die Einstellung eines Zeigers auf einem Analoginstrument) oder *zwei Dimensionen* (z. B. Gezielte Positionierung des Mauszeigers oder Führen eines Kraftfahrzeugs) kontrolliert werden müssen. Auch eine dreidimensionale Aufgabe ist inhaltlich gesehen immer noch einfach, kann allerdings durch Einschränkungen wie die Darstellung auf einem zweidimensionalen Bildschirm schwierig werden. Beispielsweise liegt beim Steuern eines

Flugzeuges die Schwierigkeit vor allem in der Beherrschung der Flugdynamik, nicht in der Dreidimensionalität der Aufgabe. Auf alle Fälle ist es schwieriger, wenn es notwendig wird, *vier Dimensionen* zu kontrollieren (z. B. die Handhabe eines Portalkrans, bei dem sowohl die Längs-, Quer-, Höhenbewegung sowie die Orientierung der Last um die Hochachse zu beeinflussen ist) und besonders schwierig, wenn *sechs Dimensionen* beeinflusst werden müssen (z. B. Positionierung eines Bauteils zum Zweck der Montage, u. a. auch Einfügen eines Objektes in den Geräteträger eines Fahrzeugs).

Ergonomische Verbesserungen werden erreicht, wenn die Dimensionalität des Stellteils möglichst der Zahl der beeinflussten Dimensionen entspricht. Ein Beispiel dafür ist die Bewegung eines Zeigers auf der zweidimensionalen Bildschirmoberfläche durch die zweidimensional verfahrbare Maus. Wird hingegen diese zweidimensionale Aufgabe durch zwei getrennte eindimensionale Bedienelemente erledigt oder sequenziell durch den Drehdrücksteller, was häufig in Fahrzeugen der Fall ist, so wird sie dadurch künstlich durch die Art der technischen Auslegung schwieriger gemacht. Durch die Verwendung von Führungsschienen kann eine mehrdimensionale Aufgabe, wie sie zum Beispiel bei der Montage eines Objektes auftritt (z. B. Montage des Gepäckabdeckrollos in einem Kombifahrzeug, Einfädeln einer Trinkflasche in einen Cupholder), in ihrer zu handhabenden Dimension reduziert und somit vereinfacht werden. Ähnlich ist das Treffen von Positionen auf einem Touchscreen eine dreidimensionale Aufgabe im Vergleich zum Auswahl von Listenelementen mit einem Drehknopf (eindimensional)

Führungsart: In manchen Fällen muss die Aufgabe innerhalb eines bestimmten Zeitfensters, wodurch u. U. Zeitdruck entsteht, oder innerhalb eines bestimmten Ortsfensters erledigt werden (Ortsfenster: die beschränkte Oberfläche des Bildschirms macht oftmals eine Verschiebung des Inhalt notwendig). Dies führt zu ganz spezifischen Kompatibilitätsproblemen (siehe ► Abschn. 6.1.3). Ein großes Zeitfenster charakterisiert *statische Aufgaben* und ein kleines Zeitfenster *dynamische Aufgaben.* Statische Aufgaben sind durch weitgehend zeitunabhängige Anweisungen bezüglich des geforderten Ergebnisses charakterisiert (z. B. Ablesung eines Wertes von einem Display; Eingeben einer Adresse in das Navigationssystem bzw. das Telefonverzeichnis). Mit Zeitbudget wird das Verhältnis der benötigten zu der zur Verfügung stehenden Zeit bezeichnet. Es sollte Werte über 0,5 nicht überschreiten. Dann ist es nämlich gerade noch möglich, einen beobachteten Fehler zu korrigieren. Im Allgemeinen ist es ergonomisch auch abzulehnen, dass bestimmte Bedieneinstellungen nach einer gewissen Zeit automatisch zurückgesetzt werden. In jedem Fall ist es besser, eine vom Operateur willentlich zu betätigende Rücksetzmöglichkeit vorzusehen.

*Dynamische Aufga*ben sind charakterisiert durch die kontinuierliche Bedienung einer Maschine (z. B. Lenkung eines Fahrzeugs auf einer kurvigen Straße). Für Ihre Beschreibung ist u. a. die geforderte Grenzfrequenz der Aufgabe ausschlaggebend. Sie sollte normalerweise Werte > 1 Hz nicht übersteigen. Durch die Wahl der Geschwindigkeit kann der Fahrer auf einer kurvenreichen Strecke die von ihm abverlangte Frequenz der Steuerbewegung selbst bestimmen. Bezüglich der Längsdynamik sind die Anforderungswechsel normalerweise ebenfalls unterhalb dieses Grenzwertes. Auch hier kann durch die Wahl der Geschwindigkeit das Anforderungsprofil weitgehend selbst bestimmt werden. Neben der durch die Aufgabe geforderten Dynamik spielt aber auch die Dynamik der Maschine eine wesentliche Rolle. Die Dynamikversion des Fahrzeugs ist im Prinzip optimal geeignet: Sowohl die Querdynamik, als auch die Längsdynamik lässt sich aus ergonomischer Sicht als sog. Geschwindigkeitssteuerung charakterisieren, d. h. dass durch die Stellteilbetätigung – zumindest in der Anfangsphase – die Geschwindigkeit der jeweiligen Ausgangsgröße bestimmt wird. Außerdem handelt es sich beim Autofahren um eine Kompensationsaufgabe, was in Verbindung mit einer Geschwindigkeitssteuerung eine ideale Kombination darstellt (näheres siehe hierzu Bubb 1993). Die an sich zweidimensionale Fahraufgabe wird wegen des extrem unterschiedlichen Zeitverhaltens in der Quer- und Längsdynamik (Querdynamik im 100 ms-Bereich, Längsdynamik im Sekundenbereich!) aus subjektiver Sicht in vielen Situationen als getrennt wahrgenommen, was unter anderem auch durch die völlig unterschiedlichen Bedienelemente unterstützt wird. Bei ruckhaften gegenläufigen Lenkbewegungen in kurzer Folge, wie sie u. U. bei Schreckreaktionen

auftreten, kann es im Extremfall zu einem Aufschaukeln des Regelkreises bestehend aus Fahrer und Fahrzeug kommen, wobei nicht zwingend die Haftgrenze der Räder überschritten werden müssen (siehe hierzu auch ◘ Abb. 2.16). Die Ursache dieses Aufschaukelns liegt wesentlich in dem verzögerten Reaktionsvermögen des Fahrers, welches oberhalb der oben erwähnten Grenzfrequenz von 1–1,5 Hz liegt.

6.1.1.2 Aufgabenauslegung

Darstellungsart: Die Schwierigkeit der Aufgabe kann weiterhin durch die Art der Anzeige von Aufgabe und Ergebnis beeinflusst werden. Im Falle einer technischen Anzeige können die Aufgabe und das Ergebnis entweder separat angezeigt werden, oder nur die Differenz zwischen beiden.

Im Fall der separaten Anzeige spricht man von einer *Folgeaufgabe*; sie empfiehlt sich in Beobachtungssituationen, die erdfest, außerhalb von Fahrzeugen installiert sind (z. B. Flugzeuge auf dem Radarschirm der Flugsicherung oder Position eines Markers in einer CAD-Zeichnung; ggf. kann diese Form der Anzeige auch im Fahrzeug empfohlen werden, wenn dort beispielsweise auf einer nordweisenden elektronischen Landkarte die augenblickliche Position des Fahrzeugs „in der Welt" dargestellt wird). Bei dieser Form der *Folgeanzeige* kann der Operateur Information über die Bewegung oder die Änderung der Aufgabe und des Ergebnisses unabhängig voneinander gewinnen. Deshalb kann er Kurzzeitvorhersagen über die zukünftige Bewegung von beiden machen und folglich rechtzeitig reagieren. Außerdem erhält er dadurch – bei Beachtung der Kompatibilität (siehe ▶ Abschn. 6.1.3) im Rahmen der Auslegung – ein korrektes Abbild der Realität auf dem Display, was ihm die Orientierung erleichtert.

Wenn nur die Differenz von Aufgabe und Ergebnis angezeigt wird, spricht man von einer *Kompensationsaufgabe* bzw. *Kompensationsanzeige*. In technischen Systemen wird diese oft bevorzugt, weil dabei die Displayverstärkung (Größe des Maßstabs) frei gewählt werden kann. Die fahrtrichtungweisende Anzeige in einem Navigationsdisplay stellt eine solche Kompensationsanzeige dar: um das ortsfest im unteren Rand des Displays angezeigte Fahrzeug bewegt sich die gesamte Szenerie der Landkarte. Auch die sog. Bird-view-Anzeige ist eine Form einer solchen Kompensationsanzeige. In diesem Fall wird ein perspektivischer Blick aus einer festen Position hinter dem Fahrzeug auf die Landkarte berechnet, was gegebenenfalls die Orientierung für den Fahrer erleichtert.

In manchen Navigationssystemen wird eine Mischung beider Prinzipien realisiert, sodass sich das Fahrzeugsignal moderat in einem begrenzten Bereich innerhalb der Karte bewegt, die sich ebenfalls innerhalb des Bildschirms bewegt.

Im Zusammenhang mit den Bedienoberflächen von Software hat man es im Allgemeinen mit der Darstellung der Folgeaufgabe zu tun (mittels der Maus, dem Drehdrücksteller oder dem Finger bei einem Touchscreen kann man die einzelnen Positionen auf dem Bildschirm anfahren, wobei deren Lage nicht von der Mausposition abhängt). Da der Bildausschnitt durch die Größe des Monitors allerdings beschränkt ist, ist oftmals eine Verschiebung der Darstellung notwendig. Verwendet man den Scroll-Balken, tritt dabei ein Kompatibilitätsproblem auf: Wird durch den Scroll-Balken die Position des Ausschnittes oder die Position des Objektes hinter dem Ausschnitt bewegt? Das Problem ist durch den Übergang auf die Darstellungsform einer Folgeaufgabe lösbar: indem der Mauszeiger auf ein freies Feld (Hintergrund) der Darstellung gebracht wird, kann bei gedrückter Maustaste der Bildschirminhalt richtungskompatibel verschoben werden. Das ist auch bei Verwendung eines Touchscreens der Fall. Auch der automatische Wechsel in eine Kompensationsdarstellung, wenn der Mauszeiger am Bildrand ist, wird in vielen Fällen intuitiv richtig verstanden.

Das Steuern eines Fahrzeugs über die natürliche Sicht in der Verkehrsumwelt ist immer eine Kompensationsaufgabe, da nur die Differenz zwischen der eigenen Position und der gewünschten Position in der Außenwelt wahrgenommen werden kann. Allerdings wäre die hochdynamische Fahraufgabe ohne die Voraussicht auf die Straße gar nicht zu bewältigen. Diese Voraussicht ermöglicht es dem Fahrer, durch mentalen Aufwand dem Lenken eines Fahrzeugs den Charakter eine Folgeaufgabe zu geben. Dies ist vor allem im niedrigen Geschwindigkeitsbereich bei Rangiermanövern der Fall. Aus informationsergonomischer Sicht müssen deshalb im höheren Geschwindigkeitsbereich (aller Erfahrung

nach > 40 km/h) in einem Fahrzeug Größen, die mit der Außenwelt zu tun haben (z. B. Darstellung des korrekten Kurses in einem Navigationsgerät an einer Kreuzung) in Form einer Kompensationsanzeige (fahrtrichtungsweisend oder Bird-view; siehe oben) dargestellt werden. Im niedrigen Geschwindigkeitsbereich ist demgegenüber ggf. die Anzeige in Form einer Folgeaufgabe vorzuziehen (z. B. Anzeige einer Einparkhilfe).

Aufgabenart: Für den das Fahrzeug betätigenden Menschen ist es ein grundsätzlicher Unterschied, ob er selbst aktiv in den Arbeitsprozess eingebunden ist, oder ob er nur die Grundeinstellungen eines automatisierten Prozesses festzulegen und dann dessen Arbeitsweise zu beobachten hat. Man spricht von *aktiver* bzw. *monitiver* Aufgabe des Menschen. Da es ja geradezu die Domäne des Rechners ist, auch einen komplexen Prozess intelligent zu steuern bzw. zu regeln, gewinnen heute solche automatisierten Prozesse auch im Fahrzeug mehr und mehr an Bedeutung (ein bekanntes Beispiel ist der Abstandsregeltempomat).

Gut bekannte Eigenschaften des Menschen und die der Maschine können für die Entscheidung der Auswahl von Automatik oder Handsteuerung herangezogen werden: Automatisierung muss generell empfohlen werden, wenn Probleme mit menschlichen Grenzen hinsichtlich der Genauigkeit, Schnelligkeit und Zuverlässigkeit auftreten. Diese Empfehlung hat jedoch nur dann Gültigkeit, wenn ausschließlich solche Situationen vorkommen, für die der Gestalter Vorkehrungen getroffen hat. Da hierfür jedoch gerade im Straßenverkehr keine Garantie gegeben werden kann, wird jeder automatisierten Teilaufgabe der Mensch als Beobachter (Monitor) beigesellt.

Monitive Systeme haben Nachteile, die aus dem Risiko der Monotonie erwachsen und somit zu einem Verlust der Wachsamkeit des Operateurs führen[3]. Außerdem verliert der Fahrer durch die ständig wirkende Automatik womöglich an Übung mit dem Umgang der Systemelemente und ihren Wirkungsweisen. Insbesondere erwächst der Nachteil, dass der Fahrer aufgrund seiner unzureichenden Vertrautheit mit dem System bei einem eventuellen Ausfall der Automatik Schwierigkeiten mit der Systemsteuerung bekommt. Gerade im Straßenverkehr ist wegen der Komplexität der Situationen und der Schwierigkeit, adäquate technische Signale aufzunehmen und zu verarbeiten, eine vollständige Automatisierung bislang überhaupt nicht vollständig möglich. Damböck (2013) konnte zeigen, dass der Fahrer mindestens 6–8 Sekunden benötigt, um aus einer vollkommenen Ablenkung die für ihn nun unbekannte Situation der Verkehrsaußenwelt korrekt zu erfassen und situationsgerecht zu reagieren (siehe auch Gold 2013; Petermann-Stock et al. 2013).

Für Bereiche, in denen Teilautomatisierung oder Automatisierung realisierbar ist (heute z. B. für das automatische Abstandhalten oder für die Spurführung an gut markierten Straßen), ist also im Hinblick auf die Gesamtzuverlässigkeit des Systems unbedingt darauf zu achten, den Menschen irgendwie in das Mensch-Maschine-System derart einzubinden, dass seine Aufmerksamkeit und sein Trainingszustand aufrechterhalten bleiben[4]. Die Vorteile einer monitiven Aufgabengestaltung für den zuverlässigen Betrieb in vorgeplanten Situationen können in Verbindung mit dieser Forderung erhalten bleiben, wenn durch den Automaten nur die örtlichen und zeitlichen Grenzen zuverlässig bestimmt werden, innerhalb deren der Fahrer die zu beeinflussenden Größen des Systems zu halten hat. Der Fahrer muss dann innerhalb dieser Grenzen das Fahrzeug immer selbst steuern. Wenn er die Grenzen berührt, wird ihm dies durch das Fahrzeug in adäquater Weise vermittelt (siehe ► Abschn. 6.1.2 „Rückmeldung“) und er kann entscheiden, ob er der Empfehlung der Automatik folgt oder die Regelung selbst übernimmt. Da es aber viele technisch/physikalische Bedingungen gibt, unter denen ein solches System nicht zuverlässig arbeiten kann, muss dem Fahrer eine Rückmeldung über den gegenwärtigen Systemzustand gegeben werden (sog. Mode Awareness).

3 Allerdings kann auch eine langweilige ereignisarme, aktiv durchgeführte Fahraufgabe zur Monotonieeffekten führen. Dann ist womöglich der automatisierte Fahrvorgang sogar ein Sicherheitsgewinn.

4 Aus Gründern der „Verkaufbarkeit“ wird heute in der Argumentation dem vollautomatischen Fahren größere Attraktivität zugeschrieben, weil sich so der Passagier – ähnlich wie der Bahnreisende – auf langweiligen Strecken mit anderen Dingen beschäftigen kann. Leider wird dies auch mit dem Argument der Erhöhung der Verkehrssicherheit verbunden, was aber stark anzuzweifeln ist (siehe Abschn. 2.6 und 9.3).

6.1.2 Rückmeldung

Die Rückmeldung des Erreichten an den Fahrer ist einer der wichtigsten Faktoren, durch die ein zusammenhängendes Verständnis des Systemzustands vermittelt werden kann. Wenn zudem die Information über den Zustand des Systems durch unterschiedliche Sinnesorgane vermittelt wird, ist diese Redundanz generell positiv zu bewerten. Die menschliche Situationserfassung („situation awareness") wird u. a. verbessert, wenn dieselbe Information durch mindestens zwei, besser noch mehr Sinnesorgane möglichst gleichzeitig wahrgenommen wird (z. B. Hinweis auf eine Gefahr durch Aufleuchten einer Kontrollleuchte *und* eines akustischen Signals). Ein weiterer besonders wichtiger Aspekt ist die Zeitspanne, die zwischen der Eingangsinformation am Stellteil und der Reaktion des Systems auf der Ausgangsseite besteht. Wenn diese Zeit 200 ms übersteigt (Dauer der menschlichen Informationsaufnahme), führt dies zur Verwirrung und Desorientierung des Fahrers, weil der Bezug zu der eigenen Handlung verloren geht. Ist ein solcher Zeitverzug aus technischen Gründen nicht vermeidbar, muss dies angezeigt werden (z. B. im primitivster Weise durch das bekannte „Sanduhrzeichen" oder ähnliches). Beträgt der Zeitverzug mehr als 2 sec., so erscheint der zu regelnde Prozess dem Operateur wie eine Steuerung (offenes System). Er benötigt dann zumindest die sofortige Rückmeldung über den betätigten Systemeingang (z. B. Aufleuchten des Buttons). Besser ist in diesem Fall allerdings die exakte Rückmeldung über den Fortschritt des Prozesses (z. B. Verlaufsanzeige über einen wachsenden Balken und Angabe der zu erwartenden Restzeit beim Aufrufen eines Computerprogramms).

Die Lage- bzw. Positionsänderung eines Stellteils stellt u. a. eine wichtige Rückmeldung über den gegenwärtigen Schaltzustand eines Gerätes dar. Götz (2007) argumentiert, dass Stellteile, die bei der Bedienung ihre Form verändern, bisher zwar noch nicht bekannt sind. Sollten aber neuartige Materialien in der Lage sein, während oder unmittelbar (< 200 ms!) nach der Betätigung ihrer Form zu verändern (zum Beispiel Compound-Materialien), so wäre es durchaus denkbar, diese Eigenschaft zur Rückmeldung zu nutzen. Variable Tastenformen (zum Beispiel eckig, rund) wären auf die Art und Weise in der Lage, über funktionale Veränderungen zu informieren.

Für alle Arten der Rückmeldung gilt, dass sie bezüglich der entsprechenden Sinnesmodalität überschwellig gestaltet sein müssen und der notwendige Signal-Rausch Abstand einzuhalten ist. Welche technischen Mittel auch immer angewendet werden, eine gut gestaltete Rückmeldung muss dem Fahrer stets die Antwort auf die Fragen erlauben:

- „Was habe ich getan?"
- „In welchem Zustand befindet sich das System?"

6.1.3 Kompatibilität

Kompatibilität beschreibt die Leichtigkeit, mit der ein Operateur Information zwischen verschiedenen Informationskanälen umkodieren kann. Dabei ist zwischen primärer und sekundärer Kompatibilität zu unterscheiden.

Primäre Kompatibilität bezieht sich auf die Kombinationsmöglichkeiten verschiedener Informationsbereiche wie Realität, Anzeigen, Stellteile und innere Modelle des Operateurs (siehe Tab. 6.3). Innerhalb der primären Kompatibilität kann weiterhin zwischen externer und interner Kompatibilität unterschieden werden: *Externe Kompatibilität* bezieht sich auf die Interaktion zwischen Mensch und Fahrzeug hinsichtlich der Außenwelt („Realität"; ein Beispiel hierfür ist die Kompatibilität von Lenkraddrehung und Bewegung des Fahrzeugs), während *interne Kompatibilität* die Wechselwirkung zwischen der Außenwelt und den entsprechenden inneren Modellen des Menschen berücksichtigt. Wie in Tab. 6.3 dargestellt, ist eine ergonomische Gestaltung nur in bestimmten Bereichen möglich. So ist z. B. die Kompatibilität unterschiedlicher Informationen in der Realität trivial. Andererseits kann Kompatibilität zwischen der Realität und inneren Modellen nur durch Erfahrung, Training und Erziehung erreicht werden. Kompatibilität zwischen verschiedenen inneren Modellen entspricht einem widerspruchsfreien Verständnis der Situation. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass jeder Mensch bestimmte Inkonsistenzen hinsichtlich der Vorstellungen in verschiedenen Bereichen seines Gedächtnisses hat, was u. a. auch

Tab. 6.3 Ergonomische Gestaltungsbereiche der Kompatibilität

	Primäre Kompatibilität			
	externe			interne
	Realität	Anzeige	Bedien-element	inneres Modell
Realität	trivial	●	●	Erfahrung Training Erziehung
Anzeige		●	●	●
Bedien-element			●	●
inneres Modell				eindeutiges Verständnis der Situation

● ergonomische Gestaltungsmöglichkeiten

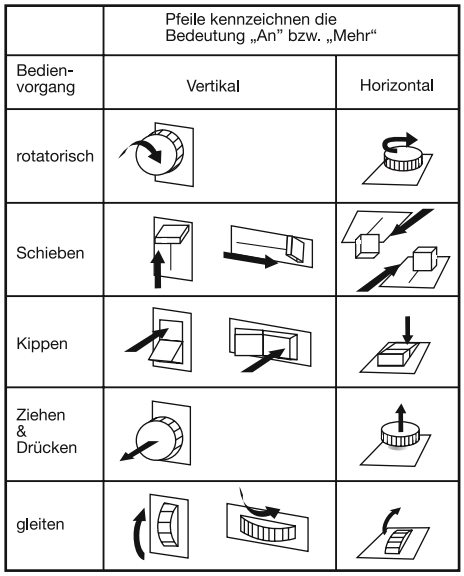


Abb. 6.4 Stereotype Bedienung nach SAE J1139

dazu führt, dass eine bestimmte unter gegebenen Umständen durchgeführte Handlung von einem Außenstehenden nicht verstanden wird. Die verbleibenden Bereiche in Tab. 6.3 können ergonomisch in dem Sinne gestaltet werden, dass beispielsweise eine Bewegung nach vorne oder nach rechts in der Wirklichkeit einer Bewegung vorwärts oder nach rechts am Zeiger oder am Stellteil entspricht usw. Diese sog. *räumliche Kompatibilität* spielt im Zusammenhang mit der Verbindung der Repräsentation der realen Außenwelt auf einer Anzeige (z. B. Bildschirm) eine herausragende Rolle[5].

Die interne Kompatibilität ist durch sog. Stereotypien charakterisiert (siehe Abb. 6.5), die für bestimmte Zusammenhänge möglicherweise nur im westlichen Kulturkreis diese Bedeutung haben (wahrscheinlich bedingt durch die Schreibgewohnheit von links nach rechts und von oben nach unten – allerdings ist zu unterstellen, dass wegen der Dominanz der primär im westlichen Kulturkreis entwickelten technischen Geräte diese Zuordnung auch in anderen Kulturkreisen zumindest für technische Objekte übernommen worden ist). In der SAE J1139 sind die Wirkweisen verschiedener Bedienteile und ihre **stereotype Bedienung** beschrieben. Generell bedeutet ein nach vorne oder nach oben Schieben Anschalten oder Vergrößern (siehe auch Abb. 6.4).

5 Eine historisch entstandene Inkompatibilität dieser Art stellt die Gestaltung des Wählhebels eines Automatikgetriebes auf der Mittelkonsole dar: um den *Rückwärts*gang einzulegen, muss der Wählhebel nach *vorne* bewegt werden, während für die *Vorwärts*richtung der Hebel nach *hinten* zu bewegen ist. Unter Umständen liegt eine Ursache für die in den 80er Jahren in den USA virulent gewordenen „Unexpected-Acceleration-Unfälle" in dieser Auslegungsform. Bei einem Rangiermanöver müssen nämlich miteinander völlig inkompatible Bewegungsvorgänge zwischen Wählhebelbewegung und Fußbewegung auf der Pedalerie vorgenommen werden.

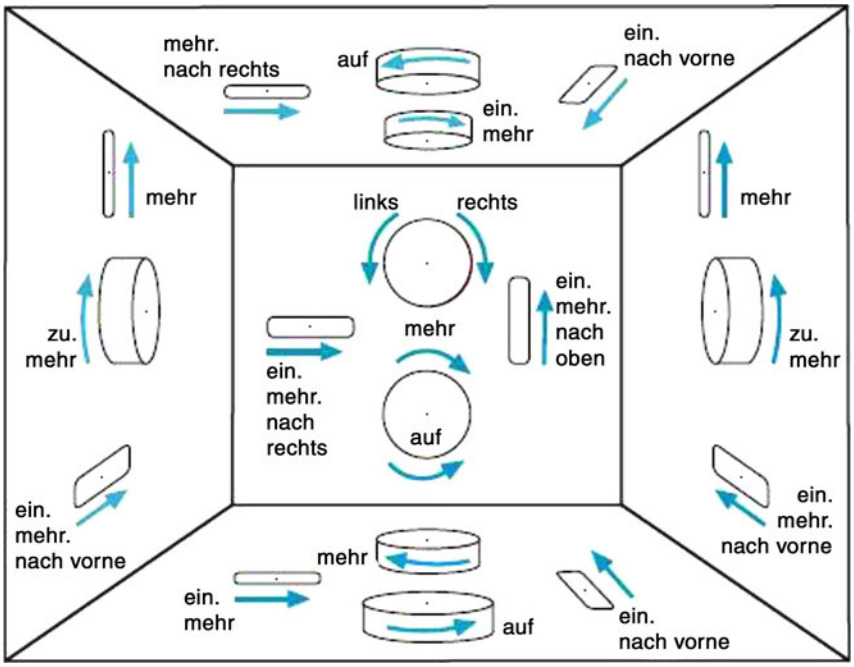


Abb. 6.5 Stereotypien nach Götz (2007) in Anlehnung an Woodson (1992). Bei dem Drehknopf in der rechten Wand der Abb. 6.5 ist Vorsicht geboten, da es sich hier um sekundäre Inkompatibilität handelt!

Die kontinuierliche Wiederholung stereotyper Bedienung auch außerhalb der automobilen Anwendung führt zu einer Erwartungshaltung des Benutzers, die eine bestimmte Wirkweise für die Bedienelemente voraussetzt. Entspricht die technische Umsetzung dieser Erwartungshaltung spricht man von „*Erwartungskonformität*". Im Laufe der fortschreitenden technischen Entwicklung und der Internationalisierung der Zulassungsvorschriften haben sich auch abweichende Varianten zu stereotypen Bedienregeln ergeben, sowie zum Teil auch markentypische Bedieneinrichtungen, die in den Erfahrungsschatz der markentreuen Kundschaft eingegangen sind. Ein prominentes Beispiel ist hier die Taste der elektrischen Feststellbremse. Die stereotype Bedienung des Schalters zu Einschalten der Feststellfunktion wäre, wie bei anderen Schaltern auch, die Taste zu drücken. Zum Lösen (Öffnen der Bremse) müsste sie angehoben („gelüftet") werden. Die Funktion leitet sich jedoch historisch von dem mechanischen Handbremshebel ab, der zum Feststellen des Fahrzeuges nach oben gezogen werden muss. Diese Wirkweise wurde auf den elektrischen Schalter übertragen und kann beim Erlernen der Funktion zu Irritationen führen. Ein Teil der etwas schleppenden Akzeptanz der elektrischen Feststellbremse ist sicherlich auf die von der stereotypen Bedienung abweichende Betätigung zurückzuführen. Je konstanter solche Abweichungen oder auch spezielle Anordnungen in den Produkten eines Markenherstellers auftreten, umso mehr wird diese Form und Wirkungsweise als markentypisch wahrgenommen und erwartet. Der Kunde wird auf eine Funktionalität konditioniert und bringt diese Bedienweise mit der Marke in Verbindung. Eine Änderung der Konditionierung ist jedoch mit fehlerbehafteten Lernvorgängen behaftet und kann seitens des Anwenders zu Irritationen oder gar Verärgerung über die Fehlbedienung führen. Eine Änderung der Bedienweise und vor allem die Abweichung von Konditionierung und stereotyper Betätigung sollte bei Modellpflege oder -wechsel äußerst feinfühlig vorgenommen werden.

Sekundäre Kompatibilität bedeutet, dass ein innerer Widerspruch zwischen Teilaspekten der Kompatibilität vermieden wird. So ist beispielsweise ein hängender Zeiger sekundär inkompatibel, da die Bewegung von „links = wenig" zu „rechts = viel" mit einer dazu inkompatiblen Linksdrehung verbunden ist. Auch die Variante fester Zeiger bewegte Skala ist sekundär inkompatibel, weil hier die Bewegungsrichtung der Skala immer inkompatibel zu

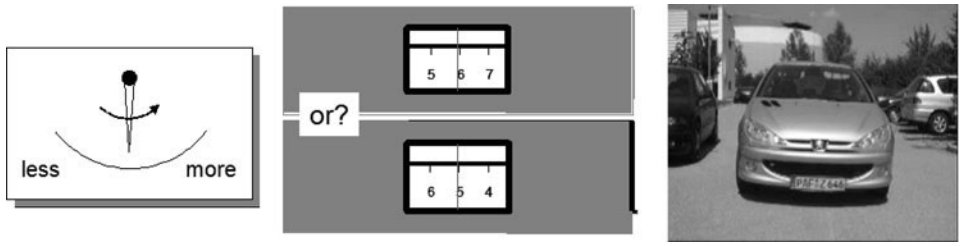


Abb. 6.6 Beispiele für sekundäre Inkompatibilität

der Anordnung der Rangfolge der Ziffern ist. Da die Bedienelemente prinzipiell auch Anzeigencharakter haben, gilt das Gesagte dafür auch. So ist beispielsweise die Anbringung von Beschriftungen auf einen Drehschalter, der sich gegenüber einer festen Marke bewegt, gleichbedeutend mit der erwähnten Variante „fester Zeiger – bewegte Skala". Sekundäre Inkompatibilität bezieht sich aber nicht nur auf zueinander widersprüchliche Drehbewegungen, sondern generell darauf, dass verschiedene Kompatibilitätsforderungen zueinander in Widerspruch stehen. Ein Beispiel dafür ist die Anordnung des Blinkers im inneren Winkel des Schweinwerfers. In diesem Fall ist die Position des Blinklichts im Scheinwerfergehäuse inkompatibel zu der Anordnung des Schweinwerfers im Fahrzeug. Beispiele zeigt Abb. 6.6. Meist fallen bei der Betrachtung im Designbüro diese Widersprüche nicht auf, weil bei der rationalen Überlegung „doch klar ist, wie es gemeint ist". Im realen Verkehrsgeschehen kommt es aber gegebenfalls auf die unmittelbare, zweifelfreie und schnelle Interpretation an und hier spielt dann die sekundäre Inkompatibilität doch eine wichtige Rolle, weil sie Anlass für eine Fehlinterpretation sein kann. Allerdings ist ihre Bedeutung gerade deswegen experimentell schwierig nachzuweisen. Inkonsistente Kompatibilitätsregeln und Zuordnungen (verschiedene Drehrichtungen in unterschiedlichen Menues) innerhalb eines Gerätes sind aber unbedingt zu vermeiden.

6.2 Mensch – Maschine – Interaktion

Die Stellen, an denen Information vom Menschen auf die Maschine, d. h. auf das Fahrzeug übertragen und wo umgekehrt vom Fahrzeug Information auf den Menschen übertragen wird, bezeichnet man als die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine. Der Begriff Schnittstelle ist dabei insofern korrekt, als sich der Mensch ja vom Fahrzeug entfernen kann und damit die Informationsübertragung getrennt ist. Andererseits ist dieser Begriff aber auch irreführend, da er suggeriert, dass Fahrzeug und Fahrer im Fahrbetrieb informationstechnisch gesehen völlig getrennt sind. Das ist aber nicht korrekt: ein erfolgreiches Bedienen des Fahrzeugs durch den Fahrer ist nur möglich, wenn dieser eine gewisse Vorstellung von der technischen Funktion des Fahrzeugs besitzt, wenn er zumindest weiß, welchen Effekt eine bestimmte Handlung haben wird. Umgekehrt hat auch „das Fahrzeug eine Vorstellung vom Fahrer", die durch den Fahrzeuggestalter implementiert worden ist, da dieser sich bei der Konzeption der Bedienung eine Vorstellung von der Ideenwelt des zukünftigen Nutzers machen musste[6]. Bei der Gestaltung der Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug ist dieser Aspekt in jedem Fall zu berücksichtigen. Meyer-Eppler (1959) beschreibt dieses Phänomen in der Form so, dass der Gestalter eines Produktes eine Botschaft sendet, von der – abhängig von der produktsprachlichen Qualität – der Nutzer als Empfänger nur eine Untermenge versteht. Dieser interpretiert aber in das Produkt weitere Botschaften, die vom Gestalter in dieser Form gar nicht gedacht waren. „Aufgabe des Designers in seiner Funktion als Fachmann auf dem Gebiet der Formgebung ist es, die verschiedenen Funktionen eines Produktes so in Zeichen zu übersetzen, dass diese

6 Oftmals leitet er diese Vorstellung der Ideenwelt des zukünftigen Fahrers aus seinen eigenen Vorstellungen ab, die aber wesentlich von seiner eigenen Ausbildung und dem bis dahin abgelaufenen Entwicklungsprozess abhängen. Eine konsequente Anwendung systemergonomischer Regeln soll solchen „Kurzschlüssen" vorbeugen.

vom potentiellen Benutzer verstanden werden. Dafür ist es erforderlich, dass sich der Designer insbesondere über die Zeichenrepertoires der jeweiligen Benutzer im Klaren ist" (Götz 2007, siehe auch der von Norman 1988 geprägte Begriff „Affordance"). Dabei ist der fundamentale nachrichtentechnische Grundsatz zu berücksichtigen: Bedeutung entsteht nicht beim Sender (das ist hier die spezifische Gestaltung), sondern erst beim Empfänger (das ist hier der Nutzer des Fahrzeugs). Missverständliche und mehrdeutige Gestaltung kann beim Nutzer Bedeutungen hervorrufen, die zu Fehlbedienungen und Ablehnung eines Produktes führen (Götz 2007; Bengler et al. 2012).

Ganz allgemein werden alle technischen Elemente als ***Anzeigen***[7] bezeichnet, über die gezielt auf gestalterische Weise Information auf den Menschen übertragen wird. Dabei kommen alle Sinnesorgane infrage, so dass man im Wesentlichen *optische, akustische und haptische Anzeigen* unterscheidet. Thermische Anzeigen sind ungebräuchlich. Über die Kinästhetik werden dem Fahrer zwar auch relevante Informationen vermittelt. Im Allgemeinen versteht man dies aber nicht als Anzeige, obwohl über die Gestaltung der fahrrelevanten Eigenschaften dem Fahrer durchaus in unterschiedlicher Weise mehr oder weniger gezielt Information kontinuierlich über den dynamischen Fahrzustand vermittelt wird (näheres hierzu in ► Abschn. 6.4).

Als ***Bedienelemente***[8] bezeichnet man die technischen Einrichtungen, über die Information vom Menschen auf die Maschine übertragen wird. Traditionell spielen hierbei all die Elemente eine Rolle, die mechanisch mit den Extremitäten, also den Fingern, Händen und Beinen betätigt werden. Im Wesentlichen unterscheidet man also *Fußstellteile* (Pedale) und *Handstellteile* (Hebel, Knöpfe, Taster u.v.ä.). Mit den zunehmenden Möglichkeiten der Informationsverarbeitung kommen als Bedienelemente auch Sensoren (Mikrofon, Kamera, IR-Sensor) zunehmend in Gebrauch, über die Informationen an eine im Computer technisch realisierte Detektionseinheit und Interpretationseinheit (Spracherkennung, Mimikerkennung, Gestikerkennung) übermittelt werden, durch welche dann entsprechende Funktionen ausgelöst werden (Bengler 2001, 2005; Bengler et al. 2012).

Durch Anzeigen soll die Information, die vom Fahrzeug kommt, so codiert werden, dass ihr vom Nutzer im Sinn der Semantik Bedeutung zugeordnet werden kann. Über das Bedienelement soll der Nutzer seine Intentionen so codieren, dass das Fahrzeug diese ausführt. In jedem Fall sind dabei Codesysteme zu nutzen, die es ermöglichen, dass die Informationen von einem möglichst großen Anteil der Gesamtbevölkerung verstanden werden (Rühmann 1993). Den Vorschlag von Götz (2007) ergänzend kommen dafür grundsätzlich folgenden Codesysteme in Betracht:

- *Positionscodierung*: Die Orientierung im Raum ist eine fundamentale Fähigkeit des Menschen und somit die Hauptvoraussetzung für weitgehend fehlerfreies Zurechtfinden und Bedienen.
- *Bewegungscodierung*: Durch die Art der Bewegung, die für die Betätigung eines Bedienelements notwendig ist, können Bedienvorgänge eindeutig voneinander unterschieden werden. Dabei ist in vielen Fällen die äußere Kompatibilität zu beachten (z. B. „Bewegung nach vorne = Effekt nach vorne" – Beispiel: Umschalten zwischen Fern- und Abblendlicht). Wenn es deswegen zwischen verschiedenen Anforderungen zu Interferenzen kommt, kann dem durch eine andere Positionscodierung oder die Formcodierung begegnet werden (z. B. kann die Forderung, die Geschwindigkeitswahl des Tempomaten durch eine Bewegung nach „vorne = mehr" zu realisieren, mit obigem Beispiel der Fahrlichtfunktion in Konkurrenz stehen).
- *Formcodierung*: Bedienelement aber auch Anzeigen sollen sich durch ihre Form unterscheiden, um so eine – zwar erlernte – aber sichere Zuordnung der dargebotenen bzw. übertragenen Funktion zu aufgabenrelevanten

7 Wie Bernotat (1993) ausführt, hat sich der Vorschlag der VDI/VDE Richtlinie Nr. 2172 E nicht durchsetzen können, die Information übertragenden technischen Elemente grundsätzlich als „Anzeiger" zu bezeichnen.

8 Von vielen vor allem humanwissenschaftlich orientierten Autoren wird immer wieder vorgeschlagen, statt der Bezeichnung „Bedienelement" die Bezeichnung „Stellteil" zu verwenden, da der Mensch ja nicht Diener der Maschine sei. In der deutschsprachigen ergonomischen Literatur haben sich jedoch beide Bezeichnungsweisen etabliert (engl.: „control element").

Inhalten bzw. beabsichtigten Intentionen sicherzustellen. Insbesondere spielt dabei für die Gestaltung von Bedienelementen die haptische Rückmeldung eine wichtige Rolle.

- *Größencodierung*: In gewisser Weise ist die Größencodierung eine spezielle Ausführung der Formcodierung. Durch sie kann u. a. die Wichtigkeit codiert werden (z. B. kleines Rundinstrument für den Öldruck – großes Rundinstrument für Tacho oder Drehzahlmesser; großer Drehknopf für das Umschalten verschiedener Möglichkeiten im zentralen Bedienfeld – kleiner Drehknopf für die Radiolautstärke).
- *Farbcodierung*: Durch die gewählte Farbe sollte der Bedeutungsgehalt aus der Alltagserfahrung berücksichtigt werden (z. B.: Rot = Gefahr, Gelb = Achtung, Grün = Normal/Gefahrlos) Die Farbcodiergrundsätze für Anzeige und Bedienelement sind ausführlich in DIN EN 60073 bzw. DIN 04844 dargestellt.
- *Zeichencodierung*: Durch eine gut gemachte Zeichencodierung wird das Erlernen von Funktionen in einem für den Nutzer unbekannten Fahrzeug bzw. von bisher unbekannten Funktionen bedeutend erleichtert. Auch für selten genutzte Funktionen bzw. selten dargebotene Informationen kann eine sachgerechte und das Wissen des Nutzers auffangende Codierung sehr hilfreich sein. Alphanumerische Zeichen ermöglichen dabei eine sehr eindeutige Bedeutungszuweisung, insbesondere, wenn man moderne bildschirmbasierte Anzeigesysteme nutzt, in denen ganze Sätze darstellbar sind. Die Wortcodierung ist allerdings sprachgebunden[9] und sollte deshalb bevorzugt in bildschirmbasierten Anzeigesystemen angewendet werden, wo rechnergespeichert unterschiedliche Sprachen hinterlegt werden können. Piktogramme sind demgegenüber sprachunabhängig, sollten aber nur auf wenige Bedien-und Anzeigefunktionen, die zudem häufig benutzt werden (z. B. Lichtfunktionen, Scheibenwischer, Horn) beschränkt sein. Sie helfen dem gelegentlichen Nutzer, sich in einem unbekannten Fahrzeug schnell zurechtzufinden. Wegen deren schnellerer Erfassbarkeit ist es sinnvoll, immer eine Kombination von Piktogrammen und Beschriftung zu wählen, wenn die Umstände dies zulassen (Bengler et al. 2012).

Für die genannten Codierungen gilt eine Rangfolge der Wichtigkeit, die durch obige Aufzählung wiedergegeben ist. D. h. die Positionscodierung ist immer wichtiger als die Bewegungscodierung und diese wichtiger als die Formcodierung usw. Dabei ist die Erkenntnis wichtig, dass keine der oben genannten Codierungen selbsterklärend ist. Jede muss erlernt werden. Die Lernvorgänge werden allerdings wesentlich erleichtert, wenn an vorhandenes Wissen angeknöpft werden kann und wenn durch die Beachtung der Grundsätze der Kompatibilität und der Rückmeldung das einmal Erfahrene sich schnell verfestigen kann[10].

Die genaue Lokalisation von Anzeigen und Bedienelementen ist eine komplexe Aufgabe, die im Rahmen der anthropometrischen Auslegung des Fahrzeugs (Packaging) gelöst werden muss. In jedem Fall sind aber die Beschriftungen von Anzeigen und Bedienelementen so festzulegen, dass die entsprechenden Informationen auch von dem weit hinten sitzenden großen Mann unter Berücksichtigung der Normalsehfähigkeit abgelesen werden können. Bedienelemente müssen zudem in dem sowohl für die weit vorne sitzende kleine Frau wie den weit hinten sitzenden großen Mann verfügbaren Greifraum installiert sein.

Wie bereits in ▶ Abschn. 1.2 dargelegt, hat sich in der historischen Entwicklung im Sinne eines Schemas eine Anordnung von Anzeigen und Bedienelementen im Fahrzeug etabliert, welche im linken Armaturenbereich die Lichtfunktion, im Bereich um und hinter dem Lenkrad alle primären und sekundären Fahrfunktionen und in der Fahrzeugmitte die Funktionen des so genannten Fahrzeuginformati-

9 Es ist ein Irrglaube, anzunehmen, dass die meisten technischen Begriffe in englischer Sprache auf Allgemeinverständnis stoßen!.

10 Auch die berühmten Wischbewegungen bei der Nutzung von Smartphones sind nicht selbsterklärend. Da sie aber Grundsätze der Kompatibilität und Rückmeldung gut berücksichtigen und an Alltagserfahrungen anschließen, werden sie so schnell erlernt, dass dies überhaupt nicht mehr als „mühsames Lernen" empfunden wird.

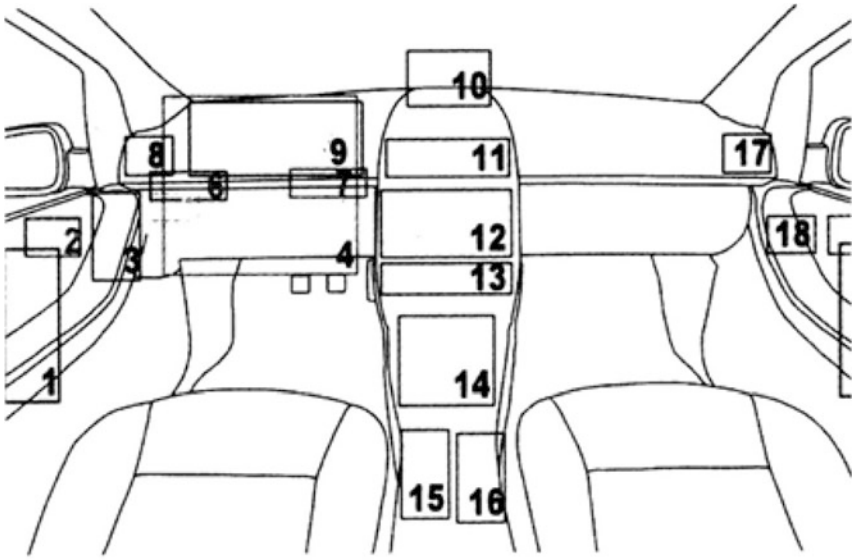


Abb. 6.7 Anordnungsbereiche der Bedienelemente im Basiscockpit nach Schmid und Maier (2012)

1: Türgriff, links & rechts / 2: Türöffner, links & rechts / 3: Fensterheber, Spiegelverstellung, Zentralverriegelung / 4: Multifunktionslenkrad / 5: Lichtschalter / 6: linker Lenkstockhebel / 7: rechter Lenkstockhebel / 8: linke Luftdrüse & dazugehörige Regelung / 9: Kombiinstrument / 10: Zentrales Display / 11: mittige Luftdüsen & dazugehörige Regelung / 12: Klimamodul / 13: Entertainmentmodul / 14: Schalthebel / 15: Bedieneinrichtung für zentrales Display / 16: Handbremse / 17: rechte Luftdüse & dazugehörige Regelung / 18: Fensterheber für Beifahrerseite

onssystems (FIS, u. a. Radio, Navigationssystem) sowie sonstige tertiäre Komfortfunktionen (z. B. Heizung/Klimaeinstellung) vorsieht (siehe auch Abb. 1.8). Schmid und Maier (2012) teilen den Cockpitraum in folgende Zonen ein:

- primärer Bereich: zentrales Sehfeld/Beidhandzone
- sekundärer Bereich: peripheres Sehfeld/Einhandzone
- tertiärer Bereich: außerhalb des Sehfeldes/erweiterte Einhandzone.

In diesen Zonen sind die Bedienelemente und Anzeigen der primären, sekundären und tertiären Fahraufgaben unterzubringen. Aus diesen Überlegungen entwickeln sie ein Basiscockpit, das weitgehend ergonomische Forderungen erfüllt, ein hohes Maß an „Selbsterklärungsfähigkeit" (siehe dazu die Bemerkungen im vorangegangenen Abschnitt) beinhaltet und damit einen wesentlichen Beitrag für die aktive Sicherheit leistet (Abb. 6.7).

6.2.1 Anzeigen

Durch Anzeigen soll ein Abbild der Außenwelt bzw. technischer Details (Messwerte) dem Nutzer verfügbar gemacht werden. Dies kann – wie bereits angesprochen – auf visuellem, akustischem und taktilem Weg und in entsprechenden Kombinationen (multimodal) geschehen. Im Sinne des Regelkreisbildes der Abb. 1.9 haben alle Anzeigen, die Information über den technischen Zustand des Fahrzeugs sowie dessen Bewegung vermitteln, auch Rückmeldecharakter. Bedienelemente, die durch den Nutzer mechanisch betätigt werden, können über die haptische Sinnesqualität ebenfalls Rückmeldung zumindest über ihre Betätigung vermitteln. Insbesondere viele Bedienelemente, die über die Hände bzw. Finger betätigt werden, haben durch die dadurch eingenommene neue Stellung Anzeigecharakter. Für sie gelten also im Prinzip – soweit anwendbar – die im Folgenden dargestellten Regeln für visuelle Anzeigen.

Abb. 6.8 Visuelle Anzeigen und geistige Leistung am Beispiel der Navigation (Israel 2013)

6

6.2.1.1 Visuelle Anzeigen

In Abhängigkeit vom Abstraktionsgrad der Darstellung unterscheidet man bei visuellen Anzeigen digitale, analoge, bildhaft situationsanaloge, fotorealistische bzw. kontaktanaloge Anzeigen. Am Beispiel der Navigationsanzeige hat Israel (2013) diese Stufen anschaulich gemacht und zugleich eine Abschätzung der geistigen Leistung vorgenommen, die notwendig ist, um den Anzeigeninhalt mit der Wirklichkeit in Kongruenz zu bringen (Abb. 6.8).

Digitale Anzeigen: Bei digitalen Anzeigen wird ein Kontinuum von Werten mit Bezug zur realen Welt in Segmente unterteilt und nur der Wert des augenblicklich aktuellen Segmentes angezeigt. So ist beispielsweise die Anzeige des Zustandes aus/an in Form von zwei oder auch nur einem Lämpchen bereits eine sehr einfache Form der digitalen Anzeige. Normalerweise wird diese Form für die Rückmeldung eines Betriebszustandes angewendet. Im Fahrzeug sollten dabei nicht mehr als drei Zustände – normalerweise zusätzlich farblich oder durch ein adäquates Symbol codiert – dargestellt werden. In den meisten Fällen wird aber der entsprechende Wert in Form von alphanumerischen Ziffern dargestellt. Durch die Anzahl der Stellen (sog. Digits) kann die Genauigkeit festgelegt werden, mit der der entsprechende Wert abgelesen werden kann (dabei sollte die technische Genauigkeit des Messinstrumentes mindestens um den Faktor zwei, besser eine Zehnerpotenz größer sein als die verwendete Anzeigegenauigkeit). Im Fahrzeug sollten nicht mehr als drei, max. vier Digits verwendet werden. Prinzipiell ist die Fehlerrate auch beim schnellen Ablesen einer digitalen Anzeige gegenüber allen anderen Formen der Anzeige sehr gering. Digitale Anzeigen sind immer dann zu empfehlen, wenn von der Aufgabe her das korrekte Ablesen des numerischen Wertes von ausschlaggebender Bedeutung ist.

Lange Zeit wurde die Digitalanzeige in Form der so genannten Siebensegmentanzeige realisiert, weil diese Technologie relativ preiswert zur Verfügung stand. Der Umstand, dass solche Anzeigen auch in billigen Uhren verwendet werden, hat wohl neben anderem dazu geführt, dass der Aspekt des Gefallens zuungunsten der Digitalanzeige ausgefallen ist (Abb. 6.9). Heute werden TFT oder OLED Displays verwendet, die eine sehr feine Auflösung der Anzeige ermöglichen (mindestens eine 7×11-Matrix für jede Ziffer/Buchstaben) und somit auch ein unter dem Aspekt des Designs ansprechendes Äußeres gewährleisten.

Analoge Anzeigen: Durch analoge Anzeigen wird das Kontinuum der Realität durch ein entsprechendes Kontinuum der Winkelstellung bzw. Position eines Zeigers oder eines in seiner Länge veränderlichen Elements (z. B. Bandtacho der 60er Jahre, Balkenanzeige auf einem Bildschirm) repräsentiert. Durch die Zeigerstellung bzw. durch eine angezeigte Länge werden auf sehr niedriger Ebene Wahrnehmungsprozesse angestoßen, da dadurch die spezifischen Winkel- bzw. Längenrezeptoren, die bereits auf dem Augenhintergrund realisiert sind, angesprochen werden (siehe

Abb. 6.9 Beispiel einer digitalen Geschwindigkeitsanzeige sowie Kilometerstand des Fahrzeugs im 7-Segment-Design

hierzu ▶ Abschn. 3.1.3)[11]. Deshalb ist diese Anzeige besonders dann geeignet, wenn zwei Werte miteinander verglichen werden sollen, weil dann – gleiche Ausführungsform des Analoganzeigers vorausgesetzt – unterschiedliche Winkelstellungen bzw. Längen sehr gut wahrgenommen werden können (Treisman und Gelade 1980; Goldstein 2009). Um beispielsweise bei Überwachungsaufgaben zu überprüfen, ob „alles in Ordnung ist", richtet man analoge Anzeiger so aus, dass dieser Zustand im Sinn der Gestaltgesetze auf allen Instrumenten durch die „12-Uhr-Position" bzw. gleiche Längen dargestellt ist. Eine Abweichung fällt dann sofort ins Auge (Die Balkenanzeigen auf der rechten Seite des in Abb. 6.9 dargestellten Cockpits liefern dafür ein unzureichendes Ausführungsbeispiel!). In der Anwendung für das Fahrzeug ist natürlich die Frage zu stellen, ob dieser Fall überhaupt wirklich relevant ist.[12] Eine weitere vorteilhafte Nutzung der analogen Anzeige besteht darin, dass der Zeiger über eine farblich gekennzeichnete Skala streicht, die nicht nur unterschiedliche Betriebszustände charakterisiert, sondern durch die Bewegung des Zeigers, die sehr einfach wahrgenommen wird, auch die Annäherung an einen erwünschten bzw. unerwünschten Betriebszustand. Das gleiche gilt natürlich auch für die Ausführungsform einer veränderlichen Balkenlänge. Diese Anzeigeversion wird sinnvollerweise für den Drehzahlmesser verwendet, wo der Bereich sowie die Annäherung an ungünstige zu niedrige und zu hohe Drehzahl kenntlich gemacht werden kann oder auch für eine Anzeige des aktuellen Energieumsatzes (Kraftstoffverbrauch/Batterieentladung). Ist es aus der Sicht der Aufgabe notwendig, auch den Zahlenwert der Messung zu erfassen, so wird dem Nutzer eine mentale Zuordnung zwischen der Zeigerstellung und der Zahlenskala abverlangt. Der Zahlenwert wird natürlich dann am genauesten abgelesen, wenn der Zeiger exakt auf die entsprechende Ziffer zeigt. Dazu ist es notwendig, dass der Zeiger die Ziffer nicht verdeckt (siehe Abb. 6.10, es geht hier immer um den schnellen Blick, der eine solche Fehlablesung provoziert – wenn genügend Zeit ist, ist es natürlich kein Problem, die notwendige Interpolation vorzunehmen).[13] Murrel

11 Da es heute teilweise üblich geworden ist, in der Mitte eines analogen Rundanzeigers ein zusätzliches Display anzubringen, das andere Informationen darstellen kann, ist folglich der Zeiger sehr kurz. Damit wird aber der angesprochene Vorteil, dass auf sehr niedriger Ebene bereits Winkeldetektoren auf dem Augenhintergrund angesprochen werden, im gewissen Maße konterkariert (siehe auch Abb. 6.9 links).

12 Beispielsweise kann man Anzeigen für Betriebszustände des Fahrzeugs wie Ladezustand der Batterie, Betriebstemperatur des Motors (Wasser und/oder Öl) in dieser Form anzeigen. Allerdings ist die Frage zu stellen, ob angesichts moderner Rechnertechnologie nicht besser auf Abweichungen vom normalen Betriebszustand digital in verbalem Klartext aufmerksam gemacht wird, womöglich mit einem Hinweis, wie der drohende Schaden abgewendet werden kann.

13 Leider werden heute mehrheitlich innen liegende Ziffern bevorzugt, was einerseits mit der besseren Ästhetik begründet wird, was aber andererseits einen möglichst langen Zeiger ermöglicht, der offensichtlich beim Beschleunigen einen emotionale besonders gut wahrgenommenen Geschwindigkeits- bzw. Drehzahlzuwachs vorgaukelt.

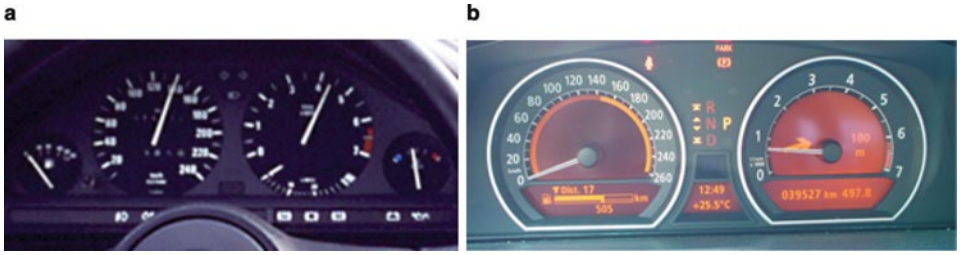


Abb. 6.10 Gestaltung von Analoganzeigen: Zeiger verdeckt Ziffer (**a**). Einwandfreies Ablesen möglich (**b**)

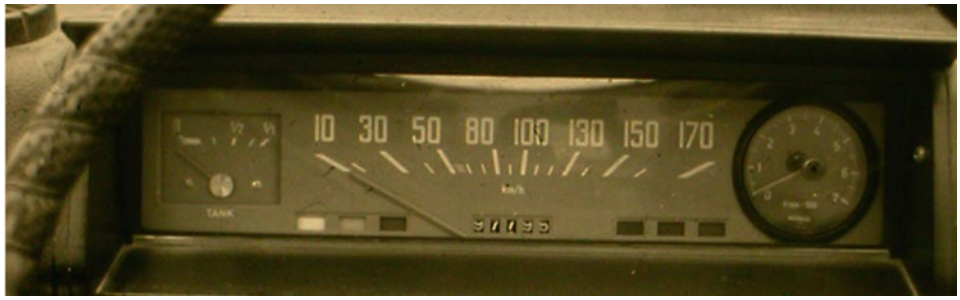


Abb. 6.11 Schlechte interpolierbare nichtlineare Skaleneinteilung. Aus dem Beispiel geht u. a. auch hervor, dass der Mittelpunkt der kreisförmigen Skala mit dem Zeigerdrehpunkt übereinstimmen muss

(1969) empfiehlt zudem, den Zeiger so zu gestalten, dass dieser gerade bis zu der Skala reicht. Bei einer Zeigerstellung zwischen den Ziffern wird vom Nutzer eine Interpolation abverlangt. Diese ist in der mittleren Stellung am genausten. In Abhängigkeit von der Aufgabenstellung ergibt sich daraus die notwendige Zahl der Beschriftungen und zusätzlicher Skaleneinteilungen zwischen den beschrifteten Skalenstrichen. Um die Interpolation möglichst sicher zu machen, sollten als Skalenwerte nur alle Vielfache von entweder 1, 2 oder 5 oder deren Zehnerpotenzen verwendet werden. Eine einwandfreie Interpolation ist nur dann möglich, wenn die Skaleneinteilung absolut linear ist (siehe hierzu ein historisches, schlechtes Beispiel in Abb. 6.11).

Natürlich sind bei der Auslegung von Analoganzeigen auch die Regeln zur sekundären Kompatibilität zu beachten. Abbildung 6.12 zeigt dafür den optimalen Anzeigebereich eines Rundinstruments. In der linken Hälfte des Instruments ist die Rechtsdrehung des Zeigers kompatibel mit einer Bewegung von unten nach oben und im oberen Teil mit einer Bewegung von links nach rechts. Beides entspricht dem inneren Modell einer Zunahme. Das rechte obere und gegebenenfalls auch rechte untere Segment kann dabei aber auch genutzt werden, weil bei der Betrachtung die Historie des Zeigerverlaufs einbezogen wird. Bei Instrumenten, die nur ein Segment nutzen, sind allerdings hängende Zeiger und Zeiger, deren Drehpunkt sich links von der Skala befindet, zu vermeiden (siehe auch Abb. 6.13).

Es gibt ausführliche ergonomische Untersuchungen zur Brauchbarkeit der verschiedenen Instrumentenvarianten in Abhängigkeit vom jeweiligen Einsatzzweck. Tab. 6.4 gibt dafür insbesondere für die Frage „Analog- oder Digitalanzeige“ eine Zusammenstellung. Daraus geht hervor, dass die Variante „fester Zeiger – bewegte Skala“ grundsätzlich ungünstig ist. Dies ist, wie bereits erwähnt, auf die sekundäre Inkompatibilität zurückzuführen. Der berühmte Citroën-Lupentacho, der in den DS, ID und CX-Modellen der 50er bis 70er Jahre Anwendung fand, ist ein Beispiel für diese Bauform (Abb. 6.14). Neuerdings taucht diese Variante in Form des Durchscrollens von Menüs in den computergenerierten Bildschirmdarstellungen im FIS wieder auf.

Aus der Tab. 6.4 kann auch die Tauglichkeit des Digitaltachometers abgelesen werden. Es ist dabei die Frage zu stellen, was die eigentliche Aufgabe

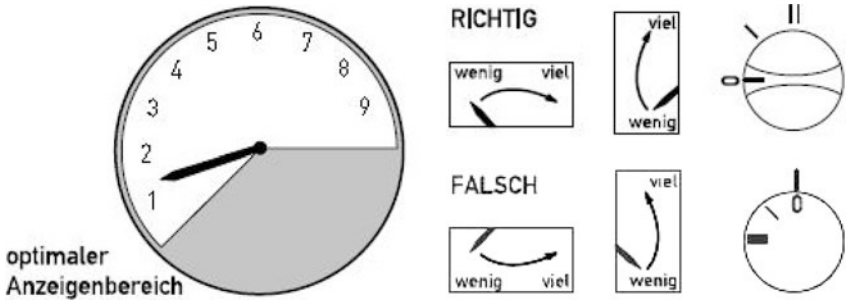


Abb. 6.12 Beachten der sekundären Kompatibilität bei der Auslegung von Analoganzeigen

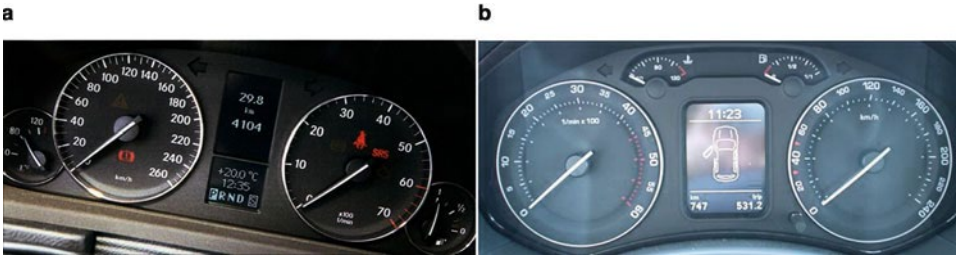


Abb. 6.13 Ungenügende (**a**; Tankanzeige) und korrekte (**b**) Beachtung der sekundären Kompatibilität. Am linken Bild erkennt man den Wunsch des Designers, den Drehpunkt der Zeiger möglichst an der Instrumentenmitte zu orientieren.

Abb. 6.14 Lupentacho (**a**) und Lupendrehzahlmesser (**b**) im Citroën CX

bei dessen Ablesen ist: geht es darum, das Geschwindigkeitsniveau und die Geschwindigkeitsänderungen festzustellen – das kann man sehr viel direkter aus der unmittelbaren Sicht nach außen und aus der Reaktion des Fahrzeugs erfassen (siehe hierzu ▶ Abschn. 3.2.1) – oder geht es darum, bei gegebenen Geschwindigkeitsvorschriften schnell und sicher den aktuellen Wert abzulesen? Aus ergonomischer Sicht ist nach Tab. 6.4 demnach der Digitaltacho zu empfehlen. Das entspricht auch Untersuchungsergebnissen von Bouis et al. (1983). Ganz anders ist es bei dem Drehzahlmesser, bei dem es darum geht, durch einen schnellen Blick den Bereich, in dem sich die aktuelle Motordrehzahl befindet und die Nähe zu der technisch bedingten Höchstdrehzahl zu erfassen. Der gestalterische Spielraum, der sich durch frei programmierbare und voll grafikfähige Kombiinstrumente ergibt, sollte also vor allem in Anbetracht dieser Gestaltungsprinzipien genutzt werden, um die Informationsaufnahme zu erleichtern.

Bildhafte Anzeigen: Bildhafte Anzeigen liefern ein stilisiertes Bild der Umwelt (Rühmann 1993) und erleichtern somit den mentalen Prozess, den Anzeigeinhalt mit der Realität in Verbindung zu bringen. Bildhafte Anzeigen sind normalerweise

Tab. 6.4 Eignung von Analog- und Digital-Anzeigen für verschiedene Anwendungen (nach Baker und Grether, zitiert aus Bernotat 1993)

Anwendung	Digital-Anzeiger	Analog-Anzeiger	
		Bewegte Skala	Bewegter Zeiger
1. Quantitative Ablesung	**Gut** Ablesezeit und -fehler für das Erfassen numerischer Werte minimal.	**Mäßig**	**Mäßig**
2. Qualitative Ablesung	**Ungünstig** Zahlen müssen abgelesen werden. Positionsänderungen werden schlecht bemerkt.	**Ungünstig** Richtung und Größe der Abweichung sind ohne Ablesung der Skalenwerte schwierig zu beurteilen.	**Gut** Zeigerstellung leicht erkennbar. Skalenwerte müssen nicht abgelesen werden. Positionsänderungen werden schnell bemerkt.
3. Einstellen von Werten	**Gut** Genaue Überwachung der numerischen Einstellung.	**Mäßig** Missverständliche Beziehung zur Bewegung des Bedienelementes. Keine Veränderung der Zeigerstellung als Überwachungshilfe. Schwer ablesbar bei schnellen Einstellungen	**Gut** Eindeutige Beziehung zwischen der Bewegung von Zeiger und Bedienelement. Die Änderung der Zeigerstellung erleichtert die Überwachung. Schnelle Einstellung möglich.
4. Regeln	**Ungünstig** Für Überwachungsaufgaben fehlen Stellungsänderungen. Schwer verständliche Beziehung zur Bewegung des Bedienelementes. Bei schnellen Änderungen schwer ablesbar.	**Mäßig** Für Überwachungsaufgaben fehlen auffällige Stellungsänderungen. Bedingt verständliche Beziehung zur Bewegung des Bedienelements. Änderungen schwer ablesbar.	**Gut** Die Zeigerstellung ist leicht zu überwachen und zu regeln. Leicht verständliche Beziehung zur Bewegung des Bedienelementes.

zweidimensional. In Abb. 6.13b ist zwischen den beiden Analoganzeigen ein Beispiel einer einfachen bildhaften Anzeige wiedergegeben, welche darstellt, ob und welche Türe am Fahrzeug geöffnet ist. Mit dem Einzug der Rechnertechnologie in das Kraftfahrzeug haben bildhafte Anzeigen an Bedeutung gewonnen. So erleichtert eine bildhafte Anzeige des Abstandes zu stehenden Hindernissen beispielsweise das Einparken (Abb. 6.15a). Mit ähnlichen Anzeigen kann auch bei einem ACC System dargestellt werden, welcher Sollabstand (Abb. 6.15b, Beispiel BMW) eingestellt ist oder ob der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug im sicheren (grünen) oder unsicheren (roten) Bereich ist (Abb. 6.15c, so verwendet bei Audi). Wie bereits in Abb. 6.8 dargestellt, finden bildhafte Anzeigen gerade in Verbindung mit Navigationsgeräten Anwendung. Eine einfache Form der bildhaften Anzeige sind Richtungspfeil und Entfernungsbalken als Abbiegehinweis. Angedeutete Querstraßen am Richtungspfeil erleichtern die Identifizierung der Zielstraße. Die Birdview-Anzeige auf die hinterlegte digitalisierte Landkarte gibt dem Fahrer eine weitaus bessere, der Situation angepasste Orientierung. Die Orientierung kann noch weiter verbessert werden, indem eine stilisierte Sicht auf den entsprechenden Straßenabschnitt dargestellt wird, wie es heute bei vielen Navigationsgeräten für die Autobahnausfahrt, aber auch für bestimmte Streckenabschnitten in Städten realisiert ist. Da der Bildschirm, auf dem solche Anzeigen sichtbar werden, selbst zwei-dimensional ist, ist auch die Anzeige zwei-dimensional, auch wenn durch die Berechnung einer zentralperspektivischen Darstellung ein drei-dimensionaler Eindruck erweckt wird. Man spricht deshalb häufig auch von einer Pseudodreidimensionalität.

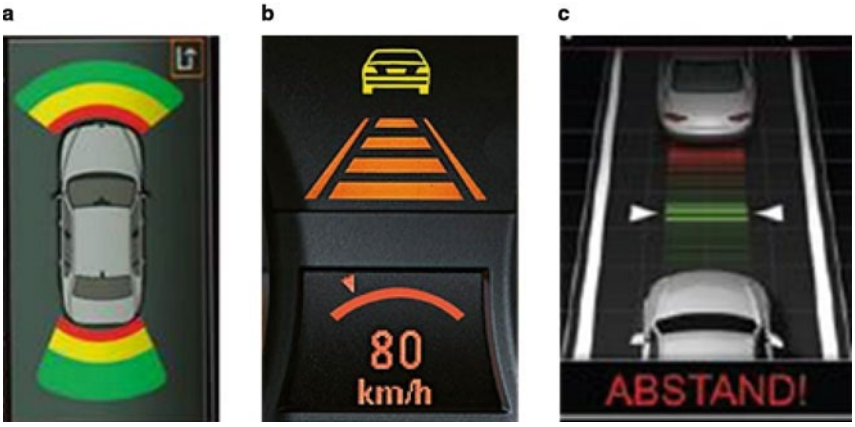


Abb. 6.15 Bildhafte Anzeige des Abstandes zum stehenden Hindernissen beim Einparkvorgang (**a**) und Abstandstempomat (**b** BMW, **c** Audi)

Die Anwendung bildhafter Anzeigen im Fahrzeug ist extrem vielfältig und wird in Zukunft in Verbindung mit den entsprechenden Sensoren und Displays noch weiter zunehmen. So sind verschiedene Anzeigen realisiert, durch die der Energiefluss bei Hybridfahrzeugen dargestellt wird. Lorenz (2011) hat ein Beispiel gegeben, wie durch bildhafte Anzeigen ein Tutorial für die korrekte Sitzeinstellung unterstützt werden kann.

Kontaktanaloge Anzeigen: Kontaktanaloge Anzeigen sind dadurch charakterisiert, dass in ein reales Abbild der Umwelt – heute im Allgemeinen in ein mittels elektronischer Kamera erfasstes Bild – künstliche Information im Sinn der augmentierten Realität eingebracht werden (sog. Augmented Reality). Mittels der HUD-Technik ist dies auch bezüglich der realen Umwelt möglich. Von „kontaktanalog" zu sprechen, ist aber nur dann zulässig, wenn diese Informationen unmittelbar (örtlich und zeitlich) Objekten der Realität zugeordnet sind.[14] So ist es beispielsweise denkbar, dass anstelle des zuvor genannten stilisierten Abbildes einer Autobahnausfahrt oder einer Straßensituation in einer Stadt das aktuelle Bild einer Videokamera dargestellt wird, in dem die entsprechenden Navigationsinformation unmittelbar und ortsfest überlagert wird. Eine solche Technologie setzt allerdings eine präzisere Ortsbestimmung, als es gegenwärtig möglich ist, voraus. Mittels des so genannten kontaktanalogen Head-Up-Displays (Bubb 1975, 1981; Schneid 2009; Bergmeier 2009; Israel 2013) wäre es sogar möglich, solche Information unmittelbar im realen Umfeld darzustellen. Die untere Darstellung in Abb. 6.8 vermittelt dafür einen Eindruck. Auch für Nachtsichtgeräte, welche mittels Infrarottechnologie selbst ohne unmittelbare Beleuchtung Gegenstände sichtbar machen können, welche sich durch ihre Wärmestrahlung von der Umgebung abheben, ist es durch Bilderkennung möglich, kritische Objekte (zum Beispiel Fußgänger oder Tiere) zu detektieren und mittels eines farbigen Rahmen in dem von der Infrarotkamera entworfenen Bild kenntlich zu machen. Wie Bergmeier (2009) nachwies, ist diese Form der technischen Realisierung hinsichtlich der Verkehrssicherheit aber wenig effektiv, da der Fahrer gerade in der Gefahrensituation auf das im Armaturenbereich befindliche Display blicken muss. Auch hier wäre nach seinen Untersuchungen die Anwendung des kontaktanalogen Head-Up-Display von Vorteil (Abb. 6.16).

Eine besonders einfache Form eines kontaktanalogen Bildes liefert der Spiegel, der im Fahrzeug fast ausschließlich in Form des Rückspiegels Anwendung findet. Allerdings ist es gemäß obiger Definition insofern nicht ganz korrekt, von „kontaktanalog" zu sprechen, da keine zusätzliche Information künstlich eingebracht wird. Trotzdem ist der Spiegel ein technisches Element, das den Blick auf die reale Umwelt manipuliert. Der plane Spiegel bewirkt dabei am wenigsten Veränderung. Wie Egger (1990) gezeigt hat,

14 Das heute in Fahrzeugen der Oberklasse angebotene HUD stellt keine kontaktanaloge Anzeige dar, da hier der Realität im allgemeinen fahrzeugbezogene Daten (Geschwindigkeit, Aktionszustand der Assistenzsysteme, konventionelle Navigationshinweise) ohne unmittelbaren Bezug auf die Außenwelt überlagert werden.

Abb. 6.16 Kontaktanaloge Anzeige, um einen Fußgänger mittels eines Infrarotnachtsichtgeräts kenntlich zu machen, **a** auf dem Display eines Bildschirms (Beispiel Honda), **b** unmittelbar in der realen Sicht nach einem Vorschlag von Bergmeier (2009)

6

ist nur mit dem planen Spiegel ein (einigermaßen) korrektes Abschätzen von Entfernungen und damit auch von Geschwindigkeitsänderungen möglich. Die Kombination aus linkem und rechten Außenspiegel sowie Innenspiegel ergibt bei der Anwendung von planen Spiegeln (und auch bei den heute üblichen konvexen Spiegeln) eine Konfiguration, bei der gefährliche sog. tote Winkel entstehen. Insbesondere auf der Fahrerseite entsteht ein solcher toter Winkel, der beim Wechsel der Spur womöglich ein dort befindliches Fahrzeug übersehen lässt (deshalb wird bekanntlich der Schulterblick vor dem Spurwechseln empfohlen). Die genaue Position des toten Winkels hängt zudem von der Position der Augenpunkte ab, die wiederum von der Körpergröße erheblich beeinflusst werden. Heute finden deshalb vielfach konvex gewölbte Spiegel Anwendung, da durch sie der Blickwinkel wesentlich erweitert werden kann. Dies wird allerdings dadurch erkauft, dass die Entfernungen nicht nur verkleinert dargestellt werden, sondern entsprechend den optischen Abbildungsgesetzen dazu noch in einem von der Entfernung abhängigen Maßstab. Prinzipiell haben Spiegel gegenüber der heute oft aus aerodynamischen Gründen als Zukunftsoption empfohlenen Kombination aus Kamera und Bildschirm den Vorteil, dass durch Änderung der Kopfposition der Einblickbereich verändert werden kann. Zudem werden dabei die Verschiebungen von Bildern von Objekten in unterschiedlicher Entfernung gegeneinander für das Entfernungsschätzung genutzt. Wegen der unterschiedlichen Wölbung des rechten und linken Außenspiegel und der mangelnden Erfahrung der Nutzer mit gewölbten Spiegeln spielen diese Effekte für das Entfernungsschätzen allerdings kaum eine Rolle.[15] Dennoch ist die Nutzung von Kamera und Bildschirm als Spiegelersatz eine zukünftig zu überdenkende Alternative, da dem Kamerabild nützliche, technisch verfügbare Information überlagert werden kann. Dadurch wäre es möglich, nicht nur den Nachteil des reduzierten Entfernungsschätzens zu kompensieren, sondern bei richtiger Auslegung der Kamerasysteme auch den Effekt des toten Winkels zu umgehen. In Form der Rückfahrkamera, in welche die Fahrspuren für einen Einparkvorgang eingeblendet werden, ist dafür bereits ein Vorbild geschaffen (Abb. 6.17). Allgemein ist zu beachten:

- Augmentierende Darstellungen in Fahrzeugen müssen sich an den Anforderungen der primären Fahraufgabe orientieren.
- Bewegte Bilder sollten möglichst vermieden werden bzw. sind in bestimmten Kontexten verboten; vor allem dann, wenn sie nicht kontaktanalog angezeigt werden.
- Die Überlagerung zusätzlicher Information darf nicht zu Verdeckungen realer Objekte führen.
- Vor allem die Verbesserung der fahrerischen Leistung muss der Indikator für die Effizienz zusätzlicher Informationen sein.
- Nebeneffekte wie zum Beispiel Cognitive Capture und Tunnel Vision müssen vermieden werden.

15 Eine genaue Konzeption der Spiegelsicht insbesondere für Personen unterschiedlicher Körpergröße ist mittels des Menschmodells RAMSIS möglich (siehe dazu Abschn. 7.3.2).

Abb. 6.17 Rückfahrassistenz mit eingeblendeten Hilfsspuren für das Einparken, welche die oben genannte Empfehlungen berücksichtigt

Auslegung von visuellen Anzeigen: Visuelle Anzeigen müssen so ausgelegt werden, dass die von ihnen dargestellte Information aus der Fahrerposition jederzeit sicher wahrgenommen werden kann. Das stellt insbesondere Anforderungen an die Größe der verwendeten Sehzeichen und den Kontrast, mit dem diese sich vor dem Hintergrund abheben. Das Folgende gilt nicht nur für Anzeigen im engeren Sinne, sondern auch für die Beschriftung von Bedienelementen, die ja auch Anzeigecharakter hat.

Nach allgemeinen ergonomischen Regeln sollte ein Sehzeichen mindestens unter einem Blickwinkel von 15′ dargeboten werden (ISO 15008 von 2009). Tatsächlich ist aber praktisch die doppelte Größe zu empfehlen: Obwohl die Sehleistung junger Personen (Durchschnittsalter 25,8 Jahre) bei einer Untersuchung deutlich besser war als die der älteren, war bei diesen dennoch der gleiche Effekt zu beobachten: Auch bei jungen Personen nahm die Sehleistung bis zu einer Zeichengröße von 33′ zu und danach sogar wieder ab[16]. Die durch den Alterungsprozess bedingte Unfähigkeit älterer Personen auf nahe Gegenstände zu akkommodieren (siehe ► Abschn. 3.2.1.1), kann übrigens nur zu einem gewissen Teil durch größere Sehzeichen kompensiert werden. Vor allem spielt eine entsprechende Ableseentfernung mit zunehmendem Alter eine wichtige Rolle. Nicht zuletzt deswegen stößt das HUD gerade bei älteren Personen auf so hohe Akzeptanz, weil bei den heute realisierten HUDs die Information in ausreichender Größe und auf einer virtuellen Ebene dargestellt wird, die sich in einer Entfernung von 2,5–3 m vor dem Fahrerauge befindet und damit praktisch keine Akkommodationsleistung mehr notwendig ist.

Dunkle Schrift auf hellem Grund ist zwar um den Faktor 1,2 bis 1,3 besser abzulesen als helle Schrift auf dunklem Grund (Reinig 1977). Allerdings kann ein helles Display gerade bei dunkler Umgebung, wo sich die eigentliche Fahraufgabe darstellt, sehr störend sein. Deshalb ist für den Fall, dass die die Displayhintergrundfarbe nicht geändert werden kann, die Variante „helle Schrift auf dunklem Grund" im Fahrzeug vorzuziehen. Im selben Maße, in dem LCD-Displays im Kombiinstrument Einzug halten, ist diese Empfehlung aber zu überdenken und womöglich eine Umstellung in Abhängigkeit von der Außenhelligkeit vorzuziehen, wie es heute schon bei vielen Navigationsgeräten der Fall ist. Entsprechend ISO 15008 soll ein Kontrast zwischen Symbol und Hintergrund von 3 : 1 für Tageslichtbedingungen eingehalten werden.

Obwohl die graphische Auslegung des Displays hinsichtlich der Informationsübertragung die größte Bedeutung hat, spielen auch Farben insbesondere bei Displays eine wichtige Rolle. Es ist hier zu unterscheiden zwischen der Hintergrundfarbe und der Farbe einer Schrift oder eines Sehzeichens. Nach DIN-IEC 73/VDE 0199 charakterisiert ein weißer Hintergrund eine neutrale, allgemeine Information. Auch schwarzer und grauer Hintergrund haben keine besondere Bedeutung. Die Farbe Rot kennzeichnet unmittelbare Gefahr, Gelb Vorsicht, Achtung und Grün Sicherheit und Gefahrlosigkeit. Insbesondere „Rot" kann auch für die Beschriftung verwendet werden, um auf einen gefährlichen Zustand hinzuweisen (z. B. zu geringer Luftdruck in einem

16 Das Modul „RAMSIS kognitiv" veranschaulicht die Sichtbarkeit von Sehzeichen durch die Projektion eines Landold-Rings auf das von dem virtuellen Menschmodell angeblickte Objekt und liefert somit eine anschauliche Hilfe zur Gestaltung von Anzeigen.

Reifen)[17]. Sonst ist es eher verwirrend, in einem Text unterschiedliche Farben zu verwenden. Bei Anzeigen, die unmittelbar mit der Verkehrssituation zu tun haben, ist das originale Layout der Verkehrszeichen in Farbe und Form zu verwenden. Für Anzeigen, die nicht unmittelbar mit der Verkehrssituation verbunden sind, sollten graphische Darstellungen, die an Verkehrszeichen erinnern, eher vermieden werden.

6.2.1.2 Akustische Anzeigen

Akustische Anzeigen kann man prinzipiell in zwei Kategorien unterteilen, nämlich einerseits in solche, welche lediglich Hinweise bzw. Warnungen ausgeben und andererseits in solche, welche detaillierte inhaltliche Information über Sprache zu vermitteln vermögen.

Bei den ***Hinweise bzw. Warnungen*** vermittelnden akustischen Anzeigen wird die Information durch die Frequenz des Tons bzw. die Frequenzzusammensetzung des Geräusches und die zeitliche Sequenz (Wiederholfrequenz) codiert. Da das menschliche Ohr bei 4000 Hz die höchste Empfindlichkeit hat, sind Warntöne mit einem Frequenzspektrum zwischen 1000 und 5.000 Hz besonders wirkungsvoll. Prinzipiell sollten sie den vorhandenen Lautstärkepegel im Fahrzeuginnenraum um mehr als 5 dB, besser bis zu 15 dB übertönen (DIN EN 457; bei einer Innenlautstärke von ca. 70 dB(A) sollte also der Warnton bei etwa 85 dB(A) liegen). Nur bei kritischen Verkehrssituationen (also z. B. bei der Gefahr des Auffahrens auf einen sehr viel langsamer Vorausfahrenden oder ein stehendes Hindernis, bei einem plötzlich in die Fahrbahn tretender Fußgänger, drohendes Abkommen von der Fahrbahn, u. a.) sollte durch einen Warnton die Aufmerksamkeit erregt werden. Obwohl es üblich ist, dafür reine Töne zu verwenden, wurde in einer Untersuchung von Fricke (2009) gezeigt, dass das Einspielen eines Geräusches, welches das Bremsenquietschen nachahmt, zu deutlich reduzierten Reaktionszeiten führt. Die Dringlichkeit der Reaktion kann durch die Wiederholfrequenz des Warntons codiert werden. Eine Wiederholfrequenz von einem ½ Hertz (Tonlänge 0,7–1 s) wirkt wesentlich weniger dringend als eine Wiederholfrequenz von 1–2 Hz. Fricke (2009) hat auch geprüft, ob durch eine räumliche Codierung (realisiert durch die im Innenraum verteilten Lautsprecher der Audioanlage) beispielsweise vor dem Herannahen eines querenden Fahrzeugs gewarnt werden kann. Diese rein akustische räumlich orientierte Warnung hat sich dabei als wirkungslos erwiesen, wohingegen eine Kombination mit einer optischen Warnung (LED-Array unter der Windschutzscheibe, wobei sich das örtlich aufleuchtende LED dort spiegelt) Vorteile bringt. Allerdings liegen durchaus andere Befunde vor, bei denen eine räumliche Codierung Vorteile zeigt.

Es ist heute üblich, die Messergebnisse ultraschallbasierter Parkdistanzgeräte durch codierte akustische Signale dem Fahrer zu vermitteln (eine zusätzliche bildhafte oder kontaktanaloge optische Darstellung verbessert prinzipiell die Interpretation s. o.). Dabei werden für den Front- und Heckbereich unterschiedliche Tonhöhen genutzt (die Zuordnung ist gleichgültig, weil sie in jedem Fall vom Fahrer gelernt werden muss). Durch die Wiederholfrequenz wird die Distanz angezeigt: niedere Frequenz bedeutet Objekt erkannt, gefahrlose Entfernung; mit geringer werdender Distanz erhöht sich die Wiederholfrequenz; kurz vor dem Berühren des Hindernisses geht das akustische Signal in einen Dauerton über.

Auf Ergebnisse, die geringere Dringlichkeit als irgendwelche Schädigung der Außenwelt zur Folge haben, ist es besser, mit einem dezenten akustischen Signal hinzuweisen. Es hat sich hierfür ein künstlich erzeugter Gong etabliert. Es wären dabei durchaus auch verschiedene, allerdings nicht mehr als drei unterschiedliche Signale denkbar. In diesem Zusammenhang ist zu berücksichtigen, dass die oben erwähnten Warn- und Hinweissignale in der täglichen Fahrpraxis so oft vorkommen, dass die Zuordnung zu den entsprechenden Ereignissen und damit ihre Bedeutung schnell erlernt wird. Die zuletzt erwähnten weniger dringenden Ereignisse treten normalerweise selten auf. Es ist deshalb unabdingbar, dass der akustische, die Aufmerksamkeit weckende Hinweis mit einer entsprechenden optischen, das Ereignis näher erläuternden Information verbunden wird.

17 In diesem Zusammenhang ist von Bedeutung, dass für grafische Sehobjekte kein monochromatisches Licht verwendet wird; denn das Auge ist für rotes Licht weitsichtig und für blaues Licht kurzsichtig, kann also zumindest zwei jeweils in diesen Farben dargestellte Sehzeichen nicht gleichzeitig scharf wahrnehmen.

Letzteres erübrigt sich, wenn man synthetische oder von einer menschlichen Stimme gespeicherte ***Sprachsignale*** verwendet. Dabei sind allerdings lange Sätze, insbesondere Nebensätze zu vermeiden. Es ist heute üblich geworden, optional insbesondere Navigationshinweise auf diese Art und Weise zu vermitteln (in älteren radiobasierten Navigationsgeräten erfolgt der Hinweis sogar nur akustisch). Auch Hinweise auf irgendwelche auftretenden Zustände des Fahrzeugs können durchaus mit dieser Methode vermittelt werden. In beiden Fällen ist allerdings zu berücksichtigen, dass das akustische Signal und somit auch die gesprochene Sprache immer flüchtig ist, d. h. wenn im Moment der Abgabe der Fahrer mental abgelenkt war, wird der Hinweis womöglich nicht erkannt. Deshalb ist es zu empfohlen, dass parallel zu dem akustischen Sprachhinweis eine redundante optische „Rückfallebene" verfügbar ist (n.b. wäre es ein Vorteil, wenn über den Rundfunk vermittelte Verkehrsdurchsagen zusätzlich in der Karte des Navigationssystems angezeigt werden. Es ist durchaus sinnvoll, wenn wie bei TMC, solche Durchsagen elektronisch codiert werden, sodass sie auf einem internen Speicher abgesetzt werden und somit jederzeit abrufbar sind). Bei der Ausgabe von Sprachmeldungen soll eine Wortrate von 160 Wörtern/min nicht überschritten werden (Byblow 1990). Weitere Empfehlungen finden sich in Bengler et al. (2012).

Obwohl akustische Signale jedweder Art hohen, die Aufmerksamkeit erregenden Charakter haben und damit im Prinzip sehr wirkungsvoll sind, sind sie dennoch mit Bedacht anzuwenden. Das Signal wird nämlich nicht nur vom der Fahrer, sondern auch von den mitfahrenden Passagieren gehört. Der Fahrer kann sich dann vor diesen wegen seines Fahrstils oder sonstiger Maßnahmen „blamiert" fühlen und somit solche Signale von Grund auf ablehnen (Thoma 2010). Zunehmend werden auch Informationsmanagementansätze diskutiert, die vermeiden sollen, dass Meldungen mit niedriger Priorität in komplexen Verkehrssituationen präsentiert werden.

6.2.1.3 Haptische und taktile Informationen/Anzeigen

Bei der Haptik ist zwischen *Oberflächenhaptik* (Erfühlen der Materialqualität des berührten Objektes = taktil) und *Bedien-* oder *Betätigungshaptik* (Rückwirkung eines Mechanismus auf die menschliche Wahrnehmung = haptisch) zu unterscheiden. Erstere kann durch das verwendete Material und durch die Form gestalterisch beeinflusst werden, letztere zusätzlich durch den Kraft-Weg-Verlauf während der Betätigung. Die Haptik vermittelt dabei nicht nur Rückmeldung im Sinne der ◘ Abb. 1.9, sondern hat auch erheblichen Einfluss auf die wahrgenommene Qualität des Fahrzeugs. Sie fördert somit wesentlich den Gefallensaspekt und damit den empfundenen Komfort.

Für die ***Oberflächenhaptik*** spielt das verwendete *Material* eine wesentliche Rolle. Wärmeleitendes, als „kühl" empfundenes Metall, verbunden mit visuell erfassbarem metallischem Glanz wird von vielen als wertvoll empfunden. Weniger gut wärmeleitendes Material mit nach Möglichkeit polierter Holzoberfläche vermittelt ebenfalls einen „wertigen" Eindruck. Das besondere luxuriöse „Feeling" von Leder (mit sichtbaren Nähten[18]) und auch dessen Optik ist bekanntlich künstlich schwer nachzuahmen. Hingegen empfindet man schlecht wärmeleitenden Kunststoff mit rauer Oberfläche, an dem womöglich noch Entkratungsränder zu spüren sind, als „billig". Wie aus dieser Schilderung ersichtlich ist, darf der optische Eindruck für die Beurteilung nicht vergessen werden. Er muss aber zu der Berührhaptik passen. Beispielsweise enttäuschen mit dünner Metalloberfläche überzogene, sich „warm" anfühlende Kunststoffteile die optisch aufgebaute Erwartung.

Der *Form* der angefassten Objekte kommt neben dem eben erwähnten Wertigkeitsaspekt auch Rückmeldecharakter zu, da damit – nach einem durch Übung erfolgt Lernvorgang – Information über das berührte Stellteil gegeben wird. Dies steht allerdings oftmals im Widerspruch zu ästhetischen Ansprüchen und zu wirtschaftlichen Aspekten (Verwendung von Gleichteilen). Gleichwohl sollten sich Lenkstockhebel, insbesondere, wenn hinter dem Lenkrad auf einer Seite mehrere angebracht werden, nicht nur durch Form und Position deutlich unterscheiden (z. B. durch verschieden lange Hebel), sondern auch durch die haptisch gefühlte Oberflä-

18 Bei dieser Aussage ist Vorsicht geboten: Der wertvolle „rustikale" Charakter von Nähten hat offensichtlich nur im europäischen Kulturkreis diese Bedeutung!.

Abb. 6.18 Haptisch und optisch codierte Sitzverstelleinheit bei Mercedes

che (z. B. der eine glatt und der andere geriffelt). Verwechslungen können auf diese Art und Weise womöglich noch im letzten Moment vor der Betätigung aufgefangen werden. Ähnliche Ansprüche gelten für in der Mittelkonsole angebrachte Knöpfe, die oftmals entgegen dieser Forderung die Anmutung einer „Klaviatur" vermitteln. Mit der Betätigung nicht sehr häufig genutzter Stellteile geht immer eine Blickzuwendung einher (Arlt 1999; McKenzie 1989; McKenzie et al. 1990). Deshalb sind solche Stellteile so anzubringen, dass sie optisch auch erfassbar sind. Ein klassisches Beispiel ist die Klage vieler Nutzer über die Positionen der Bedienelemente für die elektrische Sitzverstellung im nicht sichtbaren Bereich links oder rechts neben dem Sitz unterhalb der Polsterung und andererseits die positive Beurteilung der Position dieser Stelleinheit in der Türinnenverkleidung bei Mercedes (siehe Abb. 6.18).

Die Oberflächenhaptik spielt – allenfalls bei Pedalen mit gewissen Einschränkungen – natürlich auch für die ***Betätigungshaptik*** eine große Rolle, da ja bei jeder Bewegung das Stellteil berührt werden muss. Die Betätigungshaptik selbst ist wesentlich charakterisiert durch den Kraft-Weg-Verlauf. Der ideale Verlauf hängt dabei von dem Einsatzzweck und der Art des Bedienelements ab. An dieser Stelle soll nicht auf die Betätigungshaptik der primären Stellteile (Lenkrad, Kupplung, Gaspedal, Bremse, Schalthebel) eingegangen werden, obwohl dort teilweise von haptischer Anzeige im engeren Sinne gesprochen werden kann, weil hier ggf. gewollt durch Stellmotoren erzeugte haptische Information vermittelt wird (z. B. am Lenkrad, siehe ▶ Abschn. 6.4.3).Da bei diesen Bedienelementen mit der haptischen Rückmeldung wegen der durch sie beeinflussten Fahrzeugbewegung auch immer eine kinästhetische Rückmeldung verbunden ist, wird dies genauer in ▶ Abschn. 6.4.1 und 6.4.2 dargelegt. Bei den Bedienelementen, die für die sekundäre und tertiäre Fahraufgabe Anwendung finden, sind hinsichtlich der haptischen Rückmeldung grundsätzlich translatorische und rotatorische Bedienelemente zu unterscheiden. Zusätzlich ist noch zu trennen zwischen tastender und rastender Ausführung. Bei tastenden Bedienelementen kehrt das Bedienelement nach der Betätigung wieder in seiner Ausgangslage zurück, während rastende dort verharren. Bei rotatorischen Bedienelementen hat sich für die tastende Variante der Begriff „Drehencoder" eingebürgert, während für die rastende Variante der Begriff „Drehschalter" steht. Bei translatorischen Schaltern ist die Bezeichnung für tastende „Drucktaster" und für rastende „Druckschalter" (Reisinger und Wild 2007). Während tastende Bedienelemente prinzipielle durch eine mit der Auslenkung ansteigende Rückstellkraft bzw. -moment gekennzeichnet sind, zeigen die rastenden demgegenüber eine komplexere Charakteristik. Im Folgenden wird nur auf diese eingegangen.

Reisinger (2009) und Kühner (2014) haben sich mit der haptischen Rückmeldung von Bedienelementen systematisch auseinandergesetzt. Die Erzeugung des haptischen Feedbacks erfolgt bei *rotatorischen Bedienelementen* im Allgemeinen durch Federelemente, die auf eine Kulisse wirken. Dafür gibt es im Prinzip zwei Ausführungsformen (siehe Abb. 6.19).

Für eine genauere, ergonomischen Ansprüchen genügende Beschreibung sind allerdings die üblichen technischen Parameter des Drehmoment-Drehwinkel-Verlaufs, welche nur das maxi-

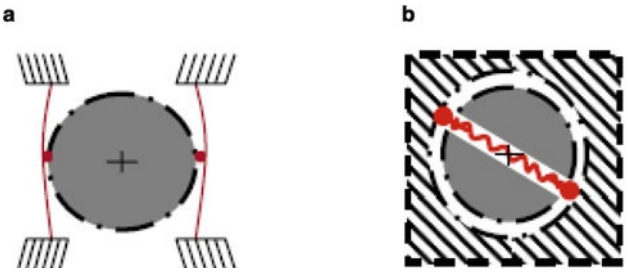


Abb. 6.19 Prinzip der Erzeugung des haptischen Feedback bei rotatorischen Bedienelementen: Radiale Wirkrichtung von Federelementen, **a** außen liegend mit Blattfeder, **b** Innen liegend mit Spiralfeder (nach Reisinger 2009 und Kühner et al. 2011)

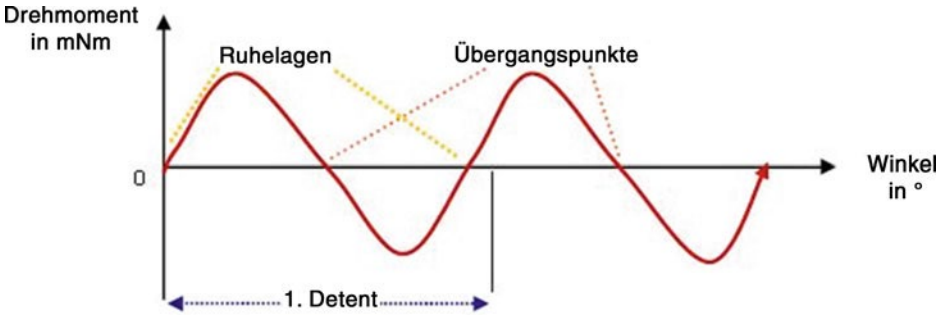


Abb. 6.20 Systematische Darstellung einer Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie. Es sind zwei Detents mit Ruhelagen und Übergangspunkten abgebildet. Die Lage der Ruhelage bzw. Übergangspunkte lässt sich wegen der Coulombschen Reibung, die grundsätzlich gegen die Wirkrichtung des Nutzers gerichtet ist, in dieser Grafik nur qualitativ beschreiben (Reisinger 2009)

male Drehmoment und die Anzahl der sog. Detents, d. h. der Anzahl der Rastpositionen enthalten, mit der Lage des elektrischen Schaltpunktes, der Ruhelage, des Übergangspunktes (= Wechsel von positivem zu negativem Drehmoment) und des Reibungsoffsets (= Reibungshysterese) zu ergänzen (siehe Abb. 6.20).

Reisinger hat für Untersuchungen des haptischen Empfindens einen speziellen Haptiksimulator entwickelt, mit dem in weiten Grenzen beliebige Drehmoment-Drehwinkel-Charakteristiken in Probandenversuchen gegeneinander getestet werden können. Er hat dafür nicht nur sinusförmige Verläufe, sondern auch dreiecksförmige und sägezahnartige Verläufe untersucht. Ein erstaunliches Ergebnis dabei ist, dass nicht nur zwischen diesen Verläufen subjektiv kaum ein Unterschied wahrgenommen wurde, sondern auch, dass die gefühlte Position der Ruhelage nicht an den Momenten-Nullpunkten, an dem das Bedienelement ohne äußere Krafteinwirkung tatsächlich zum Stillstand kommt, empfunden wird, sondern an den Positionen größten negativen Drehmoments. Es zeigt sich, dass durch eine Integration des Drehmoments über dem Drehwinkel alle Beobachtungen hinreichend gut erklärt werden können. Anhand einer idealisierten Mechanik eines rastenden rotatorischen Bedienelements kann gezeigt werden, dass der Nutzer offensichtlich die zugrunde liegende idealisierte Rastscheibe erschließt, was durch das Intergral (= aufgewendete Arbeit) erklärt wird (siehe Abb. 6.21). Es ist nämlich die grundsätzliche Aufgabe der haptischen Sinneswahrnehmung, aus der Kombination von Bewegung und taktilem Reiz die Form ertasteter Gegenstände zu erschließen. Das Drehen eines Schalters kommt quasi dem Streichen der Finger über eine (raue) Oberfläche gleich. Für das haptische Empfinden ist nach den Untersuchungen von Reisinger auch nicht wesentlich das Drehmoment entscheidend, sondern die an der Berührfläche zwischen Fingern und Stellteil empfundene Kraft. Bei einem größeren Knopfdurchmesser ist also ein größeres Rückstellmoment vorzusehen, um den gleichen Krafteindruck zu erwecken, wie ihn ein kleinerer Stellknopf bereitstellt.

In einer weiteren Versuchsreihe hat Reisinger ausgehend von der Drehmoment-Drehwinkel-Kennlinie relevante technische Parameter und Adjektivpaare identifiziert und quantifiziert. Er konnte dabei die zwei Faktoren „Beweglichkeit“ und „Wertigkeit“

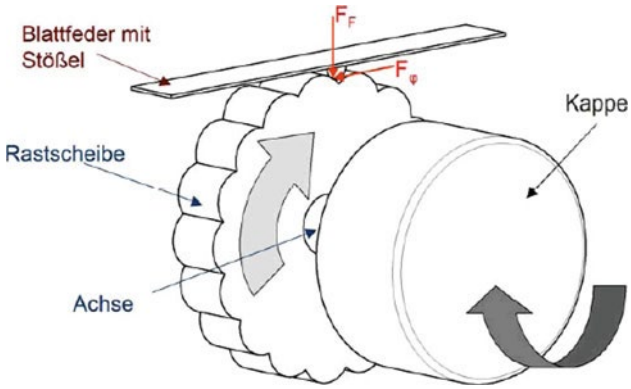


Abb. 6.21 Vereinfachte Darstellung eines rastenden Drehsteller, wie er wohl dem inneren Modell der meisten Nutzer entspricht

extrahieren. Deren recht komplexe Abhängigkeit von den technischen Beschreibungsgrößen wird in seiner Arbeit im Einzelnen dargestellt. Insbesondere in Verbindung mit der Integraldarstellung zeigt sich, dass die Fläche der Drehmomentdarstellung direkt mit der Empfindung der Härte oder Schwergängigkeit zusammenhängt. In einer weiteren noch mehr ins Detail gehenden Arbeit hat Kühner (2014) untersucht, wie sich bei Drehstellern die Parameter Massenträgheit, Dämpfung und Reibung gegenseitig beeinflussen. In der Interpretation der sehr komplexen Ergebnisse stellt er – hier sehr kurz zusammengefasst – fest:

- Die Differenzierungsfähigkeit für den Parameter Massenträgheitsmoment nimmt mit ausgeprägter Reibung und/oder Dämpfung ab, wobei der Einfluss der Dämpfung größer ist.
- Der Parameter Massenträgheit hat – zumindest bis zu einer mittleren Ausprägung – keinen maskierenden[19] Effekt auf die Parameter Dämpfung und auf Reibung.
- Die Differenzierungsfähigkeit für den Parameter Reibung wird besonders durch den Parameter Dämpfung herabgesetzt, u. a. auch weil bei einer konstanten Winkelgeschwindigkeit beide Parameter nicht zu unterscheiden sind. Der Parameter Trägheit hat hingegen erst bei einer sehr hohen Ausprägung eine maskierende Wirkung.
- Eine Rastung hat grundsätzlich einen maskierenden Effekt auf alle mechanischen Parameter.[20]

Für *translatorische Bedienelemente* (Drucktaster) stellt Reisinger (2009) zunächst die gängigen technischen Wirkungsprinzipien in Verbindung mit den typischen Kraft-Weg-Verläufen dar (Abb. 6.22). Um die in Abb. 6.22 wiedergegebenen Charakteristiken zu verallgemeinern, entwickelte er eine systematische Beschreibung der technischen Bezeichnungen, die auch den Bezug zu DIN EN 19 6000 (2001) herstellt. Die Eigenschaften des Drucktasters werden wesentlich durch folgende Kennwerte beschrieben (siehe Abb. 6.23).

- Die *Federvorspannung* stellt einen Kraftwert dar, der erst überwunden werden muss, bevor sich das Bedienelement bewegt (Weir et al. 2004). Der erste Kraftanstieg kann als „Intensität der Berührung“ und die Steigung als „Anfangswiderstand“ („Initial response“ nach Osumi et al. 1990) bezeichnet werden. Je höher die Federvorspannung ist, ein desto tieferes Eindrücken (deep, Kosaka und Watanabe 1996), d. h. ein desto größerer Hub des Bedienelementes wird wahrgenommen.
- Der *Leerhub* liegt vor dem eigentlichen Anstieg zur Federvorspannung. Er kommt durch Toleranzketten zustande. Er ist am nahezu achsparallelen Verlauf der Kennlinie zu erkennen. Er

19 Maskierung charakterisiert einen Effekt der Wahrnehmung, der bei verschiedenen (innerhalb und auch zwischen) Sinnesorganen zu beobachten ist: Ein genügend großer Reiz der einen Qualität lässt die Wahrnehmung eines anderen Reizes verschwinden.

20 Zu Detailfragen, insbesondere auch zu Angaben technischer Parameter der im Einzelnen sehr komplexen Zusammenhänge wird auf die Arbeiten von Reisinger (2009) und Kühner (2014) verwiesen.

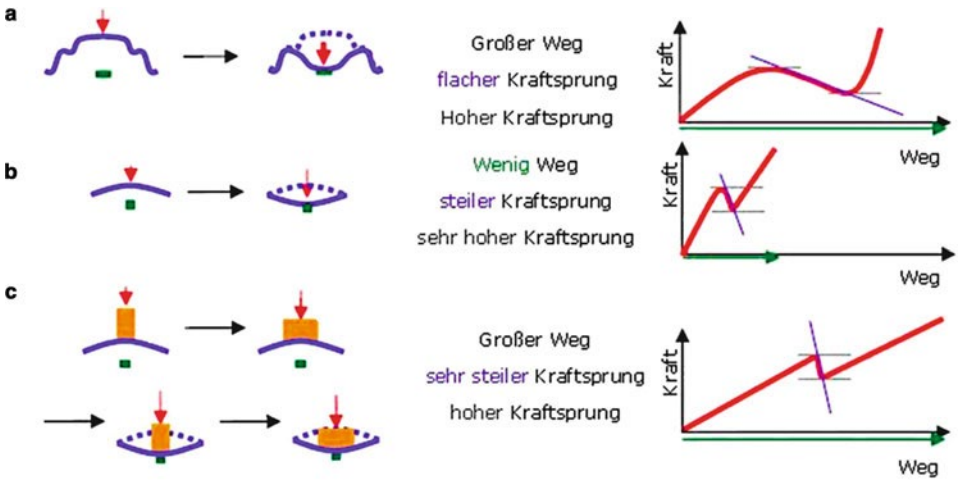


Abb. 6.22 Gängige Prinzipien haptischen Feedbacks bei Drucktastern mit typischen Merkmalen von **a** Silikonschaltmatte, **b** Federscheibe, **c** Mikroschalter als Kombination aus Federscheibe mit Silikonstößel (Reisinger 2009)

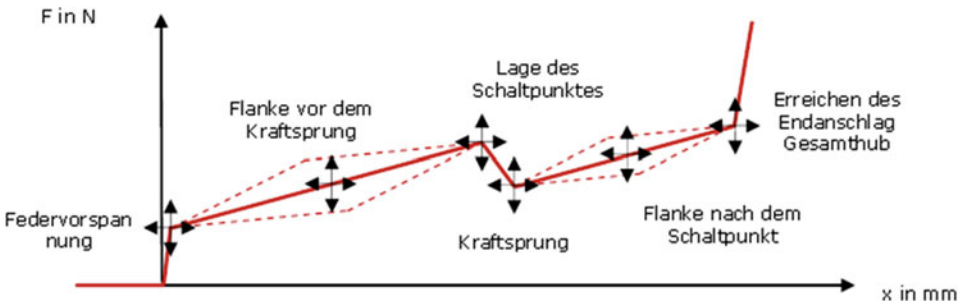


Abb. 6.23 Systematische Darstellung einer Kraft-Weg-Kennlinie sowie die grundsätzlichen Variationsmöglichkeiten der Verläufe (Reisinger 2009)

wird erfahrungsgemäß eher negativ eingestuft (in Abb. 6.23 ist er nicht dargestellt).

- Der *Kraftsprung* bezeichnet den oftmals schlagartigen Abfall der Kraft bei einem bestimmten Kraftniveau. Das Maximum der Kurve stellt den Anfangspunkt des Kraftsprungs dar und dient meist der Spezifikation von Drucktastern. Nach Kosaka und Watanabe (1996) ist dessen Auslösekraft (peak) für die Mehrzahl der haptischen Eigenschaften verantwortlich. Zugleich sollte der elektrische Schaltpunkt und damit die Auslösung der Funktion mit ihm verknüpft (DIN EN 196000, 2001) sein. Das Verhältnis der Federvorspannung zum Kraftsprungniveau kann auch als Empfindlichkeit bezeichnet werden.
- Die *Flanken vor und nach dem Kraftsprung* können in ihrer Form beliebig variieren. Sie können voneinander unabhängig konvex, konkav oder linear ausgeführt sein.
- Der *mechanische Endanschlag* begrenzt den Weg des Drucktasters und ist damit maßgeblich für dessen Hub. Er stellt meist den steilsten und steifsten Abschnitt der Kennlinie dar. Ein Überdrücken würde zur Zerstörung des Bedienelementes führen.

Auch für translatorische Bedienelemente entwickelte Reisinger einen Simulator, der im Rahmen der in Abb. 6.22 wiedergegebenen Charakteristiken vom Rechner gesteuert Kraft-Weg-Verläufe in beliebiger Kombination wiederzugeben vermochte. Reale Kraft-Weg-Verläufe weichen von dem Ideal der Abb. 6.23 zwar ab. Die Steigung des Kraftsprungs hat aber wesentlichen Einfluss auf das haptische Empfinden.

Insgesamt zeigt sich, dass es im Gegensatz zu dem rotatorischen Bedienelement keine eindeutige Beschreibungsmöglichkeit für das haptische Empfinden translatorischer Bedienelemente gibt. Das hängt wohl auch damit zusammen, dass kein einheitliches inneres Bild von der Funktionsweise solcher Bedienelemente existiert. Die beobachteten Phänomene werden von Reisinger als „ereignisorientierte Wahrnehmung" bezeichnet, der zufolge Kräfte und Kraftverläufe solange gut abschätzbar wahrgenommen werden bis ein Ereignis – z. B. in Form eines Schlages (hier Schaltsprung) – in den Vordergrund tritt und damit den Kraftverlauf selbst unwichtig erscheinen lässt. Die Entsprechung des translatorischen Bedienelements aus der alltäglichen Erfahrung ist etwa das Verschieben eines Gegenstandes, bei dem durchaus der korrekte Verlauf der Widerstandskraft gespürt wird, ein Anstoßen an ein Hindernis den Verlauf davor aber unwichtig erscheinen lässt.

In den Probandenversuchen zur subjektiven Wahrnehmung konnten die zwei Faktoren „Wertigkeit und Gefallen" und „Gängigkeit und Härte" als bestimmend herausgefiltert werden. Es zeigt sich, dass für die Beurteilung „hochwertig" unbedingt ein Schaltpunkt wahrnehmbar sein muss. Mit den von Reisinger gefundenen Abhängigkeiten und Werten sind dem Gestalter eines translatorischen Bedienelements Werte an die Hand gegeben, die es ihm ermöglichen, gezielt eine gewünschte Urteilskombination zu erreichen. [21]

Unter *Konstanzleistung* versteht man allgemein die Tatsache, dass der Mensch in der Lage ist, Objekteigenschaften unabhängig von den äußeren Umständen zu erkennen. Im vorliegenden Zusammenhang ist also zu fragen, ob das haptische Empfinden von der Einbaulage abhängt, da die Kraftaufwände für die Betätigung von Bedienelementen damit variieren (z. B. ist zum Betätigen eines Druckschalters am Dachhimmel objektiv eine andere Kraft notwendig als in der Einbaulage auf der Mittelkonsole). Für die rotatorischen Bedienelemente konnte Reisinger (2007) bereits eine Konstanzleistung der menschlichen Wahrnehmung in dem Sinne nachweisen, dass die Eigenschaften des Bedienelements unabhängig von der Einbaulage wahrgenommen werden. Kühner (2014) führte das gleiche Experiment für translatorische Bedienelemente durch. Unter dem Aspekt des Untersuchungszieles stellt dies sogar den allgemeineren Fall dar. Es wurden dabei zwei unterschiedliche in der automobilen Praxis vorkommende Kraft-Weg-Verläufe realisiert. Auch er konnte zeigen, dass die Einbaulage keinen Einfluss auf das Empfinden hat. Das gilt auch dann, wenn die Probanden über das Untersuchungsziel aufgeklärt worden sind. Man kann also davon ausgehen, dass eine Konstanzleistung in dem Sinne vorliegt, dass die menschliche Wahrnehmung von haptischen Reizen weitgehend unabhängig von den Kräften ist, die für die Aufrechterhaltung der Gleichgewichtslage oder dem Erreichen des Stellteils notwendig sind.

Eine Besonderheit stellen ***aktive Bedienelemente*** dar, da durch sie ein *künstliches haptisches Feedback* bezüglich des Kraft-Weg-Verlaufes erzeugt werden kann. Abbildung 6.24 zeigt das Prinzip eines solchen Bedienelements. Der bedienende Mensch wirkt wie bei jedem anderen Bedienelement auch mit einer bestimmten Kraft auf dieses ein, die Kraft wird gemessen und an einen Rechner weitergegeben, der in vielen Anwendungsfällen mit der eigentlich zu betätigenden Maschine in geeigneter Weise verbunden sein kann. Der Rechner bestimmt aus der eingehenden Kraft – womöglich unter Berücksichtigung des augenblicklichen Zustandes der Maschine – einen entsprechenden Weg, der über einen Servomotor an dem Bedienelement realisiert wird. Somit spürt der Mensch an diesem Bedienelement auf haptischen Weg die durch den Rechner erzeugte Kennlinie[22]. Sowohl der für rotatorische als auch für translatorische Bedienelemente von Reisinger entwickelte Simulator arbeitet nach diesem Prinzip. Auch der von BMW in der ersten Generation des i-Drive eingesetzte Controller (zen-

21 Was die genauen Daten anlangt, wird auf die Arbeit von Reisinger (2009) verwiesen.

22 Statt der Kraft kann als Eingangsgröße auch der Weg gemessen werden. Als Servomotor wird in diesem Fall ein Drehmomentmotor eingesetzt, der das Ergebnis des Rechners in ein entsprechendes vom Nutzer gefühltes Drehmoment bzw. Kraft umsetzt. Nach den Überlegungen von Gillet (1998) sind beide Realisierungsmöglichkeiten gleichwertig, wenn die verwendeten Motoren hinreichende Leistung erbringen und das System durch „unendliche" mechanische Steifigkeit charakterisiert werden kann. Weitere Anwendungsmöglichkeiten des aktiven Bedienelements siehe Abschn. 6.4.3.

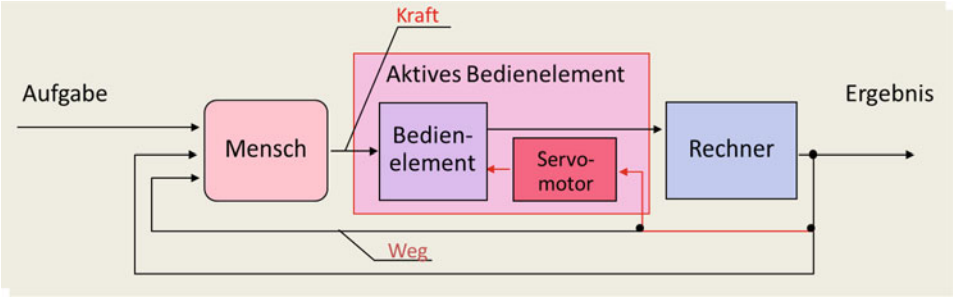


Abb. 6.24 Prinzip des aktiven Bedienelements zum Erzeugen eines künstlichen haptischen Feedbacks

traler Drehdrücksteller) fußt darauf. Der Vorteil des aktiven Bedienelements in dieser Anwendung ist, dass die Zahl der Detents aktuell an die Zahl der in dem jeweils aufgerufenen Menü gegebenen Auswahlmöglichkeiten angepasst werden kann. Ein Nachteil ist, dass für die Realisierung der Endanschläge – theoretisch – unendliche hohe Energie notwendig wäre. Das Bedienelement fühlt sich also gegenüber einem mechanisch aufgebauten Bedienelement „weich" an. Diese negative Empfindung vieler Kunden, die eigentlich dem Gefallensaspekt zuzuordnen ist, war Anlass, in den Nachfolgemodellen einen mechanischen Controller einzusetzen und auf den Vorteil der korrekten haptischen Rückmeldung zu verzichten.

6.2.2 Bedienelemente

Über die konventionellen Bedienelemente werden zum Steuern, Regeln, Schalten, Fahren und Auslösen von Funktionen Muskelkräfte auf Maschinenteile übertragen, welche dazu dienen, die aus der menschlichen Informationsverarbeitung entwickelten Vorhaben in Realität umzusetzen. Dazu werden Bedienelemente verwendet, die mit den Fingern, der Hand oder dem Fuß betätigt werden. Wie bereits angesprochen besteht auch die Möglichkeit, Sprachinformation von Mikrophonen aufzufangen und über einen Rechner codiert in entsprechende Funktionen umzusetzen. Neuerdings wird auch diskutiert, ob das Erfassen von Gesten (Handbewegungen ohne Berührung von Gegenständen, Kopf- und Oberkörperbewegungen und Augenbewegungen) genutzt werden kann, bestimmte Funktionen am Fahrzeug auszulösen. Gerade bei letzterem Ansatz, aber auch schon bei der Nutzung der Sprachinformation besteht ein grundsätzliches Problem – abgesehen von der Zuverlässigkeit der Erkennertechnologie – darin, zufällige Handlungen, welche dann womöglich ungewollte Funktionen auslösen, von gewollten zu unterscheiden. Diese Fehlermöglichkeit tritt natürlich auch bei den konventionellen Bedienelementen auf, ist dort aber bei weiten nicht so häufig (nach Norman 1986, 1981 sog. „Slips"). Mit der fortschreitenden Entwicklung der technischen Möglichkeiten werden heute sog. multimodale Interaktionen diskutiert und auch teilweise realisiert. Im Prinzip kommt man damit der menschlichen Eigenschaft, Informationen nicht nur über einen Kanal, sondern über mehrere Kanäle abzugeben (zum Beispiel Sprechen in Verbindung mit Gestik und womöglich sogar Berührung des Gesprächspartners) entgegen.

6.2.2.1 Kategorisierung der Bedienelemente

Auf der Grundlage der Kategorisierung von Rühmann (1993) werden für konventionell mechanisch zu betätigende Bedienelemente folgende Kriterien vorgestellt, die prinzipiell beliebig miteinander kombinierbar sind:

- *Wirkungsweise*: Wie bei den Anzeigen kann auch bei den Bedienelementen bauartbedingt die Information digital oder analog codiert übertragen werden. *Analoge Bedienelemente* werden dort eingesetzt, wo für einen Regelvorgang kontinuierlich veränderliche Information zu übertragen ist (z. B. Lenkrad, Gas- und Bremspedal, Lautstärkeregler des Radios, Dimmen der Instrumentenbeleuch-

tung)[23]. *Digital wirkende Bedienelemente* werden dort eingesetzt, wo entweder diskrete mögliche Zustände dauerhaft erhalten bleiben sollen (z. B. bestimmte Licht- bzw. Scheibenwischerfunktionen) oder wo durch das Bedienelement eine Funktion abgerufen werden soll (z. B. Berechnung der Fahrtroute in einem Navigationsgerät).

- *Bedienung:* Gemäß den Extremitäten, mit denen auf das Bedienelement einzuwirken ist, unterscheidet man Finger- (z. B. Lichtschalter), Hand- (z. B. Schalthebel), Fuß- (z. B. Gaspedal) und Beinbedienung (z. B. Kupplungspedal)
- *Bewegungsart (Bewegungscodierung):* Es sind *Translationsbewegungen* von *Rotationsbewegung*en zu unterscheiden (ein Beispiel für eine Rotationsbewegung mit den Beinen ist die Tretkurbel des Fahrrads, die aber im Fahrzeug kaum Anwendung findet[24]). Beide Bewegungsarten können zwar für unterschiedliche Zwecke eingesetzt werden, allerdings ist zu berücksichtigen, dass ein translatorisch wirkendes Bedienelement – im Gegensatz zu einem rotatorischen Bedienelement, bei dem das nicht notwendigerweise der Fall ist – immer zwei Endanschläge besitzt, die mit einem entsprechend beschränkten Bereich in der Realität korrespondieren sollten (z. B.: zeitlicher Abstand, auf den ein ACC-System regelt).
- *Dimensionalität*: Die Dimensionalität beschreibt die bauartbedingten Freiheitsgrade, in denen das Bedienelement bewegt werden kann. Ein Drehregler oder Taster ist eindimensional, da er nur in einem Freiheitsgrad (eine Drehachse, eine Translationsrichtung) bewegt werden kann. Der Gangwahlschalter des Getriebes ist zweidimensional, da das bekannte H-Schema – wenn auch durch eine Kulisse geführt (digital!) – sowohl Longitudinal- wie Transversalbewegung zulässt[25]. Aus ergonomischer Sicht sollte die Dimensionalität des Bedienelements mit der Dimensionalität der Aufgabe übereinstimmen (z. B.: ist die zweidimensionale Positionierung eines Cursors auf einer im Display wiedergegebenen Landkarte mit einem zweidimensionalen Touchpad viel einfacher zu bewerkstelligen als mit je einem eindimensionalen Bedienelement für die X- und Y-Richtung; Spies 2013). Auf die an sich virulente Problematik, die zweidimensionale Aufgabe des Autofahrens mit bis zu fünf Stellteilen zu bewältigen, wird in ► Abschn. 6.4.3 gesondert eingegangen.
- *Arretierbarkeit*: Bedienelemente können in der Stellung, in die sie gebracht worden sind, durch unterschiedliche Mechanismen arretiert werden. Wenn eine solche Arretierbarkeit sinnvoll ist, weil sichergestellt werden soll, dass das Stellteil seine Position nicht verändert (z. B. Wählhebel des Getriebes) ergibt sich die Frage, wie die Arretierung wieder zu lösen ist. Als Möglichkeiten bieten sich hier an: erhöhter Kraftaufwand (gegeben bei jedem Bedienelement mit einer Rasterung – Detent), geänderte Bewegungsrichtung oder Betätigung eines Entarretierungsstellteils (z. B. Handbremshebel). Unbeabsichtigte Entarretierung wird in der dargestellten Reihenfolge zunehmend verhindert, allerdings dadurch erkauft, dass die Betätigung umständlich erscheint und in Verbindung mit einer gewissen Ungeschicklichkeit oder Unwissen über die Art der Betätigung womöglich auch gar nicht gelingt. Eine Sonderform der Arretierung sind Ein-Aus-Schalter, welche bei jeder Betätigung zwischen diesen beiden Zuständen wechseln. Wenn ein solches Bedienelement eingesetzt wird, ist eine optische Rückmeldung über den Schaltzustand unabdingbar.

23 Als analoge Bedienelemente können auch solche bezeichnet werden, die objektiv eine sehr enge Rasterung besitzen. Entscheidend ist hierbei, ob die einzelnen Stufen vom bedienenden Menschen als diskret oder als quasi-kontinuierlich empfunden werden.

24 In der Forschung werden solche Fahrzeuge, deren Vortrieb ähnlich wie bei einem Pedelec durch einen Elektromotor unterstützt wird, als Alternative für reine Stadtfahrzeuge durchaus untersucht.

25 Fußstellteile sind eigentlich immer eindimensional. In einem Experimentalfahrzeug wurde bei Daimler-Benz ein zweidimensionales Pedal für die Betätigung von Gas und Bremse untersucht. Es fand sich dabei eine Verkürzung der Umsetzungszeit von bis zu 50 % bei allerdings gleichzeitig erheblich eingeschränkter Akzeptanz (Braun 1993).

Bei den nicht arretierbaren Bedienelementen ist zu unterscheiden zwischen solchen, die keine stellungsabhängige Rückmeldung geben (Rückmeldung nur während der Bewegung durch Reibung oder viskose Dämpfung) und solchen, die durch Federkraft oder einen ähnlich wirkenden komplexeren Mechanismus in ihre Neutralstellung zurückkehren. Bei den erstgenannten dient die genannte Rückmeldung dem Wahrnehmen der Bewegung und der Versicherung, dass das Stellteil nach der Betätigung in seiner Position verharrt (z. B. Lautstärkeregler). Die letztgenannten spielen vor allem in Verbindung mit dem Fahrprozess ein Rolle (z. B. Lenkrad, Gas-, Brems- und Kupplungspedal). Die Rückstellkraft gibt hier unmittelbare haptische Information über das Maß des Bedieneinflusses. Auf die entsprechenden Besonderheiten wird in ▶ Abschn. 6.4 näher eingegangen.

- *Integration*: Man spricht von integrierten Bedienelementen, wenn in *einem* Bedienelement *mehrere* Bedienfunktionen zur alternativen, sequentiellen oder simultanen Betätigung zusammengefasst werden. Integration kann dadurch erfolgen, dass auf einem Bedienelement ein oder mehrere weitere Bedienelemente montiert werden (z. B. ein zusätzlicher Drehschalter zur Vorwahl der Intervallzeit auf dem für die Wischerbetätigung zuständigen Lenkstockhebel) oder dass den Dimensionen eines zwei- oder mehrdimensionalen Bedienelements unterschiedliche Funktionen zugeordnet werden. Dabei ist es aus ergonomischer Sicht zweckmäßig, thematisch Zusammengehöriges in einem solchen integrierten Bedienelement zu vereinen (z. B. Lichtfunktionen: Bewegen des linken Lenkstockhebels nach vorne und zurück = Auf- und Abblenden des Fahrlichts, Bewegen des Lenkstockhebels noch oben bzw. unten = Blinker rechts bzw. links)[26]. Integrierte Bedienelemente sind sinnvoll, wenn aus einer mehr oder weniger fest vorgegebenen Fahrerhaltung in Abhängigkeit von der Fahraufgabe bestimmte Funktionen relativ häufig abzurufen sind. Der heute häufig eingesetzte Drehdrücksteller kann als zweidimensionales Bedienelement gelten, wobei die beiden Dimensionen „Drehen“ (Rotation) und „Drücken“ (Translation) unterschiedliche Aktionen auslösen: Anwahl einer Funktion durch Drehen – Auslösen der ausgewählten Funktion durch Drücken. Heutige im Fahrzeug verbaute Dreh-Drücksteller können häufig auch translatorisch in der Ebene verschoben werden (X-Y-Ebene), wodurch dann noch zusätzliche Funktionen abgerufen werden. In diesem Fall ist es allerdings hilfreich, durch eine geeignete Anzeige am Bildschirm verständlich zu machen, welcher Bewegung bestimmte Funktionen zugeordnet sind. Ähnliche Zuordnungen unterschiedlicher Funktionen werden bei den verschiedenen Ausführungen von Lenkstockhebeln beobachtet (manche sind sogar vierdimensional: Translation nach oben-unten, vor-zurück, Drücken sowie Drehen um die Lenkstockachse). Keine dieser Funktionszuordnungen ist selbsterklärend. Der für die korrekte Bedienung notwendige Lernvorgang wird allerdings erleichtert, wenn in einem solchen Bedienelement thematisch zusammengehörige Funktionen untergebracht werden (z. B. nur Lichtfunktionen, nur Wischerfunktionen). Eine veranschaulichende Übersicht der vorgestellten Kategorisierung bietet ◘ Abb. 6.25.

Im Folgenden werden die genannten Prinzipien für die im Fahrzeug am häufigsten anzutreffenden Pedale und Handstellteile detaillierter erläutert.

6.2.2.2 Pedale

Pedale werden heute im Fahrzeug eigentlich nur als sog. Fahrpedal für die Regelung des Motordrehmoments bzw. der Motorleistung und als Bremspedal für die Reduzierung der Bewegungsenergie des Gesamtfahrzeugs genutzt. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor und handgeschaltetem Getriebe kommt noch das Kupplungspedal hinzu. Hinsichtlich der Anordnung dieser Pedale hat sich nach einem anfänglichen Entwicklungsprozess, der ca. 3 Jahrzehnte in Anspruch nahm, die Positionscodierung Kupplung links, Fahrpedal rechts und

26 Die Integration der Bedienung des Bordcomputers in den Lenkstockhebel für die Lichtfunktion – ausgelöst beispielsweise durch Drücken des Hebels in axiale Richtung – ist demnach aus ergonomischer Sicht weniger sinnvoll.

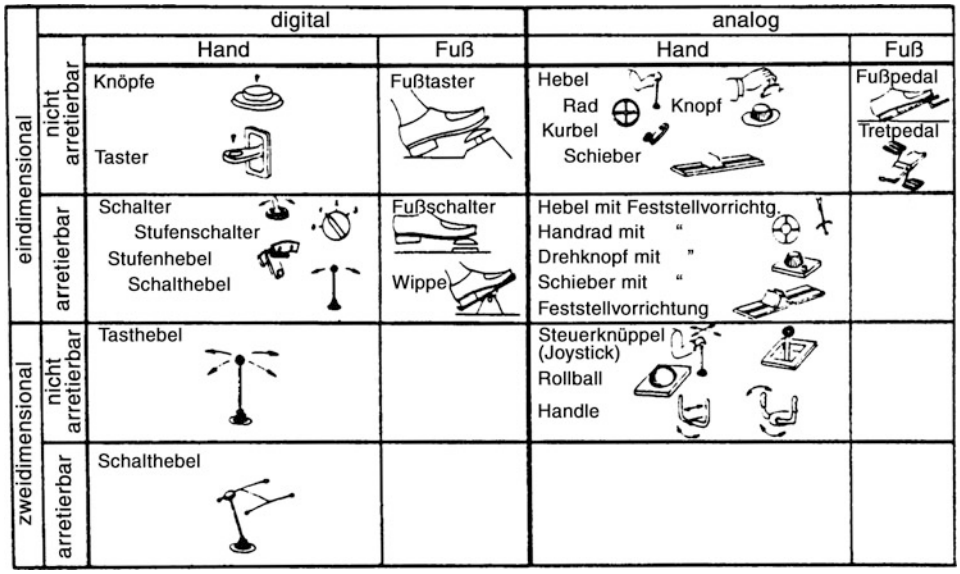


Abb. 6.25 Kategorisierung der Bedienelemente

Bremspedal in der Mitte des Fußraums vor dem Fahrer durchgesetzt (interessanterweise auch bei Fahrzeugen mit Rechtslenkung). Eine Möglichkeit der optischen Kontrolle über die Stellung der Pedale besteht nicht. Die Rückmeldung ist nur haptisch. Dass die Funktionen „Regulierung der Motorleistung", „Bremsen" und „Kuppeln" über Pedale erfolgt, hat primär historisch-technische Gründe. Die bis in die 50er Jahre ohne Servounterstützung auskommenden hohen Betätigungskräfte der Kupplung, die umso höher sind, je größer die Motorleistung ist und die der Bremse, die mit dem Fahrzeuggewicht und der möglichen Fahrgeschwindigkeit ansteigt, konnten nur durch die gegenüber der Handbetätigung höheren Fußkräfte bewältigt werden. Gerade was die unter bestimmten Umständen (z. B. Glatteis) notwendige feinfühlige Betätigung der Bremse anlangt, wäre hierfür die Handbedienung eigentlich vorzuziehen.

Pedale können stehend (Drehpunkt in der Nähe des Fahrzeugbodens) oder hängend (Drehpunkt deutlich oberhalb der Fußspitze) ausgeführt werden. Für die Informationsübertragung ist dies ohne Bedeutung. Hängende Pedale bieten einen gewissen Schutz gegen Abrutschen des Fußes nach oben (nicht zur Seite!)

Bei einigen Fahrzeugherstellern ist es für Automatikfahrzeuge üblich geworden, links neben dem (leeren) Raum für das Kupplungspedal ein weiteres Pedal für die Feststellbremse vorzusehen. Für die parallel angebotenen Handschaltversionen kommt es hier aber für viele Fahrer beim „Anfahren am Berg" zu Konflikten, da der mit der Hand zu betätigende Entriegelungsknopf der Feststellbremse zum rechten Zeitpunkt gezogen werden muss und bei Fehlbedienung keine Möglichkeit zur korrigierenden Nachregelung gegeben ist. Die in historischen Fahrzeugen vorgesehene Betätigung des Auf- und Abblendens des Fahrlichts oder der Betätigung des Scheibenwaschers durch Fußtaster haben sich zu Recht nicht durchsetzen können, da schon bei handgeschalteten Fahrzeugen die Notwendigkeit, drei Pedale mit zwei Füßen zu betätigen, in besonderen Fahrsituationen zu Überforderungseffekten führt[27].

6.2.2.3 Handbetätigte Bedienelemente

***Bewegungsmerkmale*:** Neben der schon erwähnten Positionscodierung spielt die Bewegungscodierung bei den handbetätigten Bedienelementen eine vorrangige Rolle. Im Wesentlichen unterscheidet

27 Erst jüngst wird bei einigen Fahrzeugen eine Berganfahrhilfe angeboten, welche nach dem Lösen der Handbremse das eigentliche Lösen der Bremse erst durchführt, wenn die Antriebsräder ein Moment in Vorwärtsrichtung erfahren. Dies ist eigentlich eine unabdingbare ergonomische Maßnahme!

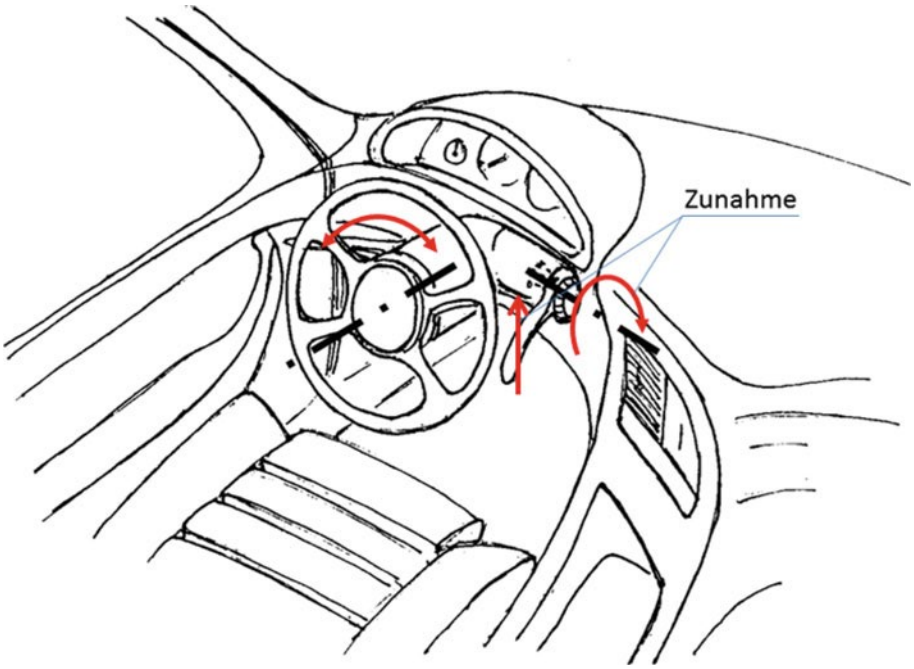


Abb. 6.26 Anordnung des rechten Lenkstockhebels zur Vermeidung von sekundärer Inkompatibilität

man hierbei, wie bereits erwähnt, *rotatorische* (z. B. Drehregler) und *translatorische* (z. B. Schieberegler) Stellteile. Aus ergonomischer Sicht bezieht sich die Bezeichnung allerdings nicht zuvorderst auf die technische Ausführungsform, sondern auf die von der Hand auszuführende Aktion. Insofern ordnet man Hebeln (z. B. Gangwahlhebel) und Kippschaltern, die sich eigentlich um eine Drehachse bewegen, einer Translationsbewegung zu. Problematisch bei dieser Art der Zuordnung sind allerdings die Lenkstockhebel, die wegen des eindeutigen Bezugs zur Lenkachse durchaus eine Drehbewegung suggerieren (z. B. würde ohne eine derartige Zuordnung der Blinkhebel gar nicht richtig verstanden werden). Das führt bei dem rechten Lenkstockhebel, der häufig für die Wischerbetätigung genutzt wird, zu sekundärer Inkompatibilität: ist die Bewegung des Hebels nach oben als ein „mehr/an“ oder als eine Linksdrehung (das ist die Bewegungsrichtung des Wischers)[28]mit der Bedeutung „weniger/aus“ zu verstehen? Verschiedene Hersteller kommen hier zu durchaus unterschiedlicher Auslegung! Das Dilemma kann man nur durch eine anders orientierte Drehachse auflösen, wie es in Abb. 6.26 illustriert ist.

Aus einer Studienarbeit, welche die von den Probanden vermutete Positionierung der Bedienelemente für die mechanische Sitzverstellung zum Gegenstande hatte (Bieniek 1990), entstand ein Vorschlag für die Positionierung und die Bewegungscodierung dieser Stellteile, die mit der dadurch initiierten Bewegung des Sitzes kompatibel ist. Konsequent wird in diesem Vorschlag für jeden Verstellvorgang eine zweiseitig wirkende Ratschenbetätigung vorgesehen, welche die Verstellung auch während der Fahrt möglich macht ohne Gefahr eines plötzlich wegrutschenden Sitzes oder einer die Unterstützung versagenden Lehne (Abb. 6.27).

Sekundäre Inkompatibilität zu vermeiden ist besonders dann eine Herausforderung, wenn durch ein Bedienelement auf einem Bildschirm etwas verändert werden soll. Abbildung 6.28a zeigt dafür ein Beispiel: Die Drehbewegung des Controllers im Uhrzeigersinn bedeutet ein „Mehr“/„Weiter“. Der Cursor wandert aber nach oben („zurück“). Dies

28 Bei Wischern, bei denen der Drehpunkt links von der Fahrzeugmitte angeordnet ist bzw. bei sog. Schmetterlingswischern wird häufig argumentiert, dass die Bewegung des Wischerhebels nach oben bzw. die Drehung nach links mit der entsprechenden Bewegung des linken Wischers kompatibel sei.

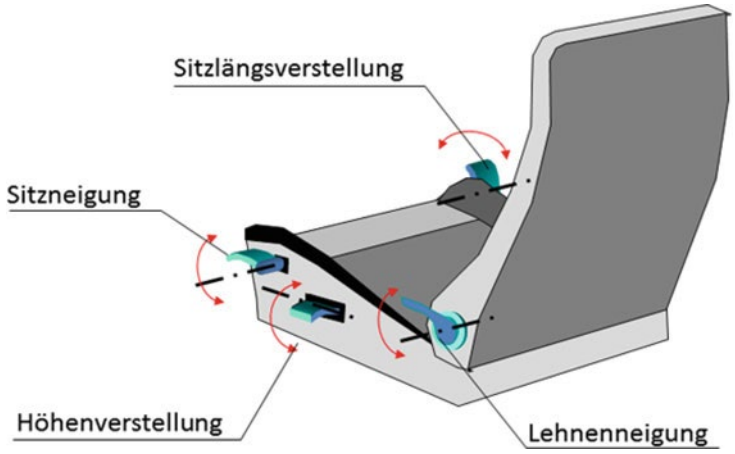


Abb. 6.27 Den Erwartungen entgegenkommende Positionierung und zur Realität kompatible Bewegung der Bedienelemente für eine mechanische Sitzverstellung (am Beispiel des Fahrersitzes bei einem Linkslenker)

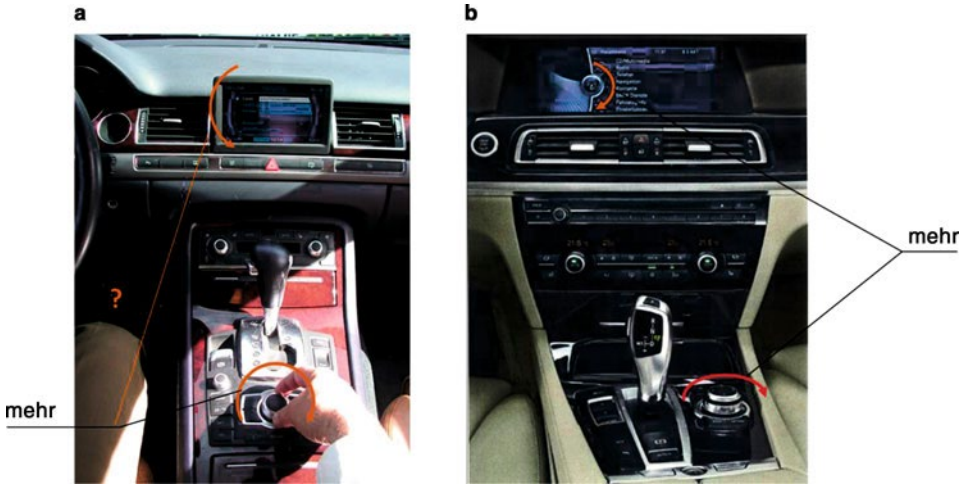


Abb. 6.28 Inkompatibilität (**a**) zwischen Drehbewegung des Controllers und der Reaktion am Bildschirm und Lösung des Konflikts (**b**)

wird durch die Grafik, die einen mittigen Drehpunkt suggeriert begründet. Durch einen links auf dem Bildschirm dargestellten Bezugsdrehpunkt und einen Radius in der graphischen Darstellung kann dieses Problem gelöst werden (Abb. 6.28b).

Eine Besonderheit bezüglich der Bewegungscodierung stellen *Touchscreens* dar. Die meisten der heute in Fahrzeug üblichen Versionen bieten virtuelle Buttons an, durch deren Antippen (Kontaktgriff, siehe unten) entweder direkt eine Funktion ausgelöst wird oder ein neues Menü geöffnet wird, das weitere Buttons anbietet. Der Vorteil dieser Version des Touchscreens ist, dass in einem beschränkten Ortsbereich eine Vielzahl von Funktionen abrufbar ist. Dies wird u. a. durch den Nachteil erkauft, dass keinerlei haptische Rückmeldung über die Berührung eines solchen Buttons erfolgt, sodass eine Blickkontrolle unerlässlich ist, die durchschnittlich länger ausfällt als beim Betätigen eines physischen Schalters.[29] Auch Spies (2013) fand für die Touchscreen-Bedienung deutlich längere Blickzuwendungszeiten als für alle anderen Alternativen. Für die genaue Ausgestaltung der angebotenen

29 Eine Untersuchung am Lehrstuhl für Ergonomie der TUM (2006) zeigt zudem, dass die Auswahl von Funktionen aus einem Menü mit einem Dreh-Drückschalter schneller und sicherer erfolgt als mit dem Touchscreen. Nur bei der zweidimensionalen Verschiebung von Objekten (z. B. Justieren der Landkarte) hat die Touchscreenbedienung eindeutig Vorteile.

Abb. 6.29 Greifarten (nach Götz 2007); Kontakt (Zeigefinger), Zufassungs- (zwei bzw. drei Finger) und Umfassungsgriff

Buttons und der Menüfolgen sind die Regeln für simultane Bedienung (siehe ▶ Abschn. 6.1.1.1) zu beachten. Eine durch die Bedienung von Smartphones populär gewordene gestenbasierte Bedienform ist das „Wischen" mit einem Finger sowie das „Zoomen" durch die Bewegung zweier Finger, das nun mehr und mehr auch in die im Fahrzeug verbauten Touchscreens einzieht. Als eine Besonderheit ist das Schreiben von alphanumerischen Zeichen auf einer eigens dafür vorgesehenen Fläche (sog. Touchpad) anzusehen, welche durch eine entsprechende Detektiersoftware in vom Bordrechner lesbare Zeichen umgesetzt werden. Die letztere Form der Informationsübertragung hat sich im Versuch vor allem für Eingaben von Daten in Navigations- und Telefonanwendungen als besonders günstig und mit der eigentlichen Fahraufgabe wenig interferierend herausgestellt (Hamberger und Gößmann 2009).

Inzwischen hat die Technologie der Handschrifterkennung Serienreife erreicht und entfaltet vor allem im Bereich der tertiären Tätigkeiten ihr Potenzial, da die Eingabe alphanumerischer Zeichen für Telefonnummern, Fahrtziele oder Adressen im Allgemeinen sehr gut realisiert werden kann. Die gängigen Technologien erlauben die Eingabe mittels Fingerspitze ohne Stift oder Griffel und akzeptieren einfache Druckbuchstaben in Normschrift (Hamberger 2010). In mehreren Versuchen konnte nachgewiesen werden, dass diese manuell-visuelle Interaktion nennenswerte Vorteile im Vergleich zur Spracheingabe, Touchscreeneingabe oder auch zur Eingabe mittels Drehen-Drücken besitzt (Bechstedt et al. 2005). Ausschlaggebend ist allerdings die Platzierung des Touchpads in einer Lage, die gute Erreichbarkeit und Ablagemöglichkeit für den Handballen oder das Handgelenkt bietet und eine entsprechend schnelle Verarbeitung und Rückmeldung der erkannten Eingabe an den Nutzer mittels eines ebenfalls optimal positionierten Bildschirms, der nun getrennt vom Touchpad sein kann.

Greifarten: Für den Kontakt zwischen der Hand und dem Bedienelement sind die unterschiedlichsten Variationen denkbar (Abb. 6.29). Praktisch unterscheidet man zwischen:

- *Kontaktgriff*: Von der Hand wird über einen Finger – normalerweise den Zeigefinger – eine vertikale Kraft auf das Bedienelement übertragen. Bei mechanischen Bedienelementen handelt sich dabei im Allgemeinen um Taster und Schalter unterschiedlicher Art. Für deren Gestaltung sind neben der Größe die verschiedenen Aspekte der haptischen Rückmeldung zu beachten (▶ Abschn. 6.2.1.3). Auch die Bedienung eines Touchscreens erfolgt über den Kontaktgriff. Das Auslösen von Funktionen erfolgt normalerweise hier durch einfache Berührung. Das Objekt kann dabei technisch bedingt nicht vorher ausgewählt werden. Viele Untersuchungen (u. a. Spies 2013) zeigen, dass das eigentliche Problem die nicht erfolgte Rückmeldung über das Berühren des Buttons ist und nicht die Rückmeldung über dessen Betätigung. Letztere kann hinreichend effektiv auch akustisch erfolgen. Maßnahmen, den Vollzug durch Vibration rückzumelden, haben sich als unkomfortabel und teilweise verwirrend, weil erschreckend erwiesen. Auch technisch ist diese Lösung schwer umzusetzen, da eine Berührung notwendig ist, um die Rückmeldung zu fühlen, eine Ablösung des Fingers aber unter Umständen die Funktion ausgelöst.
- *Zufassungsgriff*: Durch den Griff über zwei oder drei Finger entsteht ein Reibungsschluss oder bei entsprechender Gestaltung auch ein Formschluss zwischen dem Bedienelement und der Hand. Drehsteller und Schiebschalter werden über den Zufassungsgriff betätigt. Die Rückmeldung insbesondere der Drehsteller wird in ▶ Abschn. 6.2.1.3 beschreiben.

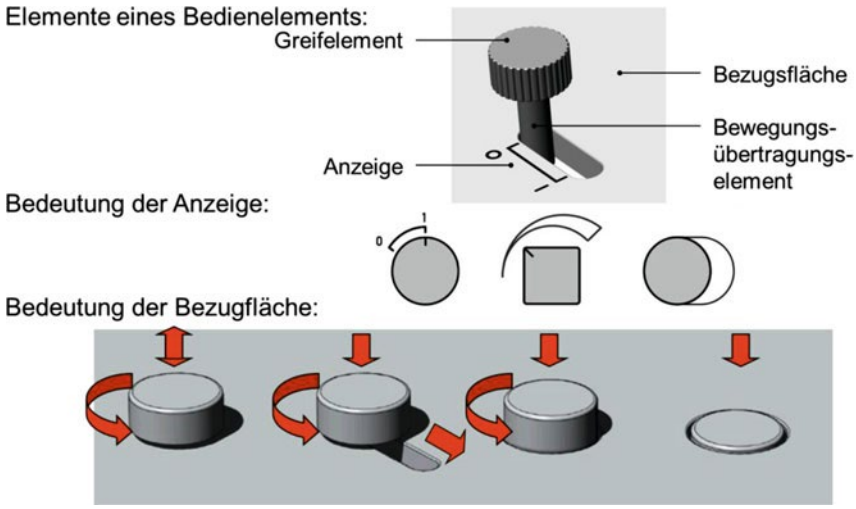


Abb. 6.30 Hauptbestandteile eines Bedienelements, das Bedienelement als Anzeige und die Bedeutung der Bezugsfläche

- *Umfassungsgriff*: Durch den Umfassungsgriff können auch höhere Kräfte übertragen werden. Man unterscheidet zwischen orthogonaler und tangentialer Kraftaufbringung. Bei der orthogonalen Kraftaufbringung wird praktisch eine formschlüssige Verbindung hergestellt. Die übertragbaren Kräfte sind größer (z. B. Handbremshebel, Türgriffe u. ä.). Bei der tangentialen Kraftaufbringung kommt es im Wesentlichen zu einem Reibschluss, der ggf. mittels entsprechender Ausformungen durch formschlüssige Elemente unterstützt werden kann (z. B. Lenkrad mit „fingerfreundlicher" Konturierung auf der Rückseite).

Anzeigefunktion des Bedienelements: Götz (2007) legt dar, dass die meisten Bedienelemente durch die Elemente Greifelement, Bewegungsübertragungselement, Bezugsfläche und Anzeige charakterisiert sind (siehe Abb. 6.30). Die Anzeige gibt dabei nicht nur Rückmeldung, in welchem Zustand sich das Bedienelement momentan befindet, sondern in Verbindung mit der Bezugsfläche auch Auskunft darüber, wie es betätigt werden kann (Affordance). Aus dieser Feststellung geht bereits hervor, dass das Fehlen von Anzeige und Bezugsfläche, wie es z. B. bei den Lenkstockhebeln der Fall ist, irgendwelche kompensatorische Maßnahmen (z. B. eindeutige Beschriftung, Rückmeldung über den Betriebszustand durch Kontrollleuchten im Kombiinstrument) erforderlich machen, um dieses ergonomische Manko zu beseitigen.

Götz (2007) untersuchte die wesentlichen Einflüsse, die eine bestimmte Bedienintuition verursachen. Dazu entwickelte er aus einer Systematik der Bedienelemente (siehe Abb. 6.31) insgesamt 88 Modelle, die er Probanden mittels einer sog. Power-Wall virtuell räumlich präsentierte. Die Probanden wurden danach befragt, was ihre erste Intuition hinsichtlich der Bewegung und der Bedeutung dieser Bedienelemente ist. Tabellen 6.5 und 6.6 geben einige wichtige Ergebnisse dieser Untersuchung wieder (weitere Ergebnisse siehe Götz 2007).

Touchscreen: Wie bereit erwähnt, stellt die Bedienung des konventionellen, nur berührempfindlichen Touchscreens im Kraftfahrzeug eine besondere Herausforderung dar, weil weder vor noch während der eigentlichen Betätigung haptisch rückgemeldet werden kann, ob eine virtuell dargestellte Taste berührt wurde. Dies ist gerade unter den verschärften Bedingungen der Hauptaufgabe „Fahren" von besonderer Bedeutung, da hier Prozesse, die länger als 200 ms Bearbeitungszeit benötigen, unbedingt zu vermeiden sind. Ist der Touchscreen im optimalen Greifraum angebracht, erfordert seine visuelle Erfassung eine zu große Blickabwendung; falls er sich jedoch in einem günstigen Blickfeld befindet, kann er nur durch Vorbeugen und gestreckte Arm-

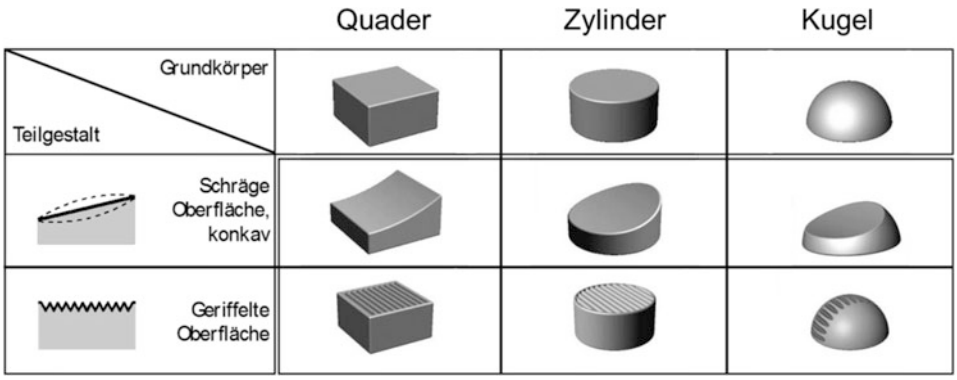


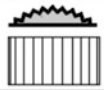
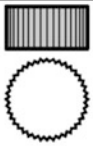
Abb. 6.31 Systematik der Bedienelemente, aus der sich insgesamt 88 Einzelmodelle ableiten lassen (Götz 2007)

Tab. 6.5 Bedienelemente, welche die Intuition EIN/AUS-vermitteln. x = Achse planar zum Körper, y = Achse vom Körper weg/zum Körper hin, z = nach oben/unten; R = rotatorisch; T = translatorisch ; K = Kontaktgriff; Z = Zufassungsgriff

Typ: Ein/Aus	Bewegung	Greifart	Ausrichtung
1) Oberfl ächensegment, bombiert (konkav, konvex), asymmetrisch auf Rechteck	Rx+	K	bombiertes Oberflächensegment zum Benutzer
2) geneigte Oberfl äche (konkav, eben, konvex)	Rx-	K	niedrige Seite zum Benutzer
3) Fase umlaufend	Tz-	K	beliebig

haltung erreicht werden. Während der Fahrt ist dann eine zuverlässige Bedienung u. a. wegen des Schwingungseinflusses nicht mehr zu gewährleisten. Spies et al. (2010) hat in einer Grundlagenuntersuchung den Vorschlag für einen Ausweg aus diesem Dilemma gemacht. Er verwendet in seinen Versuchen eine Matrixanordnung von ursprünglich für die Wiedergabe der Braille-Schrift (Blindenschrift) entwickelten, durch Piezoelemente bewegten Stiftelementen, die im günstigen Greifraum in der Mittelkonsole angebracht sind. Der zentrale Bildschirm befindet sich an der in Abb. 6.7 geforderten Stelle (siehe Abb. 6.32). Die Lage der auf dem Bildschirm dargestellten Buttons kann so auf dem haptischen Touchpad gefühlt werden. Dadurch ist es beispielsweise nicht mehr wie beim Drehdrücksteller notwendig, zu einer bestimmten Funktion sequentiell zu springen, sondern es kann der entsprechende Button direkt gedrückt werden. Natürlich können zweidimensionale Eingaben, beispielsweise Verschieben der Karte, mit diesem Touchpad mittels direkter Manipulation durchgeführt werden. Ebenso ist in einer verbesserten Ausführung auch das Schreiben von Buchstaben möglich. Der Test im Fahrsimulator weist hinsichtlich aller Leistungskriterien (Bedienzeit, Spurabweichung, durchschnittliche Blickdauer auf das Display) eindeutig die Überlegenheit dieses neuartigen Mensch-Maschine-Interaktionselements aus. Interessant ist hierbei, dass die Darstellung eines Cursors auf dem Bildschirm offensichtlich kontra-

Tab. 6.6 Bedienelemente, welche die Intuition mehr/weniger vermitteln

	Typ: Mehr/Weniger	Bewegung	Greifart	Ausrichtung
	1) Zylindersegment geriffelt, Achse horizontal,	Rx/Tz	K	Riffelung quer zum Benutzer, Tab. 6-6
	...			
	5) Seitenfläche zweiseitig geneigt, nach innen (konkav, konvex, eben),	Ty	Z	beliebig
	...			
	10) Mantelfläche vertikal geriffelt,	Rz	Z	beliebig

produktiv ist und die Bedienzeit sowie die notwendige Blickdauer erhöht. Die Versuche von Spies sind allerdings vorerst nur als eine Pilotstudie anzusehen, durch die das Potential einer solchen Interaktion erst einmal ausgeleuchtet werden soll. Das Bediengefühl mit den piezoelektrisch aktivierten Braille-Schriftelementen ist technisch bedingt recht schwammig. Die Weiterentwicklung dieses Ansatzes sieht eine erfühlbare variable haptische Rückmeldung auf dem Touchpad vor, um den Grad der Blindbedienbarkeit nochmals zu erhöhen (Blattner et al. 2013).

6.2.2.4 Sprachsteuerung

Da in vielen Situationen die Eingabe von Werten, Namen oder auch Kommandos sehr viele einzelne manuelle Eingaben erfordert, bieten Sprachbefehle – wegen der unterschiedlichen Hauptfähigkeit der rechten und linken Gehirnhälfte (siehe ▶ Abschn. 3.1.2, ◘ Abb. 3.3) – in gewissen Grenzen[30] – prinzipiell ein hohes Potenzial, Aktionswünsche parallel zur Fahraufgabe an das Fahrzeug zu vermitteln. Sprache stellt eine digitale Informationsvermittlung dar und eignet sich deshalb nur für die Vermittlung digitaler Befehle. Für die Vermittlung analoger Befehle (zum Beispiel „lauter", „weiter links") ist sie eher ungeeignet. Die technische Herausforderung, Sprache von dem Hintergrund des Fahrgeräusches unter Berücksichtigung der unterschiedlichen auch durch den Dialekt bedingten Sprachfärbung herauszufiltern, ist inzwischen sehr gut gelöst. Daneben besteht das Problem, eindeutig den an das Fahrzeug gerichteten Sprachbefehl von Bestandteilen einer normalen Unterhaltung zwischen den Passagieren zu trennen. Eine entsprechende Mikrofoncharakteristik und Mikrofonplatzierung können hier sehr viel zur Fehlervermeidung beitragen. Man verwendet zudem eine Aktivierungstaste („Push to Talk"), wodurch der Fahrer seine Absicht, mit dem Fahrzeug zu kommunizieren, kund tut. Wenn allerdings nach Drücken dieser Taste nur *ein* Befehl kommt (z. B. „Licht an") ist zu fragen, ob dann der Wunsch nach der fraglichen Funktion nicht eher durch Betätigen einer entsprechenden Taste erfüllt werden sollte. Diese Einschränkung gilt nicht, wenn sich sachlich bedingt nach dem ersten Befehl mehrere die gewünschte Funktion präzisierende Befehle anschließen (z. B.:

30 Die linke Gehirnhälfte ist jedoch auch in Problemlösungsprozesse involviert und Sprache bindet die gleichen Ressourcen. Es kommt also darauf an, wann und welche Aktionen mit Sprachbefehlen ausgelöst werden. Wenn die linke Gehirnhälfte mit Problemen wie Navigation oder Musikauswahl beschäftigt ist, verlangsamt somit die Sprachsteuerung diese Aufgabenbearbeitung.

„Navigation – München – Maximiliansplatz – fünf“). Das größte Problem der technischen Sprachinteraktion ist, dass es – zumindest beim gegenwärtigen Entwicklungsstand – auch zu Fehlerkennungen kommt. Diese können verschiedene Ursachen haben: Der Nutzer spricht in falscher Weise, er spricht die falschen Kommandos oder zum falschen Zeitpunkt. Durch solche individuellen Abwandlungen gerät das Detektiersystem häufig in informationstechnische Sackgassen (mit der Konsequenz von Rückmeldungen wie z. B. „Bitte wiederholen Sie“ bis hin zu „Abbruch“), die für den Nutzer dann undurchschaubar sind, weil er den Weg zu der Position des Kommunikationsabbruchs nicht kennt bzw. nicht in Erinnerung hat. Der oben genannte Vorteil der sprachlichen Interaktion wird dann ins Gegenteil verkehrt, weil das nun notwendige Zurechtfinden, die Neuorientierung bzw. Wiederholung des ganzen Vorgangs mentale Ressourcen beansprucht, welche die Fahraufgabe ggf. erheblich beeinträchtigen. Unter solchen Bedingungen kommen bis zu 80 % Bedienungsfehler vor, die auch durch technische Erkennungsfehlerraten von bis zu 20 % bedingt sind. Insgesamt zeigt sich aber in Versuchen seitens der Probanden eine klare Präferenz für Sprache in allen Fahrszenarien. Für Einstellvorgänge (z. B. Sitzeinstellung) wird Sprache dabei klar abgelehnt.

Gerade wenn man die möglichen technischen Weiterentwicklungen berücksichtigt, ist der Sprachinteraktion große Bedeutung beizumessen. Allerdings ist dabei auch zu bedenken, dass sprachlicher Befehlseinsatz bedingt, dass der Nutzer weiß, welche Begriffe (Vokabular) zu verwenden sind. Auch hier spielt die multimodale Interaktion eine große Rolle, da sich zeigt, dass Nutzer bevorzugt die Begriffe für Spracheingaben verwenden, die auch auf dem Bildschirm in Schriftform angezeigt werden. Im Gegensatz dazu liefert die klassische Bedienung mittels Stellteilen – bei ergonomischer Ausführung durch Beschriftung und Anordnung – quasi eine Bedienungsanleitung mit, was die spontane Nutzung auch eines fremden Fahrzeugs erleichtern kann.

Abb. 6.32 Konzept des haptischen Touchpad (Spies et al. 2010; Spies 2013)

6.2.2.5 Gestensteuerung

Nachdem die technischen Möglichkeiten der Gestenerkennung (insbesondere im Bereich der Videospiele) immer weiter vorangetrieben werden, erhebt sich die Frage, ob dies auch für die Interaktion mit dem Fahrzeug nutzbringend eingesetzt werden kann. In diesem Zusammenhang ist zunächst zu bedenken, dass Gesten im täglichen Leben spontan und meist unbewusst zur Unterstützung willentlich eingesetzter Informationsabgabe (normalerweise beim Sprechen) vor allem konnotativ eingesetzt werden. Natürlich wird auch in zwischenmenschlicher Beziehung die Geste als Kommunikationsmittel eingesetzt. Wenn dieses für eine sichere Informationsübermittlung (meist visuell über größere Entfernungen, z. B. Einweisen zum Parken) genutzt werden soll, müssen die entsprechenden Gesten allerdings gelernt werden. Weiterhin besteht das technische Problem, unwillkürliche Gesten von willkürlichen zu trennen. Meist wird die Gestenerkennung im Zusammenhang mit der Bildschirmbedienung diskutiert. So wird beispielsweise bei Annäherung der Finger an den Bildschirm der angezielte Button größer dargestellt. Die oben bereits erwähnte notwendige längere Blickzuwendung bei dieser Art der Bedienung wird durch diese Maßnahme allerdings nicht kompensiert. Auch die von Smartphones bekannte

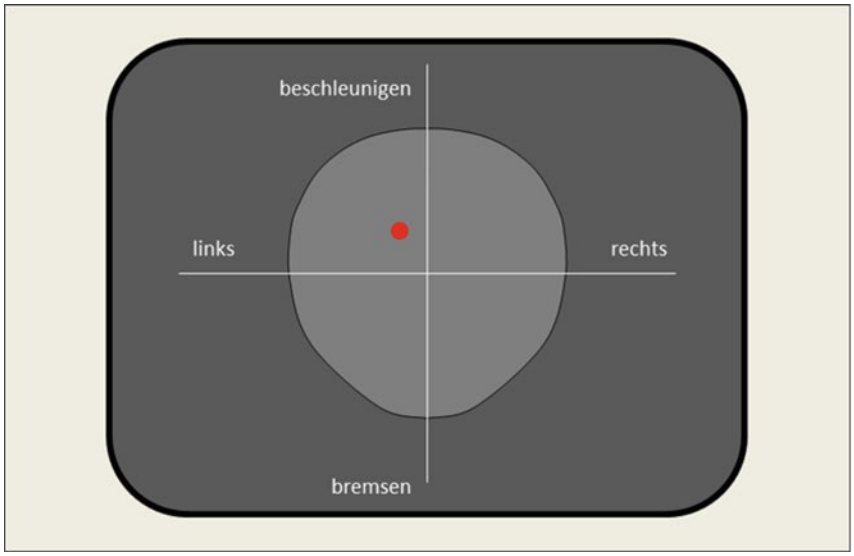


Abb. 6.33 Darstellung der Ist-Beschleunigung in Längs- und Querrichtung sowie der aktuell gemessenen Grenzwerte (nach einem Vorschlag von Porsche)

Geste für das Vergrößern und Verkleinern kann genutzt werden, wenn sich die Hand in der Nähe des Bildschirms befindet. Zurzeit fehlen allerdings valide wissenschaftliche Befunde für den Nutzen solcher Anwendungen im Fahrzeug. Auch wenn bereits veröffentlichte Forschungsergebnisse sehr positive Befunde berichten, ist jedoch der Einsatz von Gestenerkennung solange skeptisch zu sehen, bis eine vollständige Integration in ein Interaktionskonzept gelungen ist.

An den Beispielen Schrifterkennung, Spracherkennung und Gestensteuerung wird auch deutlich, dass für jede Art erkennerbasierter Interaktion generelle Gestaltungsempfehlungen zu beachten sind: Für den Nutzer ist häufig nicht klar, welche Eingaben an welchem Ort im Fahrzeug vom System als zulässig erkannt werden. Hier kommt der Vorinformation als auch der Bildschirmgestaltung eine besondere Rolle zu.

Basierend auf der alltäglichen Erfahrung mit diesen Kommunikationsformen in der zwischenmenschlichen Kommunikation erwarten Nutzer eine unmittelbare Rückmeldung durch das System. Bereits Verzögerungen der Rückmeldung um mehr als 100 ms führen zu missverständlichen Wiederholungen der Eingabe, in jedem Fall aber zu Verwirrung und mangelnder Akzeptanz. Als Rückmeldung muss nicht zwangsläufig das Erkennungsergebnis geliefert werden, aber zumindest eine Systemreaktion (siehe auch ▶ Abschn. 6.1.2).

Um Fehlerkennungen zu vermeiden, sind die meisten Erkennersysteme nicht permanent aktiv. In vielen Fällen muss das System dann durch einen Tastendruck aktiviert werden, was für viele Nutzer häufig nicht nachvollziehbar bzw. auffindbar ist. Auch hier stellt die Gestaltung der sichtbaren Informationen (Tastenbeschriftungen, Displays) eine wichtige ergonomische Gestaltungsaufgabe dar. Am Beispiel der Sprachinteraktion sei das verdeutlicht: Folgende Fragen des Nutzers sind hier durch die gezielte Gestaltung zu beantworten(Bengler 2000):

- Wann soll ich sprechen?
- Wie soll ich sprechen?
- Was soll ich sprechen?

Im Allgemeinen ist hier ein multimodaler Interaktionsansatz (Oviatt 1999, 2000) hilfreich, der die Nutzerführung und die Interaktion mit dem Erkenner durch grafische Anzeigen, Tonsignale, Sprachausgaben unterstützt (Bengler 2001 und Spies et al. 2009).

6.3 Systemergonomische Empfehlungen für die jeweiligen Fahraufgabenniveaus

6.3.1 Primäre Fahraufgabe

6.3.1.1 Stabilisierungsaufgabe

Die *Bedienelemente* für die Stabilisierungsaufgabe sind bekanntlich Lenkrad, Fahr- (Gas-)pedal und Bremspedal. Kupplungspedal und Schalthebel sind aus technischen Gründen notwendig, da die Drehzahl- und Drehmomentspannweite des Verbrennungsmotors den Geschwindigkeits- und Antriebskraftbereich des Fahrzeugs nicht vollkommen abdecken kann. Die Entwicklung der verschiedenen Formen des automatischen Getriebes und insbesondere die Möglichkeiten eines zukünftigen elektrischen Antriebs machen diese Bedienelemente überflüssig. Wegen der großen Bedeutung für das Fahrerlebnis und die Fähigkeit des Fahrers das Fahrzeug „im Griff zu halten" wird auf die Rückmeldung des Fahr- bzw. Stabilisierungszustandes insbesondere durch das Lenkrad in ► Abschn. 6.4 gesondert eingegangen.

Als den Zustand der Stabilisierung rückmeldende *Anzeige* steht eigentlich nur das Tachometer zur Verfügung, der die Ist-Geschwindigkeit anzeigt. Bei Sport- und Geländewagen ist gelegentlich eine Anzeige der Längs- und Querbeschleunigung bzw. der Schräglage des Fahrzeugs zu finden. Letztere Anzeigen sind sinnvollerweise als Analoganzeiger auszulegen, wobei im Sinne einer Bereichswertanzeige auch physikalische Grenzen (z. B. die maximal erlaubte Schräglage) dargestellt werden können. Im Rahmen des PROMETHEUS-Projektes wurden auch Vorschläge entwickelt, den maximalen Kraftfluss der Räder zum Boden zu messen. Das Ergebnis könnte nach einem Vorschlag von Porsche in einer zweidimensionalen Anzeige der Längs-und Querbeschleunigung als dynamischer Grenzwert (siehe ◘ Abb. 6.33) dargestellt werden

Wie bereits erwähnt, ist aus ergonomischer Sicht für das Tachometer die Digitalanzeige vorzuziehen, da die durch Geschwindigkeitsbegrenzungen gegebenen Vorschriften auch in digitaler Form erfolgen.

Die meisten weiteren heute im Fahrzeug verbauten Instrumente sind in der hierarchischen Ordnung unterhalb der Stabilisationsaufgabe anzusiedeln. Das gleiche gilt für das bereits erwähnte Kupplungspedal und den Schalthebel. Alle beziehen sich dabei auf Istzustände der Technik des Fahrzeugs. Seitens der Instrumente sind das Tankinhalt, Drehzahl des Motors, Kühlwasser- bzw. Öltemperatur, Ladestrom der Batterie usw.[31]. Während die Anzeige des Tankinhalts in direktem Zusammenhang mit der Navigationsaufgabe steht (siehe ► Abschn. 6.3.1.3), lässt sich die Drehzahl des Motors bei einem Automatikgetriebe praktisch nicht unabhängig von der Geschwindigkeit beeinflussen, ist also in diesem Zusammenhang weitgehend überflüssig. Kühlwasser- und Öltemperatur lassen sich normalerweise auch nicht beeinflussen. Die Information darüber ist aber sinnvoll, um bei einem noch kalten Fahrzeug eine entsprechend schonende Fahrweise zu empfehlen. Der Ladestrom der Batterie ist ebenfalls nicht zu beeinflussen. Seine Anzeige gibt indirekt Auskunft über den Zustand der Batterie und ob ggf. elektrische Verbraucher abzuschalten sind. Ohne zusätzliche Information dürften die meisten Fahrer mit dieser Anzeige wenig anzufangen wissen. Das gleiche gilt für die meisten heute in Fahrzeugen anzutreffenden Kontrollleuchten, sofern diese nicht mit einer zusätzlichen Information für den Fahrer verbunden sind (s. u.). Wenn hier aus rationaler ergonomischer Sicht der Wert der der Technik dienenden Bedienelemente und Anzeigen angezweifelt wird, darf allerdings der „Gefallensaspekt" (siehe ► Abschn. 3.3.4) nicht außer Acht gelassen werden. Nicht von ungefähr zeigt sich der subjektive Wert eines Fahrzeugs unter anderem – gestern wie heute – durch die Anzahl (und ästhetische Schönheit) der dargebotenen Instrumente. Sie geben dem Nutzer das Gefühl, Herr über eine komplexe Technik zu sein. Auch die Freude am Kuppeln und

31 Es sei in diesem Zusammenhang darauf verwiesen, dass derartige Instrumente erst Allgemeingut geworden sind, als die entsprechenden Informationen für den Fahrer aus technischer Sicht gar nicht mehr so dringend notwendig geworden waren, wie in früheren historischen Fahrzeugen. Aus Kostengründen fand sich dort bis in die Oberklasse (von Sportwagen abgesehen) hinein eigentlich nur Tachometer, Kühlwasseranzeige und Anzeige des Tankinhalts. Selbst auf Letztere hat man lange Zeit durch ein Umschalten der Kraftstoffzufuhr auf „Reserve" verzichtet.

Schalten gehört – wie bereits erwähnt – hierzu, da diese den Eindruck vermitteln, unmittelbar in die Technik des Fahrzeugs eingreifen zu können. Der gelegentliche Blick auf diese Instrumente benötigt im Mittel etwa eine Fixationsdauer von ca. 600 ms (Schweigert 2003; siehe auch ◘ Abb. 3.55). Gerade mit Rücksicht auf den immer komplexer werdenden Verkehr und die damit einhergehenden Anforderungen an den Fahrer ist zu bedenken, ob der Ablenkungseffekt durch diese rein technikorientierten Applikationen ggf. problematisch ist.

Neuerdings kommen den sicheren Fahrbetrieb unterstützende Anzeigen hinzu, wie Anzeigen des Unterschreitens einer bestimmten Außentemperatur, was gegebenenfalls Glatteisgefahr bedeutet, zu geringer Reifendruck, abgefahrene Bremsbeläge, Defekt in der Motorsteuerung u. ä. Solche Anzeigen sollten nur dann in Erscheinung treten, wenn die entsprechende Bedingung gegeben ist. Zudem sollte in vielen Fällen ein unmittelbarer Rat (zum Beispiel als Schriftbild im zentralen Anzeigeinstrument oder als akustische Wortansage) an den Fahrer erfolgen, was in dem betreffenden Fall zu tun ist. Bei handgeschalteten Fahrzeugen werden heute teilweise Schaltempfehlungen gegeben, um den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren. Wie eine Untersuchung von Lange (2010) zeigt, wird im praktischen Fahrbetrieb gerade im Zusammenhang mit komplexen Verkehrssituationen diese Anzeigen kaum beachtet, da sie nur ins Bewusstsein dringt, wenn sich der Blick zufällig auf die Instrumententafel richtet. Eine haptische Anzeige durch das aktive Gaspedal, durch welches dem Fahrer durch ein „Anklopfen", ähnlich dem Doppelklick bei der PC-Bedienung, die Aufforderung zum Schalten vermittelt wird, hat sich demgegenüber als deutlich wirksamer erwiesen.[32]

Gerade im Hinblick auf den Ressourcenverbrauch, dem damit verbundenen Anstieg des CO_2-Ausstoßes bzw. der eingeschränkten Reichweite bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen kommt der Anzeige des aktuellen Energieumsatzes erhöhte Bedeutung zu. Schon in den 80er Jahren tauchten Anzeigen über den aktuellen Kraftstoffverbrauch auf, die auf unterschiedlichen Messprinzipien beruhten (Messung des Unterdrucks im Saugrohr oder direkte Messung des Kraftstoffflusses). Im praktischen Betrieb bewirken diese Anzeigen jedoch kaum eine geänderte Fahrweise, weil sie simultan zur Beobachtung der Verkehrssituation, welche die Fahrzeugführung bestimmt, ständig beachtet werden müssten. Auch in Verbindung mit Hybridfahrzeugen und solchen mit rein elektrischem Antrieb ist die Berücksichtigung des aktuellen Verbrauchs des Energievorrats für den Fahrstil von ausschlaggebender Bedeutung. Es sind dazu verschiedene bildhafte Anzeigen vorgestellt worden, welche den Energiefluss zu den Antriebseinheiten und die Energierückgewinnung bei Bremsmanövern darstellen. Auch hier ist anzumerken, dass es unwahrscheinlich ist, dass diese Anzeigen mit Rücksicht auf die sich aus der Verkehrssituation aktuell ergebende Führungsaufgabe kontinuierlich situationsgerecht beachtet werden. Ein gewisser „erzieherischer" Effekt kann aber nicht abgesprochen werden, wenn der Fahrer durch solche Anzeigen erkennt, dass seltene und moderate Bremsmanöver zu einer besseren Energiehaushaltung und damit zu größeren Reichweiten führen. Es wäre zukünftig zu untersuchen, ob eine entsprechende haptische Anzeige über das aktive Gaspedal zu einem nachhaltigeren Effekt führt.[33]

6.3.1.2 Führungsaufgabe

Die Information für die Führungsaufgabe wird aus der Sicht auf die natürliche Umgebung, die den Straßenverlauf und die aktuelle sich ständig ändernde Verkehrssituation enthält, gewonnen. Wie aus der in ◘ Abb. 2.24 wiedergegebenen Analyse hervorgeht, beruht die Generierung der Sollgrößen für Quer- und Längsrichtung auf der Wahrnehmung dieser Situation, der Schätzung des dynamischen Verhaltens der die eigene Fahrt möglicherweise beeinflussenden Verkehrsteilnehmer und der Schätzungen der aktuellen dynamischen Eigenschaften des eigenen Fahrzeugs durch den Fahrer, alles Schätzungen, wel-

32 Auch in diesem Zusammenhang sei darauf verwiesen, dass sich mit der heutigen Technik der Automatikgetriebe, insbesondere der Anwendung des Doppelkupplungsgetriebes, der Kraftstoffverbrauch bei der Fahrweise eines durchschnittlichen Fahrers im praktischen Fahrbetrieb an die des handgeschalteten Getriebes weitgehend annähert.

33 Bereits in den 50er Jahren hat DKW bei der Baureihe 3 = 6 durch eine zweite Rückstellfeder, die ab einer bestimmten Gaspedalstellung wirksam wurde, versucht, den hohen Kraftstoffverbrauch der Zweitaktmotoren einzudämmen. Es sind dem Autor keine Untersuchungen bekannt, die diesen Effekt verifizierten.

che naturgemäß ungenau oder sogar fehlerhaft sein können. Bedingt durch die menschlichen Eigenschaften der Informationsverarbeitung reicht diese Schätzung maximal zwei Sekunden in die Zukunft, obwohl gerade bei höheren Geschwindigkeiten oder widrigen Bedingungen oftmals ein größerer Zeitraum notwendig wäre (bei trockener Straße kommt ein Fahrzeug aus einer Geschwindigkeit von 200 km/h beispielsweise nach ca. 4 s zum Stehen!). Nacht- und Nebelunfälle können u. a. dadurch bedingt sein, dass in einer gegebenen Situation der Anhalteweg in Relation zu Scheinwerfer- und/oder eingeschränkter Nebelsichtweite in Verbindung mit den Straßenbedingungen zu groß ist. Gerade unter solchen Bedingungen bieten verbesserte Scheinwerfersysteme, die beispielsweise bei eingeschaltetem Fernlicht nur den Bereich für den entgegenkommenden Verkehr ausblenden und die unterstützt durch das Navigationssystem vorausschauend dem Kurvenverlauf folgen, eine große Hilfe.

Für die Führungsaufgabe gab es bis vor kurzem praktisch keine Anzeigen im eigentlichen Sinn, welche diese erleichtern und helfen deren Ausführung in sicheren Schranken zu halten. Als ersten Schritt für Anzeigen auf dem Führungsniveau kann die von Kameras detektierte und durch Software – auch durch Zuhilfenahme von im Navigationsrechner gespeicherter Information – aufbereitete Anzeige der aktuellen Geschwindigkeitsbegrenzung („Verkehrszeichenassistent“) angesehen werden. Zumindest hilft diese Anzeige dem Fahrer, ähnlich wie eine nach dem gleichen Prinzip arbeitende Überholverbotsanzeige, sich ggf. sicher zu sein, ob die Vorschrift noch gültig oder bereits aufgehoben ist. Voraussetzung für das Vertrauen, das der Fahrer in eine solche Anzeige setzt, ist allerdings eine hinreichend große Erkennensrate und eine niedrige Fehlerrate (besser als 95 % bzw. geringer als 5 %). Auch die haptische Anzeige des sog. „Lane Departure Warning“ (LDW), welche je nach Auslegung die aufbereitete Information einer Frontkamera oder einfach die Reflexion von Laserstrahlen an den Straßenbegrenzungsmarkierungen nutzt, und so die Annäherung oder bereits das Überschreiten der Straßenbegrenzung in Querrichtung durch Vibration oder Gegenmoment am Lenkrad oder am Sitz anzeigt, kann als eine Grenzwertanzeige der Querabweichung angesehen werden. Im Peugeot 5008 wurde eine von Continental entwickelte Anzeige vorgestellt, welche auf der Grundlage von Radarmessung den Abstand x zum vorausfahrenden Fahrzeug misst und als Zeitwert t_S ($t_S = x/v$) in einem Einfach-HUD[34] ausgibt. Aufgabe des Fahrers ist es dann, die Geschwindigkeit v und den Abstand x so einzuregeln, dass Werte < 0,8 s, welche eine polizeiliche Verwarnung zur Folge hätten, vermieden werden (möglichst sollten Zeitdistanzwerte zwischen 1,2 und 2 s eingehalten werden!). Auch die heute in der Luxusklasse angebotenen Nachtsichtgeräte gehören in die Kategorie der Anzeigen auf Führungsniveau, da sie durch die Nutzung der Wärmestrahlung in der Lage sind, ein womöglich kaum sichtbares Lebewesen im Vorfeld des Fahrzeugs zu detektieren. Heute wird die so gewonnene Information im Zentralen Display angezeigt. Dafür gilt in ähnlicher Weise, wie zuvor schon für die Schaltempfehlung dargestellt, die Einschränkung, dass diese Information nur genutzt werden kann, wenn in der gegebenen Situation zufällig auf das Display geblickt wird. Das ist aber bei schwierigen Sichtbedingungen eher unwahrscheinlich. So ergab eine Untersuchung von Bergmeier (2009), dass die im zentralen Display dargestellte Information am unsichersten erfasst wird, selbst eine Warnung im konventionellen HUD ist relativ unwirksam, weil für den Fahrer nicht klar ist, wo sich das gefährdete Lebewesen befindet und wie es sich verhält. Erst eine ortskonforme Markierung im kontaktanalogen HUD bewirkt eine signifikant sicherere Wahrnehmung (◘ Abb. 6.16).

Da sich die Aufgabe der Fahrzeugführung im realen Sichtfeld vor dem Fahrzeugs stellt, müssten Anzeigen, die dafür eine Hilfe bieten, auch dort dargestellt werden. Dazu kommt eigentlich nur das kontaktanaloge HUD infrage. Bubb hat bereits 1985 dafür Vorschläge gemacht. Danach wird im kontaktanalogen HUD der so genannte „Fahrschlauch“ dargestellt, d. h. der Kurs, den das Fahrzeug einnehmen

34 Die Anzeige des HUD erfolgt in dem Fall über einen kleinen aufklappbaren Combiner (halbdurchlässiger Spiegel), wodurch die sonst aufwändige optische Kompensation der Windschutzscheibenkrümmung umgangen wird. Die Anzeige der zeitlichen Distanz müsste übrigens nicht notwendigerweise in einem HUD erfolgen, biete dort aber die größte Wahrscheinlichkeit im normalen Verkehrsfluss beachtet zu werden.

Abb. 6.34 Anzeige des Fahrschlauchs im kontaktanalogen HUD; die Querposition des eingespiegelt Balkens zeigt an, wo sich das Fahrzeug in 1,5 Sekunden befindet, wenn keinen kordierenden Bedienelementeingriffe getätigt werden

würde, wenn am Lenkrad keine Änderungen vorgenommen werden. Für seine Darstellung genügt es völlig einen Querbalken anzuzeigen, der sich – je nach Auslegung – in einer Entfernung zwischen 1,2 bis maximal 2 Sekunden virtuell vor dem Fahrzeug auf der Fahrbahnoberfläche befindet und dessen Querposition von der augenblickliche Lenkradstellung abhängt (Abb. 6.34). In Simulatorversuchen hat sich herausgestellt, dass es dabei gleichgültig ist, ob der Fahrschlauch als Ganzes sichtbar ist, d. h. dass die Verbindungslinien zwischen dem Fahrzeug und dem Abstandsbalken visualisiert werden oder nicht (Lange 2007). Wichtig ist, dass die Position des Balkens immer durch die Lenkradstellung (und womöglich sonstige dynamische Eigenschaften des Fahrzeugs) bestimmt ist. Israel (2013) konnte in Simulatorexperimenten zeigen, dass dadurch das Befahren von Engstellen wie zum Beispiel Baustellen deutlich einfacher und sicherer zu bewältigen ist. Assmann (1985) wies mit einem Realfahrzeug, das über ein kontaktanaloges HUD verfügte, nach, dass damit die Zeiten, in denen ein zu geringer Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug gefahren wird, signifikant reduziert werden. Neben der Anzeige des Fahrschlauchs wurde von Bubb (1985) auch vorgeschlagen, den notwendigen Überholweg anzuzeigen. Allerdings gerät man bei den großen Distanzen, die dabei auftreten (500 m und mehr), an die technischen Grenzen der Darstellbarkeit in einem kontaktanalogen HUD.

Außerhalb des normalen Fahrens gibt es auch Sonderformen der Führungsaufgabe. Dazu gehören alle Rangiermanöver, insbesondere das Einparken. Bei der allgemeinen Behandlung der verschiedenen Anzeigevarianten (▶ Abschn. 6.2.1.) wurden Anzeigen vorgestellt, die diesen Vorgang erleichtern. Weit verbreitet sind inzwischen akustische Anzeigen, die das Annähern an Gegenstände durch unterschiedliche Tonhöhen (Unterscheiden von Hindernissen vor oder hinter dem Wagen) und durch zunehmende Intermittierungsfrequenz der jeweiligen Töne die Annäherung an ein Hindernis anzeigen. Wesentlich besser wird die Rangieraufgabe durch bildhafte Anzeigen auf einem Display unterstützt, das die Distanz zu Hindernissen optisch sichtbar macht (Abb. 6.15). Eine weitere Steigerung für die Anschaulichkeit ist durch computertechnisch aufbereitete Videobilder gegeben, welche das Fahrzeug aus der Vogelperspektive samt der realen Umgebung zeigen. Die Aufgabe wird noch einmal um eine Qualitätsstufe erleichtert, wenn in das Bild einer Rückfahrkamera der durch die augenblickliche

Lenkradstellung gegebene „Fahrschlauch" eingeblendet wird (◘ Abb. 6.17).

Die in den letzten beiden Abschnitten diskutierten Anzeigen für die Führungsaufgabe setzen nicht die Existenz von Assistenzsystemen voraus. Mit Ausnahmen der Einparkhilfen können alle Größen unmittelbar aus am Fahrzeug vorliegenden Werten (im Wesentlichen Geschwindigkeit, Querbeschleunigung bzw. Lenkradstellung) berechnet werden. Es wird dabei sozusagen der dynamische Einflussbereich des Fahrzeugs visualisiert. Aufgabe des Fahrers ist es dann, diesen dynamischen Einfluss mit den durch die Realität gegebenen Grenzen zu vergleichen und durch entsprechende Wahl von Lenkradstellung und Geschwindigkeit abzugleichen. Im Gegensatz dazu sind Assistenzsysteme dadurch charakterisiert, dass sie Messungen von externen Größen vornehmen und auf dieser Grundlage regelnd in den Fahrprozess eingreifen oder auf der Grundlage einer virtuellen Regelung dafür Grenzen in Form von Warnungen ausgeben.[35] Gleichwohl können die hier diskutierten Anzeigen mit Assistenzsystemen kombiniert werden, wodurch für den Fahrer ein besseres Verständnis der Wirkungsweise des jeweiligen Assistenzsystem erreicht werden würde (siehe hierzu ► Abschn. 9.4).

6.3.1.3 Navigationsaufgabe

Ohne technische Hilfen muss die Navigationsaufgabe aus dem Gedächtnis und/oder unter Zuhilfenahme von Karten erledigt werden. Spätestens bei der Änderung der bekannten Strecke und vor allem dann, wenn sie ad hoc während der Fahrt ausgeführt werden muss, stößt ihre Erfüllung schnell an ihre Grenzen. Sie wird heute weitgehend perfekt durch Navigationsrechner technisch unterstützt. Alle Navigationssysteme, auch diejenigen aus dem Sekundärmarkt, haben heute die Eigenschaft, dass sie bei Abweichung von der ursprünglich errechneten Fahrtroute innerhalb von kürzester Zeit dem Fahrer die Abweichung rückmelden und eine neue Route berechnen. Ergonomischen Anforderungen sind aber speziell an die Programmierung der Strecke und an die Darstellung der Navigationsempfehlung zu stellen.

Programmierung der Strecke: für die Programmierung bei *stehendem Fahrzeug* sind die in ► Abschn. 6.1.1.1 dargestellten systemergonomischen Regeln zur sequenziellen und simultanen Bedienung anzuwenden. Unabhängig davon, ob die Informationseingabe über Touchscreen, Drehdrücksteller oder über ein Touchpad (Schriftzeichenerkennung) erfolgt, ist entscheidend, dass keine unnötigen Bedienschritte vorgesehen werden (ist zum Beispiel ein Button „Zielführung starten" notwendig, wenn alle Adresseingaben gemacht worden sind oder ist nicht eine Rücktaste besser, die es erlaubt, fehlerhafte Eingaben zu korrigieren?). Auch alle Regeln zu Rückmeldung und Kompatibilität sind zu beachten. So sollte zum Beispiel nach erfolgter Adresseingabe – auch während der Fahrt – immer die Zieladresse angezeigt werden. Wenn ein Ziel, das nicht im Standardzielspeicher des Navigationsrechners verfügbar ist, schließlich über konventionelle Navigation (Kartenmaterial bzw. Befragen von Einheimischen) gefunden wurde, so sollte dies auch nachträglich in den individuellen Adressspeicher aufgenommen werden können. Wie bereits angesprochen, sollte es möglich sein, komplexe Routenplanungen am PC oder auf einem Smartphone außerhalb des fest eingebauten Navigationssystems durchzuführen und auf dieses schließlich zu übertragen.

Wie Sacher (2009) beobachtete, wird im Allgemeinen der Navigationsrechner häufig im Fahren programmiert (beobachtete Prioritätsrangfolge: erst losfahren, dann überlegen: wohin?). Das bedeutet, dass das *Programmieren während der Fahrt* möglichst reduziert oder so einfach und wenig ablenkend wie möglich sein muss. Eine Maßnahme sind neben der Fernprogrammierung des Fahrzeugs über Smartphone oder Internet u. a. frei belegbare „Stationstasten" oder Favoritenlisten auf die bekannte, häufig anzufahrende Ziele individuell gespeichert werden können. Es sollten allerdings nicht mehr als acht solcher Tasten vorgesehen werden. Im Telefonverzeichnis hinterlegte Adressen können unter Umständen mittels Spracheingabe bzw. Touchpad auf das Navigationssystem übertragen werden. Dies würde beispielsweise eine Erweiterung der erwähnten Stationstasten darstel-

35 Das oben erwähnte im Peugeot 5008 verwirklichte System ebenso wie die Parkdistanzanzeigen stellen diesbezüglich eine Zwitterstellung dar, da der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug oder andern Hindernissen zwar gemessen wird, aber nicht für eine technische Regelung genutzt wird.

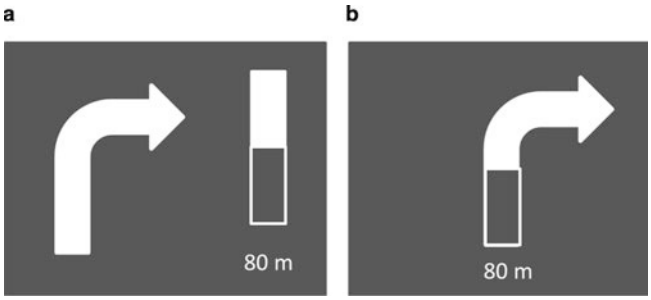


Abb. 6.35 Navigationshinweis durch bildhaftes Abbiegesymbol, **a** mit separater Entfernungsanzeige, **b** mit integrierter Entfernungsanzeige

len. Starke variierende oder auch ad hoc während der Fahrt auftauchende Ziele (Sehenswürdigkeiten, Suche nach einem Restaurant, Rastplatz u. ä.) machen allerdings eine komplexere Zieleingabe notwendig. Es bietet sich hier auch die Spracheingabe oder die Eingabe von Buchstaben über das Touchpad an. In beide Eingabevarianten ist in diesem Zusammenhang jedoch noch Forschung zu investieren, um insbesondere das Problem des Herausfindens aus einer bedientechnischen „Sackgasse" zu lösen.

Es gibt auch Ziele, die sich aus dem Zustand des Fahrzeugs unmittelbar ergeben. Dazu gehört insbesondere die Suche nach Tankstellen bzw. Stromabgabestellen für Elektrofahrzeuge. Wenn die aus Tankinhalt bzw. Restkapazität der Batterie errechnete Restreichweite einen bestimmten Wert unterschreitet, sollten automatisch im Navigationssystem entsprechende Energieabgabestationen verbunden mit den Spezifikationen (Preis, Distanz, Schnellladestation, Verfügbarkeit u. ä.) angezeigt werden. Durch einen einfachen Bedienschritt (zum Beispiel Antippen auf dem Touchscreen) sollte dann die Navigation zu diesem Zwischenziel erfolgen, ohne dass die Navigation zum ursprünglichen Hauptziel gelöscht wird.

Navigationsanzeige: Die Anzeige kann auf unterschiedlichem Niveau erfolgen. Die ersten Navigationssysteme nutzten nur die *akustische Anzeige* (z. B. „nächste Querstraße rechts … jetzt bitte rechts"). Nur bei eindeutigen lokalen Verhältnissen kann damit eine irrtumsfreie Informationsübermittlung erfolgen. Die akustische Anzeige ist parallel zu einer optischen Anzeige nach wie vor sinnvoll, da sie die Aufmerksamkeit auf sich zieht. Nachdem diese Anzeige oft aber auch als störend empfunden wird, sollte sie auf einfache Weise (eine Handlung!) abschaltbar sein. Auch optische Anzeigen können auf unterschiedlichem Niveau erfolgen. Wie bereits erwähnt, ist es sinnvoll, eine Anweisung für ein Abweichen von der bisherigen Route in den nächsten Sekunden im Kombiinstrument hinter dem Lenkrad oder im HUD anzuzeigen. Das zentrale Display sollte demgegenüber idealerweise einer allgemeinen nordweisende Kartendarstellung vorbehalten bleiben[36]. Die einfachste optische Anzeige erfolgt durch ein *Pfeilsymbol*. Leider hat sich hierfür eingebürgert, neben dem Abbiegesymbol einen zweiten Balken anzuzeigen, der die Entfernung bis zur Aktion symbolisiert. Der Fahrer muss für die korrekte Interpretation zwischen beiden Anzeigen hin und her blicken. Es wäre einfacher, die Entfernungsanzeige unmittelbar in den Abbiegepfeil zu integrieren (siehe Abb. 6.35).

Weitaus anschaulicher als das abstrakte Pfeilsymbol ist allerdings die *Bird-view-Anzeige* der Kreuzungssituation, bei der durch das Fahrzeugsymbol die gegenwärtige eigene Position angezeigt wird, gegebenenfalls ergänzt um umgebende Straßenzüge und Beschilderung (Bengler et al. 1994). Durch die Anzeige von Abbiegespuren wird dem Fahrer eine weitere Verbesserung der sicheren Orientierung geboten. Die Einfachheit der Orientierung wird noch einmal gesteigert durch die *kontaktanaloge Anzeige* der Abbiegeempfehlung. Diese kann durch Einblenden in das Bild einer Frontkamera erfolgen oder im allerbesten Fall im kontaktanalogen HUD (siehe auch Abb. 6.36). Erste Versuche mit einer solchen Anzeige deuten darauf hin, dass die kontaktanaloge Einblendung nur etwa im Bereich von 2 bis 3 Sekunden vor dem

36 Da hier allerdings die individuellen Präferenzen auseinander gehen, sollte die Wahl zwischen nordweisend und in Fahrtrichtung weisend möglich sein.

Abb. 6.36 Navigationsanzeige einer komplexen Kreuzungssituation im kontaktanalogen HUD (die Kreuzungssituation ist unten rechts dargestellt)

eigentlichen Abbiegen sinnvoll ist. In der Zeitperiode davor scheint als Anzeige ein statisches Symbol zur Vorbereitung des Abbiegevorgangs (z. B. Empfehlung zum Spurwechsel) vorteilhafter zu sein. Israel (2013) konnte im Simulatorexperiment zeigen, dass durch eine kontaktanaloge Navigationsanzeige im HUD die Fehlinterpretation auch in sehr komplexen Kreuzungssituationen selbst gegenüber einem konventionellen HUD signifikant abnimmt (Abb. 6.37). Seine Experimente weisen allerdings auch darauf hin, dass für diese Anzeigeversion noch weiterer Forschungsaufwand notwendig ist. Die Ausgabe der Navigationsinformation sollte ebenfalls grafisch und sprachlich erfolgen. Allerdings zeigt sich regelmäßig, dass die Sprachausgaben von Nutzern abgeschaltet werden. Gestalterische Maßnahmen, die dazu beitragen, die phonetische Qualität der Ausgaben und ihre Monotonie zu vermeiden, könnten hier Abhilfe schaffen. Bereits geringfügige Veränderungen der Sprechweise und kleinere Variationen der Texte wären in diesem Sinn hilfreich ohne Verständlichkeit oder Sinngehalt der Meldungen zu beeinträchtigen.

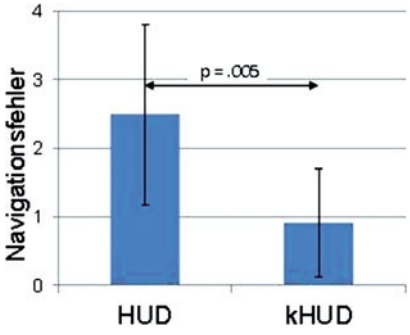


Abb. 6.37 Durchschnittliche Anzahl der Navigationsfehler im kontaktanalogen HUD in Relation zu einem konventionellen HUD in komplexen Kreuzungssituationen (Israel 2013)

6.3.2 Sekundäre Fahraufgabe

Wie bereits in ▶ Kap. 1 dargestellt, werden Aufgaben, die im unmittelbaren Zusammenhang mit dem Fahrprozess stehen, deren Nichterfüllung aber den Fahrprozess nicht direkt beeinflussen, als sekundär bezeichnet. Diese Aufgaben sind weiterhin danach zu unterscheiden, ob sie aktiv, d. h. eine Willensäußerung des Fahrers beinhalten, oder ob sie reaktiv sind, d. h. in Abhängigkeit von einer gegebenen Situation durchzuführen sind. Aktive Aufgaben sind das Setzen aller Warnsignale (Hupe und Lichthupe) sowie der Fahrtrichtungsanzeiger („Blinker“) sowie neuerdings das Initiieren von Assistenzfunktionen (Lane departure warning, Tempomat, ACC u.ä). Die reaktiven Aufgaben lassen sich prinzipiell automatisieren, was bei den zunehmend komplexer werdenden Verkehrssituationen aus ergonomischer Sicht auch zu empfehlen ist. Es ist dabei derzeit eine Frage der jeweiligen „Interaktionsphilosophie“ des Herstellers, ob die Initiierung des Automatikprozesses durch den Fahrer erfolgt oder ob die Automatik

immer aktiv ist. Diese Tatsache führt allerdings für die Nutzer unterschiedlicher Marken zu Intransparenz und hohen Fehlbedienungsraten. Klassische reaktive Aufgaben sind das Schalten der verschiedenen Lichtfunktionen, insbesondere das Ein-und Ausschalten des Fahrlichtes und das Auf- und Abblenden sowie die Wischerfunktionen (bei handgeschalteten Fahrzeugen gehört auch das Kuppeln und Schalten dazu). Nachdem keine Automatik jede Situation abdecken kann und auch nicht immer allen Erwartungen des Fahrers entspricht, ist es notwendig, Korrekturaktionen so einfach wie möglich und nach Möglichkeit konform zu einer gewohnten Bedienung „von Hand" zu gestalten. Unabhängig davon, ob es sich um aktive oder reaktive Aufgaben handelt, sind die Bedienelemente rund um das zentrale Bedienelement für die primäre Fahraufgabe, nämlich das Lenkrad anzuordnen. Das geschieht heute fast ausschließlich durch Lenkstockhebel[37] oder durch am Lenkrad direkt angebrachte Bedientasten. In jedem Fall ist es notwendig, dass eine Rückmeldung über den Schaltzustand einer Funktion jederzeit gegeben ist. Dies kann durch die (sichtbare!) Stellung des Bedienelements, eine Leuchte am Bedienelement oder durch das Schalten eines Symbols im Kombiinstrument geschehen. Durch die anthropometrische Gestaltung (siehe ▶ Abschn. 7.3.3) ist dafür Sorge zu tragen, dass diese Rückmeldung aus jeder Fahrerhaltung sowie für jede Fahrerstatur (Anthropometrie) sichtbar ist.

6.3.3 Tertiäre Aufgaben

Tertiäre Aufgaben haben weder direkt noch indirekt etwas mit dem Fahren zu tun, sie werden aber dennoch während des Fahrens erledigt. Sie haben damit prinzipiell ablenkenden Charakter. Das gilt auch für die traditionellen Bedienvorgänge, wie das Justieren der Heizung/Klimaanlage, das Bedienen der Fenster, des Schiebedachs und des Radios. Diese Bedienvorgänge sind teilweise komplexer geworden, da höhere Komfortansprüche befriedigt werden sollen (z. B. Radio mit Umschalten auf verschiedene Tonquellen und deren Bedienung, das Aussuchen und womöglich die Zusammenstellung der Abfolge spezielle Musikstücke). Teilweise sind sie aber durch technische Maßnahmen auch vereinfacht worden (z. B. Stationstasten sowie Sendersuchlauf für das Radio; die automatische Klimaregelung, elektrische Fensterheber). Mit der Erweiterung des Radios um einen Navigationsrechner[38] und die Möglichkeit im Auto zu telefonieren wurde der Bedienumfang in Verbindung mit all den bisherigen tertiären Aufgaben noch einmal deutlich vergrößert. Hinzu kommt nun neuerdings die Einbindung des Fahrzeugs in das Internet. Der Druck, über all die genannten Interaktionsmöglichkeiten im Fahrzeug zu verfügen, und die Tatsache, dass die damit einhergehende Diversität kaum mit den bisher verwendeten Schaltern und Tastern bedient werden kann, hat dazu geführt, dass dafür spezielle Bedienkonzepte entwickelt worden sind. Im Wesentlichen werden heute der Touchscreen, Drehdrücksteller, Touchpad, Joystick (Lexus) und Mischformen aus diesen Eingabegeräten eingesetzt. Bei all diesen Eingabegeräten wird in einer Menüstruktur navigiert, um die einzelnen Funktionen auszulösen. Bereits Michon 1993 und Parkes und Franzen 1993 weisen auf die Potentiale dieser Systeme aber auch die Notwendigkeit ihrer ergonomischen Gestaltung hin.

Rassl (2004) hat bei Fahrten (in verkehrsarmer Umgebung) im Realfahrzeug die systemergonomische Relevanz für die Auslegung solcher Bedieneingriffe im Detail untersucht. Die Bedienung erfolgte dabei konsequent durch einen Drehdrücksteller in Verbindung mit einem einheitlich angebrachten TFT-Display. Gleichwohl lassen sich die Ergebnisse auch auf die erwähnten anderen Bedienelemente übertragen, da die kognitive Bindung durch das Zurechtfinden in dem Menübaum Gegenstand der Untersuchung war. Für die Untersuchung wurden insgesamt 36 Einzelaufgaben realisiert, wobei für

37 Unter Nutzung der heutigen Möglichkeiten rechnergestützter Informationsverarbeitung sind die von Citroen in ihren CX-Modellen der 70er Jahre genutzten Bediensatelliten bei Beachtung grundsätzlicher ergonomischer Forderungen durchaus einer neuen Überlegung wert.

38 Es sei hier noch einmal darauf hingewiesen, dass die Bedienung des Navigationsrechners ein Aspekt der primären Fahraufgabe ist. Nur durch die erwähnte Historie der technischen Entwicklung ist dies heute der zentralen Bildschirmeinheit zugeordnet und so in die Bedienung der übrigen tertiären Aufgaben integriert.

jede Aufgabe jeweils eine aus systemergonomischer Sicht gute und eine schlechte Variante mit der ganzen zugehörigen Menüstruktur realisiert wurde. Eine Falschnavigation in dem Menübaum konnte durch einen „zurück"-Menüpunkt korrigiert werden, wodurch ein Sprung die höhere Menü-Ebene erfolgte. Durch einen separaten Bedienknopf war es möglich, an den Anfang des Menübaumes zu gelangen.

Aus den Ergebnissen der Versuche lassen sich folgende Regeln ableiten:

1. Dem Anwender dürfen gleichzeitig (simultan) nicht mehr als neun Auswahlmöglichkeiten angeboten werden. Diese sind bei Bedarf auf sequentielle Schritte zu verteilen.
2. Wenn möglich, sind simultan angezeigte Auswahlmöglichkeiten gemäß ihrer Wichtigkeit anzuordnen.
3. Es darf im Sinne der systemergonomischen Forderungen (6.1) maximal nur *ein* unnötiger Bedienschritt eingefügt werden. Dieser zwar prinzipiell unnötige sequentielle Bedienschritt muss sich zumindest in die Logik der Bedienfolge einpassen.
4. Eine simultane Bedienung darf nicht sequentiell dargestellt werden[39]. Nur bei der Darstellung von mehr als neun Auswahlmöglichkeiten ist gemäß der Regel 1 eine Ausnahme zulässig.
5. Eine sequentielle Bedienung darf nicht simultan dargestellt werden.
6. Tertiäre Aufgaben sind statisch zu gestalten, d. h. auch ein quasidynamischer Effekt, wie er durch den automatischen Rücksprung in den Ausgangszustand bei Nichtbedienen erfolgt, ist nach Möglichkeit zu vermeiden. Wenn dieser Rücksprung unumgänglich ist, so sollte die einmal gewählte Einstellung mehr als 3 Sekunden gehalten werden.
7. Die Rückmeldung muss innerhalb von 200 ms erfolgen.

Tertiäre Aufgaben beanspruchen die Aufmerksamkeit des Fahrers offensichtlich in weitaus stärkerem Maße als allgemein angenommen. Durchschnittlich wurde bei den Versuchen von Rassl länger auf das Display (1,35 s ± 0,54 s) als auf die Fahrbahn geblickt (0,67 s ± 0,32 s). Die durchschnittliche minimale Blickdauer auf das Verkehrsgeschehen lag bei 0,24 s ± 0,14 s, die mittlere maximale Blickdauer auf das Display hingegen bei 2,72 s ± 1,47 s, wobei Extrema bis zu 16 s auftraten. Auch bei vermeintlich einfachen Aufgaben, wie dem Einstellen des Radios, wurden maximale Blickabwendungsdauern von bis zu 10 Sekunden gemessen. Ähnlicher Ergebnisse zeigten unveröffentlichte Versuche des Lehrstuhls für Ergonomie der TUM zur Bedienung des Klimasystems. Auch diese Versuche wurden im öffentlichen Straßenverkehr durchgeführt. Die mittleren Blickabwendungszeiten waren in der gleichen Größenordnung wie bei Rassl. Dabei zeigt sich ein interessanter Effekt: Nach systemergonomischen Regeln gut ausgelegte Systeme zeigten dabei *im Mittel* kaum bessere Werte als schlechter ausgelegte Systeme. Die Standardabweichung bei den schlechten Systemen ist aber signifikant höher. Die maximalen Werte unterscheiden sich noch einmal signifikant. Selbst bei den gut ausgelegten Systemen kamen Blickabwendungen von 4 Sekunden vor. Bei den schlechten Systemen wurden sogar Blickabwendungszeiten von 12 Sekunden beobachtet. Sowohl bei diesen, wie auch bei den Versuchen von Rassl fiel auf, dass sich die Probanden dieser langen Abwendungszeiten nicht bewusst sind. Offensichtlich wird die tertiäre Aufgabe unter bestimmten Umständen für die Versuchsperson zur primären Aufgabe. Durch eine konsequente Beachtung systemergonomischer Regeln kann aber zumindest die Wahrscheinlichkeit für eine derartige Umgewichtung deutlich reduziert werden.

Weitere Daten zur Blickabwendung bei tertiären Tätigkeiten und ihre Auswirkung auf das Blinck-, Lenk- und Abstandsverhalten wurden im ADAM Projekt in verschiedenen Fahrsimulatoren ermittelt (Bengler et al. 2002, 2003, 2004; Breuer et al. 2003). Die untersuchten Tätigkeiten umfassen sowohl die Interaktion mit Menuesystemen als auch mit mobilen Endgeräten und sogenannte „socially accepted tasks" wie das Suchen nach Gegenständen oder Süssigkeiten.

Eines der größten Probleme der Bedienung von Systemen, deren mögliche Funktionen baumartig

39 Dieses Ergebnis verbietet das häufig anzutreffende „Durchswitchen" der verschiedenen Bordcomputerfunktionen, das seitens der Hersteller so beliebt ist, weil es mit nur einem Taster für viele Funktionen auskommt.

organisiert sind, ist das Zurechtfinden in diesem Menübaum. Die Baumstruktur entspricht nämlich im Prinzip nicht der assoziativen Organisationsstruktur des menschlichen Gedächtnisses. Diese ließe beispielsweise die Möglichkeit des Springens von einem Zweig des Menübaumastes zu einem anderen Ast wünschenswert erscheinen. Welche Sprünge dabei möglich sein sollten, hängt vom Kontext der Nutzung ab.

Ablassmeier (2009) argumentiert, dass sich solch ein System wie ein „intelligenter Beifahrer" verhalten sollte, der den Fahrer bei seinen Aufgaben weitgehend autonom unterstützt. Die Verwendung von „intelligenten" Informationsagenten soll auf Basis bedingter Wahrscheinlichkeiten den Fahrer gerade bei häufig wiederkehrenden Handlungsabläufen entlasten und dabei relevante Informationen vorfiltern (Hofmann et al. 2001). Er geht bei seinem Vorschlag davon aus, dass die Funktionen überhaupt nicht hierarchisch geordnet sind. Vielmehr soll eine effiziente Dialogführung den Fahrer aufgabengerecht leiten. Für seine Versuche verwendete er die Beispiele Tank-, Kontakt- und Terminagenten sowie Restaurant-Recommender (als weitere denkbare Agenten erwähnt er: Stauagent, Ankunftsagent, Klimaagent und Bahn-/Fluginfoagent), wofür er jeweils Lösungsansätze entwickelte. Als mathematische Möglichkeiten für die Auswahl schlägt er die Bayes'schen Netze und die neuronalen Netze und hier speziell die probabilistischen neuronalen Netze vor, wobei das Bayes'schen Netz für den Tankagent und den Kontaktagenten zur Anwendung kommt und das probabilistische neuronale Netz für den Restaurant-Recommender. Die für das Bayes'schen Netz notwendigen Gewichtungen wurden durch Befragung der Versuchspersonen festgelegt. Insgesamt kann als Ergebnis von Fahrsimulatorversuchen festgehalten werden, dass Informationsagenten im Fahrzeug geeignete Methoden darstellen, um den Fahrer zu unterstützen. Allerdings ist auch festzuhalten, dass noch weiterer Forschungsbedarf notwendig ist, um die Akzeptanz und vor allem die Trefferquote solcher Agenten seitens des Nutzers genauer zu untersuchen.

Um solche Systeme zu konzipieren, ist also in jedem Fall von der zu Beginn des Kapitels erwähnten Szenarientechnik auszugehen. Unabhängig von der Realisierbarkeit von Vorschlägen, wie sie soeben erwähnt worden sind, ist eine unabdingbare Voraussetzung für die sog. *Fehlerrobustheit* die Existenz einer Taste, die den letzten Schritt rückgängig macht, falls man sich in dem Menübaum oder dem System „verirrt hat", und einer davon getrennten Taste, die den Nutzer wieder an den Stamm des Menübaums bringt.

Aufgrund der Tatsache, dass das Zurechtfinden in dem Menübaum der verfügbaren Funktionen bzw. im Internet ähnliche mentale Fähigkeiten erfordert wie die primäre Navigationsaufgabe (nicht von ungefähr wird diese Tätigkeit mit dem Ausdruck „Navigieren" beschrieben), kann es dabei zu Interferenzen mit der primären Fahraufgabe kommen. Nur durch das Bereitstellen von Assistenzsystemen für die primäre Fahraufgabe kann der Gefahr, die durch die Abwendung zu der Nebenaufgabe zustande kommt, wirkungsvoll begegnet werden. Allerdings birgt auch diese Maßnahme die Gefahr in sich, dass sich der Fahrer nun gänzlich von der Hauptaufgabe abwendet, sich ggf. auf den Automaten verlässt und sich mental nur noch der Nebenaufgabe widmet. Eine Lösung dieses Dilemmas ist durch die bereits in ► Abschn. 2.6 erwähnte Berechnung eines Sicherheitskorridors durch das Assistenzsystem möglich, innerhalb dessen der Fahrer das Fahrzeug zu führen hat.

6.4 Gestaltung der fahrrelevanten Eigenschaften

Die oft beworbene „Freude am Fahren" wird in der primären Fahraufgabe letztlich auf der Ebene der Stabilisierung durch die perfekte Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug erreicht. Sie wird deshalb gesondert in dem nun folgenden eigenen Kapitel behandelt. Der Fahrer sieht sein Fahrzeug quasi wie eine Erweiterung seines eigenen Körpers und damit seiner eigenen Fähigkeiten. Dieser Effekt stellt sich umso mehr ein, je besser, je unmittelbarer die Befehle des Fahrers vom Fahrzeug umgesetzt und die Reaktionen des Fahrzeugs an den Fahrer zurückgemeldet werden. Generell gilt, dass Änderungen an den Bedienelementen (Lenkung, Fahr- und Bremspedal) prinzipiell innerhalb eines Zeitfensters vom 100 ms, maximal 200 ms über die Sinnesorgane irgendwie gespürt werden. Neben der

Beeinflussung der Motorleistung ist dabei der Lenkung besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Sie ist deshalb über die lange Geschichte des Fahrzeugs hinweg immer wieder Gegenstand der Forschung. Mal stehen hier vor allem technische Aspekte im Vordergrund, mal psychologische des Erlebens. Mit den Möglichkeiten, welche die elektrisch/elektronische Steuerung zur Verfügung stellt, erhält dieses Thema neue Bedeutung. Mit elektronisch gesteuerten Lenkgetrieben wird bereits heute die Übertragung zwischen Lenkrad und Stellung der gelenkten Vorderräder zusätzlich zu den Eingriffen des Fahrers beeinflusst. Mit den Mitteln einer vollkommenen Trennung des Bedienelements Lenkrad von dem Aktuator am Lenkgetriebe, wie es unter dem Namen Steer-by-Wire bekannt ist, werden die Möglichkeiten einer maßgeschneiderten Lenkung noch potenziert. Mit all diesen Möglichkeiten, darf das Gefühl des Fahrers, mit dem Fahrzeug eins zu sein und zu spüren, wie es mit der Straße verbunden ist, nicht verloren gehen, um die Freude bei Stabilisierungsaufgabe sicherzustellen.

6.4.1 Querdynamik: Das Lenkgefühl

Das Lenkgefühl wird von Pfeffer (2013) folgendermaßen definiert:

Definition

Lenkgefühl ist die Summe der optischen, kinästhetischen und haptischen Sinneseindrücke des Fahrers beim Lenken eines Fahrzeugs und entspricht einer subjektiv empfundenen, komplexen Erfahrung.

6.4.1.1 Fahrbahnkontakt

In vielen Testberichten wird von einer guten Lenkung erwartet, dass sie Rückmeldung über die Qualität des Straßenkontaktes gibt, um gegebenenfalls bei widrigen Straßenverhältnissen mit entsprechend niedrigen Längs- und Querbeschleunigungen zu reagieren. Tatsächlich liefert das Lenkrad aus Sicht der Fahrmechanik und -dynamik Information über die Reaktionskräfte zwischen den gelenkten Vorderrädern und der Straße. Die Aussagekraft dieser Rückmeldung kann allerdings nur durch eine Betrachtung der kräftemäßigen Verhältnisse eines Rades bei Kurvenfahrt bewertet werden. Durchfährt ein Fahrzeug einen Kreisbogen, entsteht eine mit dem Quadrat der Geschwindigkeit ansteigende Querkraft (Zentrifugalkraft), die von den Rädern mittels der Haftreibung übertragen werden muss. Für die am Lenkrad spürbare Rückstellkraft ist die Übertragung der Seitenkraft in der Aufstandsfläche (wegen der elastischen Verformung des Reifens aufgrund der Radlast auch als Reifenlatsch bezeichnet) der Vorderräder von besonderer Bedeutung. Wenn vom Reifen quer zur Fahrtrichtung gerichtete Kräfte übertragen werden, verspannt sich der Reifen vom Beginn der Aufstandsfläche ausgehend solange, bis die quer gerichtete Tangentialspannung durch den durch die Reibungszahl gegebenen Maximalwert begrenzt wird (sog. „Krebsgang“, ◘ Abb. 6.38; Schallamach 1961). Prinzipiell muss also ein Winkel zwischen der Fahrtrichtung des Rades und seiner Rollebene (Rollenrichtung) vorhanden sein, der sog. Schräglaufwinkel, damit überhaupt Kräfte übertragen werden können. Mit zunehmender übertragener Seitenraft S ist dieser Kraftanstieg innerhalb der Aufstandsfläche steiler. Schließlich erreicht die lokale Kraft ggf. einen Wert, der durch die wirksame Reibungszahl begrenzt ist (siehe ◘ Abb. 6.39). Die übertragene Kraft ist in ihrer Größe durch die von dem tatsächlichen tangentialen Spannungsverlauf eingeschlossene Fläche bestimmt, wobei der Ansatzort durch den Schwerpunkt dieser Fläche gegeben ist. Dadurch entsteht ein Hebelarm zwischen diesem Ansatzpunkt der resultierenden Seitenkraft S und dem Ansatzpunkt der Resultierenden der Aufwärtsreaktion der Flächenpressung in der Berührfläche (◘ Abb. 6.40). Er wird als Reifennachlauf n_R bezeichnet. Auf Grund der beschriebenen Reaktionen liegt der Ansatzpunkt der Seitenkraft S – mit Ausnahme des im Ganzen gleitenden Rades – immer so, dass die Seitenkraft ein Moment M_R erzeugt, das den Reifen aus der Schräglauflage in die Fahrtrichtung zu drehen versucht (siehe ◘ Abb. 6.40).

Am Lenkrad ist aber nicht nur das Rückstellmoment, das durch diesen Reifennachlauf der Vorderräder beeinflusst wird, spürbar, sondern dazu noch ein Rückstellmoment, das durch den konstruktiven Nachlauf (sog. „Teewageneffekt“) und andere Pa-

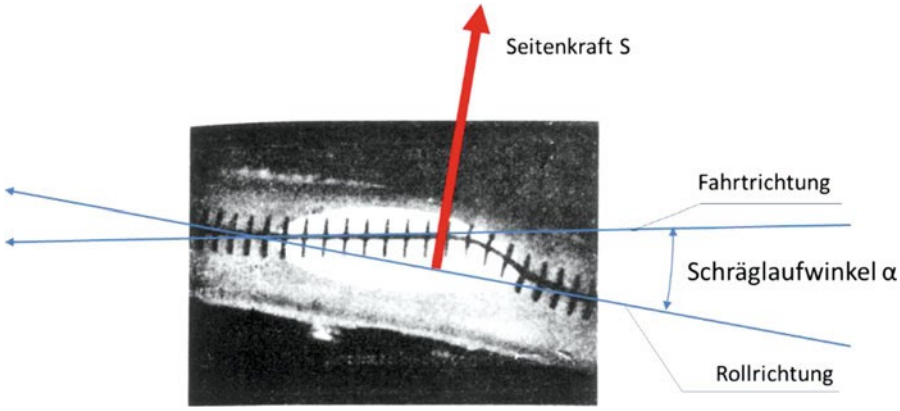


Abb. 6.38 „Krebsgang" eines schräglaufenden Rades (aus Schallamach 1961)

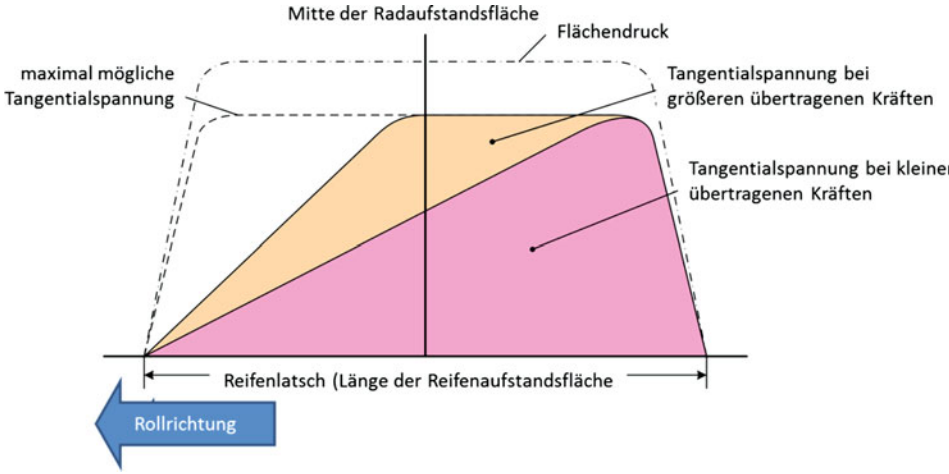


Abb. 6.39 Verlauf der Spannung in der Reifenaufstandsfläche infolge von Seitenkräften (nach Gough 1962)

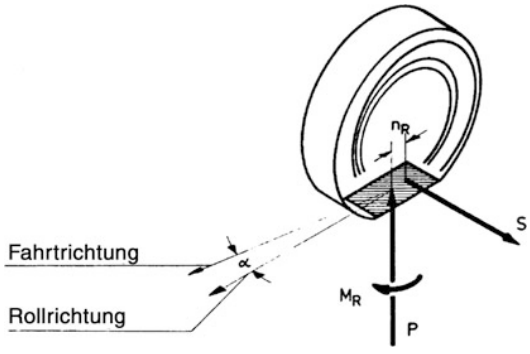


Abb. 6.40 Reaktion der Seitenkraft S und der Radlast P in der Berührfläche

rameter bewirkt wird. Der konstruktive Nachlauf n_K ist der Versatz zwischen der Radachse und der Drehachse, um welche die Vorderräder beim Lenken geschwenkt werden. Er ist im Gegensatz zu dem hier besprochenen Reifennachlauf eine vom Straßenkontakt unabhängige Größe. Aus Abb. 6.41 wird ersichtlich, dass sich der Reifennachlauf n_R mit der Reibungszahl μ ändert (Gengenbach 1968). Die in Abb. 6.39 und 6.41 dargestellten Diagramme geben eine anschauliche Erklärung für die von vielen Autoren vorgenommene Einteilung der Bodenberührungsfläche in Kontaktzone (Adhäsionszone) und Schlupfzone.

Befindet sich Wasser auf der Straßenoberfläche. so muss das beschriebene Modell noch weiter modi-

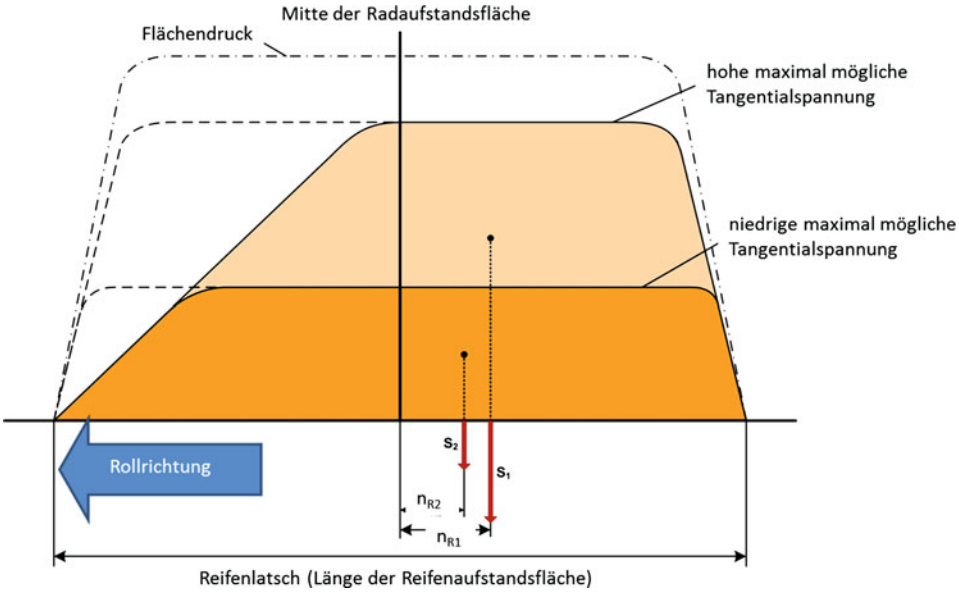


Abb. 6.41 Auswirkung der Verringerung der maximal möglichen Reibung auf den Reifennachlauf n_R (nach Gough 1962 und Gengenbach 1968), S = Seitenkraft, n = Hebelarm des Rückstellmoments. Maximale Ausnutzung eines hohen Reibbeiwerts: Rückstellmoment $M_1 = S_1 \cdot n_{R1}$. Maximale Ausnutzung eines niedrigen Reibbeiwerts: Rückstellmoment $M_2 = S_2 \cdot n_{R2}$. $M_1 > M_2$: Niedriger Reibbeiwert wird durch niedrigeres Reifenrückstellmoment gespürt

fiziert werden. Die Reifenaufstandsfläche kann dann in 3 Zonen aufgeteilt werden (3-Zonentheorie). In der ersten Zone, die sich im vorderen Teil der Reifenaufstandsfläche befindet, der sogenannten Annäherungszone, hat der Reifen keinen Kontakt mit der Fahrbahn. Er wird hier von einem Wasserfilm getragen. Ein Teil des Wassers kann durch Drainagekanäle im Reifenprofil aufgenommen werden. In der zweiten sich anschließenden Zone, der sog. Übergangszone, wird der Wasserfilm von den Stollen des Reifenprofils bzw. von Rauigkeiten der Straßenoberfläche durchbrochen. In der dritten Zone, im hinteren Teil der Reifenaufstandsfläche, ist das Wasser gänzlich verdrängt und es existiert trockener Straßenkontakt. Hier herrschen dann ähnliche Verhältnisse wie in der zuvor beschriebenen Zweizonentheorie für Reibung von Luftreifen auf trockener Straße (siehe Abb. 6.42).

Durch den Einfluss der Annäherungszone, in deren Bereich wegen der geringen möglichen Reibungskräfte nahezu keine Tangentialspannungen auftreten, beginnt die Verspannung des Reifens praktisch erst in der dritten Zone trockenen Straßenkontaktes. Bei höheren Geschwindigkeiten wird dieser Beginn der Verspannung noch weiter in den hinteren Teil der Aufstandszone verschoben. Dadurch ergibt sich für die Größe des Reifennachlaufs n_R eine sehr komplizierte Abhängigkeit vom maximalen Reibungsbeiwert, Wasserhöhe und Geschwindigkeit (Gengenbach 1968). Weber und Persch (1975) weisen darauf hin, dass das bisher besprochene Reifenverhalten nur im stationären Fall gilt. Im instationären Betrieb, also dann, wenn beispielsweise innerhalb einer gewissen Zeit der Einschlagwinkel der Vorderräder variiert wird und damit der erzwungene Schräglaufwinkel der Räder zeitlich geändert wird, zeigen sich charakteristische hystereseartige Verschiebungen der genannten Zusammenhänge.

Es entsteht also am Lenkrad ein Rückstellmoment, das vom Lenkwinkel, der Geschwindigkeit und dem Reibbeiwert abhängt, das in mehrfacher Hinsicht nichtlinear mit den Einfluss nehmenden Größen verbunden ist. Nur nach sehr viel Erfahrung, die auch ein häufiges Fahren im sog. Grenzbereich bei unterschiedlichen Straßenbedingungen und Straßenzuständen voraussetzt, wobei durchaus auch öfters die Grenze zur Instabilität überschritten werden müsste, dürfte es möglich sein, ein Gefühl

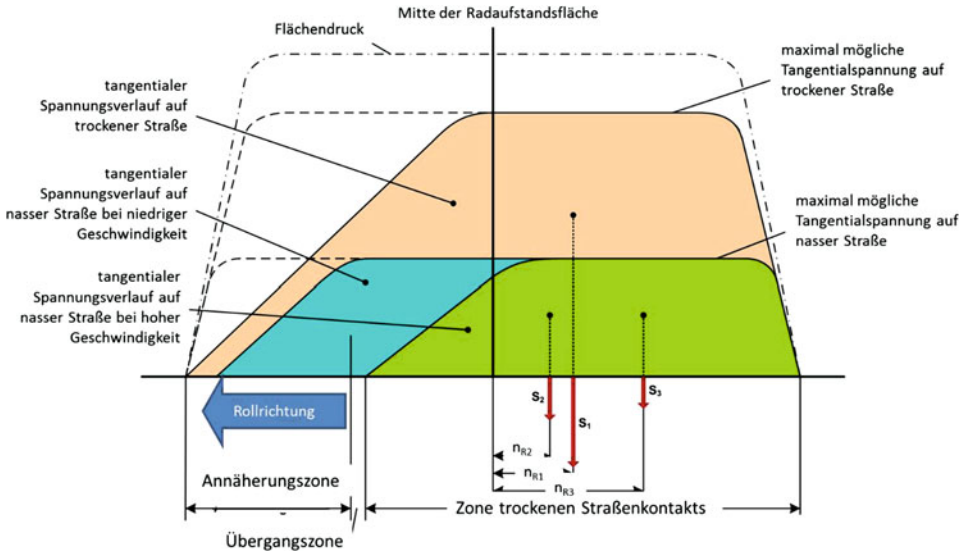


Abb. 6.42 Transversaler Spannungsverlauf auf nasser und trockener Straße (Bubb 1975). Ausnutzung des Reibbeiwerts bei trockener Straße: Rückstellmoment $M_1 = S_1 \cdot n_{R1}$. Ausnutzung des Reibbeiwerts bei nasser Straße und niedriger Geschwindigkeit: Rückstellmoment $M_2 = S_2 \cdot n_{R2}$. Ausnutzung des Reibbeiwerts bei nasser Straße und hoher Geschwindigkeit: Rückstellmoment $M_3 = S_3 \cdot n_{R3}$. $M_1 > M_3 > M_2$: Nasse Straße und hohe Geschwindigkeit suggeriert vor dem Aufschwimmen unter Umständen besseren Straßenkontakt als nasse Straße und niedrige Geschwindigkeit

für diesen komplexen Zusammenhang aufzubauen. Für professionelle Ralleyfahrer oder geschulte Versuchsfahrer in Automobilwerken mag diese Voraussetzung gelten. Bei den meisten, auf Grund langjähriger unfallfreier Fahrpraxis als erfahren anzusehenden Fahrern dürfte jedoch, gerade weil sie den Übergang zum instabilen Fahrzustand normalerweise meiden, eine sehr viel einfachere Erfahrung gespeichert sein:

» *Wenn beim Drehen des Lenkrades nach anfänglichem Zunehmen das Rückstellmoment plötzlich geringer wird, ist die Straße glatt oder rutschig*

Nach der obigen Erklärung des Zustandekommens des Rückstellmoments tritt dieser Fall ein, wenn praktisch in der gesamten Reifenaufstandsfläche die maximal mögliche Querspannung überschritten ist. Die Erfahrung beinhaltet aber keinerlei Warnung im Vorfeld des Eintretens dieses Zustands. Das Lenkradrückstellmoment liefert also keine ausreichende und Sicherheit gewährleistende Information über den Straßenzustand.

Donges (1982) weist darauf hin, dass heutige Fahrzeugauslegungen zwar für Extremmanöver einen großen Spielraum lassen, weil im „normalen" Straßenverkehr maximal 40–50 % der objektiv vorhandenen Reserven wirklich genutzt werden. Diese Reserven werden durch den Kammschen Kreis beschrieben, wobei angenommen wird, dass die maximal durch Reibung übertragbare Kraft in Längs- und Querrichtung gleich ist. Wie Braess und Donges (2006) aber zeigen, werden unter ungünstigen Straßenverhältnissen diese Grenzen dennoch überschritten (Abb. 6.43). Bedingt durch die mechanischen Zusammenhänge sind die Rückmeldungen für den Fahrer in diesen fahrdynamischen Extrembereichen nichtlinear. So steigt beispielsweise bei Kreisfahrt mit konstantem Kurvenradius (sog. stationäre Kreisfahrt) der notwendige Lenkradwinkel bei fast allen Fahrzeugen mit zunehmender Querbeschleunigung (hier erreicht durch zunehmende Geschwindigkeit) zunächst linear an, erhöht sich dann aber überproportional im Grenzbereich. Das Lenkradrückstellmoment steigt zunächst ebenfalls quasilinear an, im Grenzbereich ist das Verhalten dann aber umgekehrt zum Lenkradwinkel (s. o.). Der Fahrer ist somit bei dem Versuch, aus dem linearen Erfahrungsbereich in den Grenzbereich zu extrapolieren, überfordert.

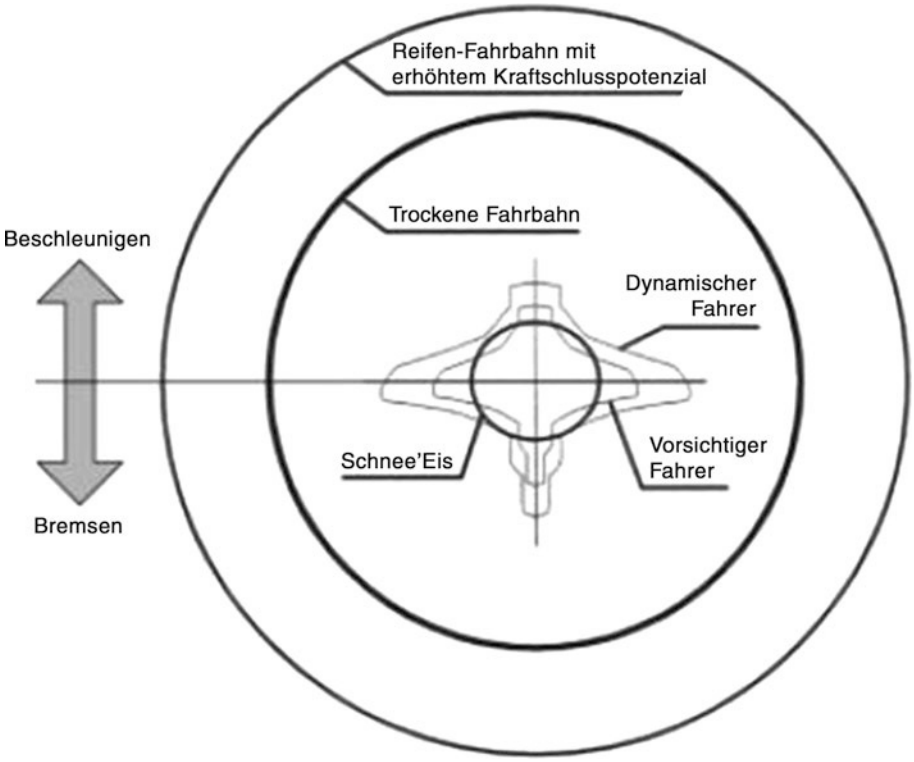


Abb. 6.43 Nutzung des Kraftschlusspotenzials von Normalfahrern auf unterschiedlich haftenden Untergründen anhand des Kammschen Kreises (nicht maßstabsgerecht) (Braess und Donges 2006)

Reifen – auch die an der nicht gelenkten Hinterachse – müssen beim Übertragen von Querkräften aufgrund der beschriebenen Zusammenhänge prinzipiell in einem Winkel zur Fahrtrichtung laufen. Dieser Winkel wird Schräglaufwinkel genannt. Wenn dieser Schräglaufwinkel an der Vorder- und Hinterachse gleich ist, liegt sog. *neutrales Fahrverhalten* vor. Ist dieser an der Vorderachse größer als an der Hinterachse, muss das Fahrzeug praktisch stärker in die Kurve gezwungen werden. Man nennt dies *Untersteuern*. Umgekehrt ist es, wenn die Schräglaufwinkel an der Hinterachse größer sind. Dann reagiert das Fahrzeug quasi „übereifrig" auf dem Lenkeinschlag. Man spricht von *Übersteuern*.

6.4.1.2 Das Lenkgefühl im engeren Sinne

Lenkungen werden heute in allen Firmen auf der Grundlage von Expertenurteilen durch Testfahrer optimiert. Es haben sich dabei Bewertungsskalen etabliert, die eine Kategorisierung der subjektiven Testfahrerurteile in einer 10er-Skala vorsehen (1 = Sicherheitsrisiko, 10 = herausragend). Das Entwicklungsziel wird üblicherweise als erreicht bezeichnet, wenn die Bewertung „8" vergeben wird. Zusätzlich zu dieser Bewertung wird von den Testfahrern eine Aussage zur Begründung für eine mögliche Abweichung von einer optimalen Beurteilung gemacht. Im Allgemeinen werden Beurteilungen zu folgenden Kriterien durchgeführt (zitiert nach Pfeffer 2013):

- *Lenkmomentniveau beim Parkieren* (Ziel: niedriges Kraftniveau für den Fahrer),
- *Lenkmomentverlauf beim Parkieren* (Ziel: Vermeiden oszillierender Verläufe über den gesamten Lenkradwinkelbereich),
- *Lenkmomentverlauf um die Mitte* (Ziel: fahrgeschwindigkeitsabhängige Rückstellkräfte),
- *Mittengefühl – Zentrierung* (Ziel: vollständige Rückstellung des Lenkrads bei kleinen Lenkradwinkeleingaben bei Geradeausfahrt),

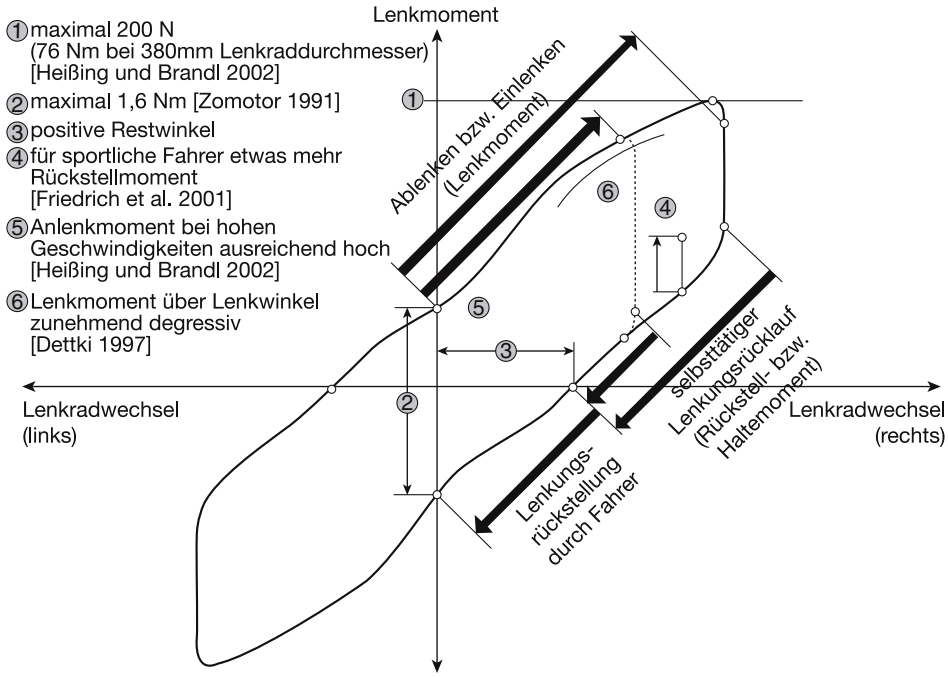


Abb. 6.44 Empfohlene optimale Werte für den Verlauf des Lenkmoments über dem Lenkwinkel (aus Wolf 2009)

- *Lenkradmomentsverlauf – Anlenken* (Ziel: moderater aber stetiger Anstieg des Lenkradmoments in Abhängigkeit von der Querbeschleunigung bis in den Vorwarn- und Grenzbereich),
- *Lenkradmoment bei Kurvenfahrt* (Ziel: in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit und Querbeschleunigung konstantes Lenkradmoment bei stationärer Kurvenfahrt mit gut spürbarem Haltepunkt).

Bei alledem muss gesichert sein, dass das Expertenurteil mit ausreichender Genauigkeit mit dem Urteil der Kunden übereinstimmt. In einer experimentellen Beobachtung von Wolf (2009) wurde hierzu ein interessanter Beitrag geleistet: Danach kann auch der „Normalfahrer" relativ exakt die charakteristischen Lenkeigenschaften von Fahrzeugen verbal differenziert beschreiben, wobei sich der Gebrauch bestimmter Wörter vom verwendeten Sprachgebrauch der Presse nicht wesentlich unterscheidet. Von besonderem Interesse ist dabei, dass kein Unterschied im Sprachgebrauch zwischen Lesern und Nichtlesern von Motorpresse beobachtet werden konnte.

Wolf hat sich generell sehr ausführlich mit dem Lenkgefühl aus ergonomischer Sicht auseinandergesetzt, um u. a. auch im Vorfeld einer Prototypenbeurteilung bereits relevante menschliche Urteile berücksichtigende Auslegungsaussagen machen zu können[40]. Er unterscheidet zwischen dem Lenkgefühl im engeren Sinne (Hand-Arm-System – Lenkrad) und im weiteren Sinne (gesamter Regelkreis Fahrer – Fahrzeug in Verbindung mit der die Vorgaben der Führungsaufgabe zu erfüllenden Stabilisierungsaufgabe). Das Lenkgefühl im engeren Sinne bezieht sich auf Untersuchungen, die aus rein technischer Sicht Voraussetzungen für eine „gute" Lenkung sind. Wolf stellt dazu aus der Literatur Empfehlungen zum Verlauf des Lenkmoments über dem Lenkwinkel sowie über der Querbeschleunigung zusammen (Abb. 6.44 und 6.45). Wie er zu Recht bemerkt, müsste man dabei eigentlich die Lenkkraft zitieren, da das gleiche Rückstellmoment in Abhängigkeit vom Lenkrad-

40 Die ausführlichen Zusammenstellungen von Wolf (2009) können hier nur in sehr verkürzter Form wiedergegeben werden.

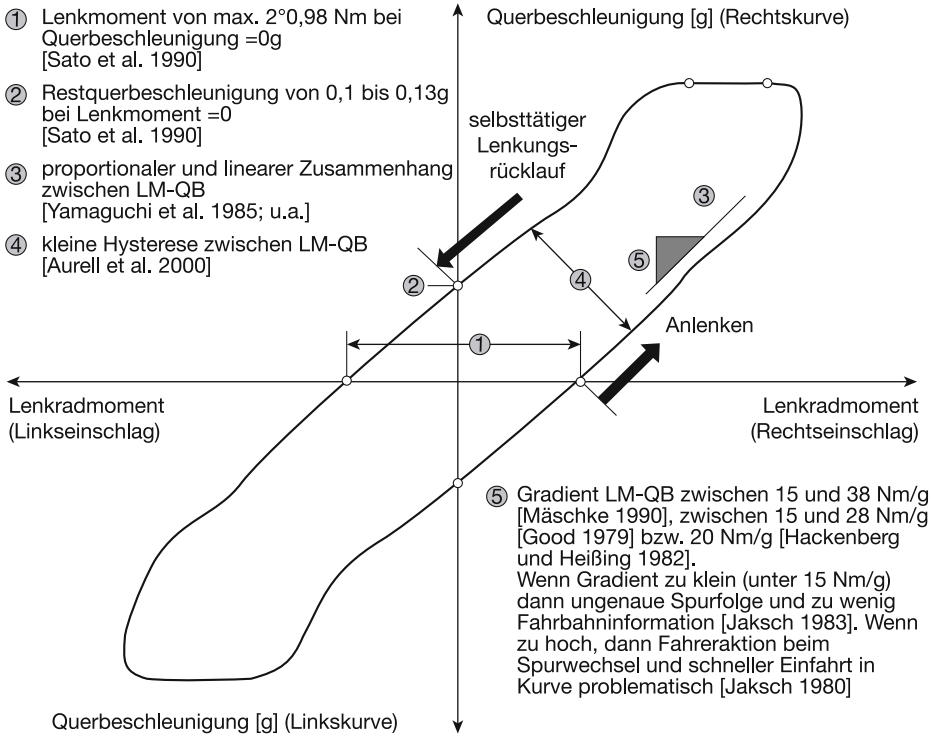


Abb. 6.45 Empfohlene optimale Werte für den Verlauf der Querbeschleunigung über dem Lenkmoment (quasi-stationär)

durchmesser unterschiedliche vom Fahrer aufzubringende und damit spürbare Kräfte notwendig macht. Aus technischer Sicht hat sich dennoch die Darstellung des Moments durchgesetzt. Die im Folgenden gemachten Angaben beziehen sich folglich auf die heute üblichen Lenkraddurchmesser zwischen 320 und 410 mm. In Verbindung mit der Lenkungsübersetzung und dem Radstand (siehe auch Gl. 2.17) ergeben sich dadurch beachtliche Unterschiede. Wolf beobachtet bei einem Lenkweg am Lenkradkranz von 50 mm einen Kurvenradius zwischen 117,80 m (Opel Speedster) und 226,87 m (Rolls-Royce Pantom). Im Mittel beträgt bei heute gängigen Pkw der entsprechende Wert 163 m bei einer Standardabweichung von ± 16,8 m. Die kleinen Werte repräsentieren dabei im Wesentlichen die sportlichen Fahrzeuge, die großen Limousinen und SUVs.

Von besonderer Bedeutung für die Fahrsicherheit ist der Verlauf des ***Lenkradmoments im Grenzbereich***, worauf die Ausführungen zum Fahrbahnkontakt in ► Abschn. 6.4.1.1 bereits hingewiesen haben. Zwei diametral unterschiedliche Auffassungen stehen hier im Widerstreit: Bielaczek (1998) schätzt ebenso wie Heißing und Brandl (2002) die Akzeptanz für eine früh weich werdende Lenkung als sehr hoch ein. Im Gegensatz dazu wird von Webhofer (1991) und Bubb (1985) berichtet, dass ein im Grenzbereich steif werdendes Lenkmoment am besten als Annäherung an eine Grenze beurteilt wird. Von Bubb und Bolte (1987) werden diese unterschiedlichen Ergebnisse dahingehend interpretiert, dass viele Fahrer die Nichtlinearitäten im Grenzbereich noch nicht erlebt haben und deswegen keine zuverlässige Aussage zum Verhalten des Lenkmoments dort machen können. Auch Huang (2004) argumentiert, dass eine weich werdende Lenkung für die meisten Fahrer am besten geeignet ist, weil dieser Lenkmomentverlauf den heutigen Fahrzeugen entspricht. Eine steif werdende Lenkung bedeutet demgegenüber für den Fahrer eine Barriere, die er nicht überschreiten darf, gegen die er aber u. U. besonders stark „ankämpft". Dies hätte zur Folge, dass er in einer kritischen Situation

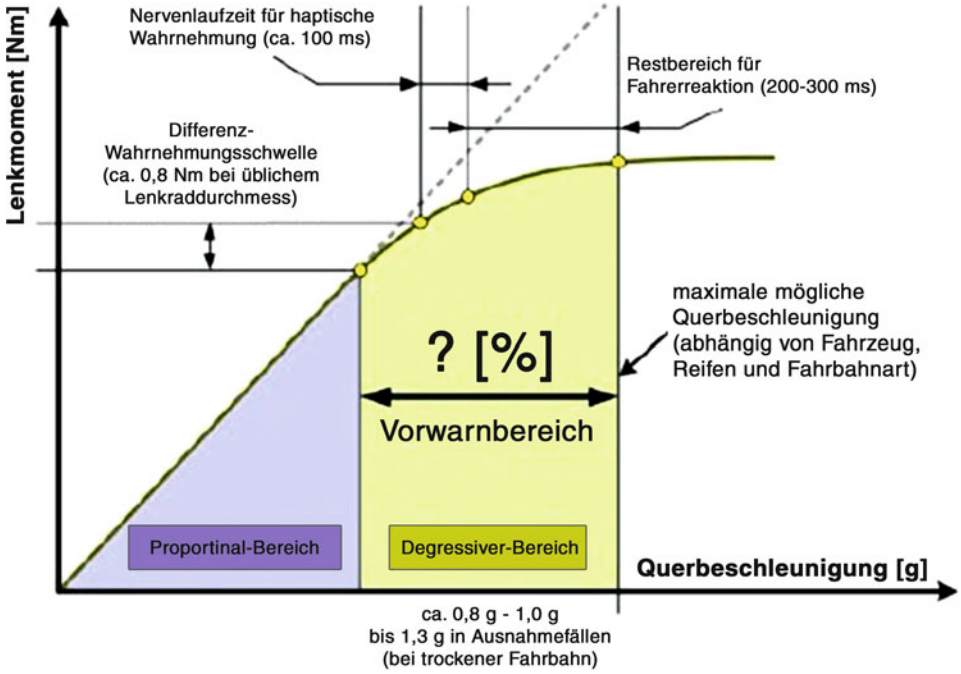


Abb. 6.46 Grundsätzlicher und qualitativer Verlauf des Lenkmoments über der Querbeschleunigung mit degressivem Vorwarnbereich (Wolf 2009)

hart an dieser Grenze bleibt und ggf. die physikalischen Grenzen überschreitet, anstatt sich von dieser Grenze zu entfernen. Aus alledem zieht Wolf (2009) den Schluss, dass bei heutiger Auslegung ein Vorwarnbereich vorhanden sein sollte, in dem durch eine degressive Lenkmomentzunahme mit der Querbeschleunigung auf die bevorstehende Systemgrenze hingewiesen wird (siehe Abb. 6.46). Wenn allerdings in Zukunft durch entsprechende Sensoren in den Reifen die Annäherung an den Grenzbereich aktuell gemessenen werden könnte, so sollte nach Huang (2004) der Fahrer durch geeignete akustische und optische Mittel (insbesondere HUD) auf diesen Zustand adäquat hingewiesen werden.

Viskose Dämpfung begrenzt die maximal mögliche Lenkwinkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung. Allerdings liegen dazu nur ganz wenige Untersuchungsergebnisse vor. Nach Poulton (1974) wirkt viskose Dämpfung bei Schwingungseinwirkungen gegen unbeabsichtigte Stellteilbewegungen seitens des Menschen besser als statische Reibung oder eine Massenerhöhung des Bedienelements. Rühmann (1993) zeigt, dass die Kombination von viskoser Dämpfung und Federrückstellung (diese wird durch die Lenkungsauslegung von selbst bereitgestellt) die besten Resultate in Bezug auf die Regelleistung bringt.

Mechanisches Spiel ist dadurch charakterisiert, dass eine Winkeländerung innerhalb des Spiels am Lenkrad keine Richtungsänderung des Fahrzeugs zur Folge hat. Mechanisches Spiel verschlechtert die Regelleistung ebenso (Rühmann 1993). Heutige PKW-Lenkungen gelten in der Regel als spielfrei.

Die ***tote Zone***, hier als Lenkmomenttotzone bezeichnet, entspricht dem mechanischen Spiel um die Nulllage (Rühmann 1993). Die Nullpunktlage ist dadurch nicht mehr genau fühlbar und verschlechtert somit die Regelleistung (Rühmann 1993). Grundsätzlich sollte die tote Zone bei Kraftfahrzeuglenkungsauslegungen vermieden werden (siehe hierzu die Bemerkungen zum Center-Point-Feeling, Abb. 6.47).

Coulombsche Reibung hat in Abhängigkeit von Art und Stärke sowohl negative wie positive Auswirkungen (Harrer 2013). Nach den Erkenntnissen der Ergonomie des Mensch-Maschine-Systems bewirkt Coulombsche Reibung zwar eine Verschlech-

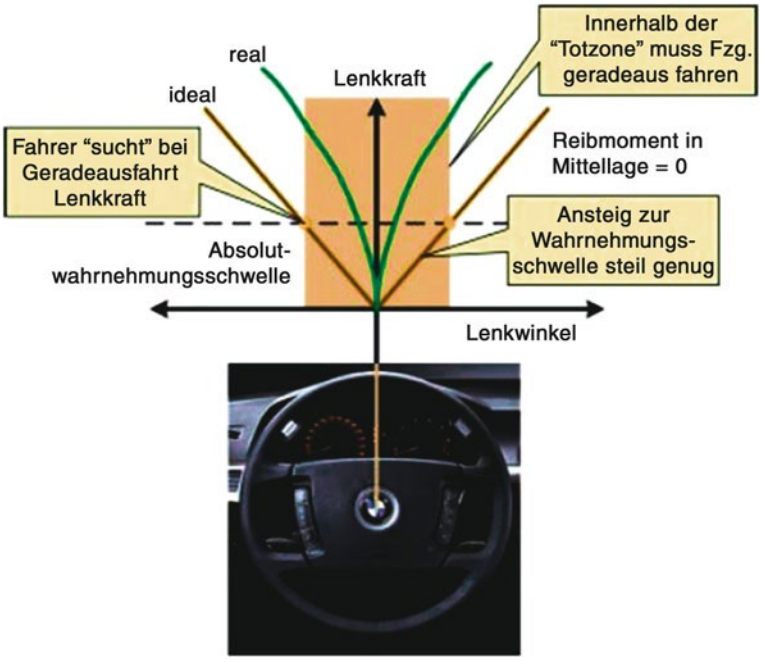


Abb. 6.47 Auslegung des Center-point-feelings nach Vorschlägen von Wolf (2009)

terung der Regelleistung. Insbesondere behindert sie die exakte Dosierung der Lenkbewegung gerade im Bereich um die Mittellage. Zudem sollte ein Losbrechen bzw. Kleben der Lenkung, bedingt durch zu hohe Haftreibung beim Anlenken aus der Mitte, vermieden werden. Reibung führt aber auch zu einem Hystereseverhalten des Lenkradmoments über dem Lenkwinkel (siehe auch Abb. 6.44). Nach Harrer (2013) ist dieses Hystereseverhalten für eine präzise Kurvenfahrt unerlässlich, da es zu einem Arbeitspunkt mit merklichem Lenkmomentanstieg beim Vergrößern des Lenkradeinschlages und deutlicher Lenkmomentreduzierung beim Zurücknehmen des eingeschlagenen Lenkwinkels führt. Außerdem kann ein hoher Reibungskoeffizient auch zur Unterdrückung von Störinformationen wie Stöße und periodischer Anregungen durch Radunwuchten, Bremskraftschwankungen u. ä. beitragen.

Eine wesentliche Rolle für ein gutes Lenkgefühl spielt nach der Überzeugung der meisten Autoren (u. a. Wolf 2009; Harrer 2013) das sog. ***Center-point-feeling***, also die fühlbare Lenkungsmittenlage. Das Lenken um die Mittenlage wird als On-Center-Handling bezeichnet, wobei auch geringe Winkeländerungen um die Mittenlage dazu zählen sind. Das Center-point-feeling ist deswegen so bedeutungsvoll, weil sich der Normalfahrer die meiste Zeit im On-Center-Bereich befindet (Harrer 2006) und weil so der Fahrer seine Regelaufgabe besser erfüllen kann (Buschardt 2003). Allerdings ist das grundsätzliche Problem dabei, dass dem Fahrer bei einer idealen Geradeausfahrt, d. h. einer Geradeausfahrt ohne Störung aus der Umwelt, wie unebene Fahrbahn oder Seitenwind, die haptische Rückmeldung über die Lenkung fehlt. Unter diesen Umständen sieht sich der Fahrer quasi gezwungen, eine solche Rückmeldung zu „suchen". Auch die Versuchsergebnisse des SANTOS-Projektes wiesen darauf hin, dass eine Spurhaltungsunterstützungsauslegung bevorzugt wurde, die ein leichtes Gegenmoment schon bei normaler Fahrt in der subjektiven Fahrzeugspurmitte erzeugte (König et al. 2000). Wolf (2009) zieht aus diesen Ergebnissen folgende Empfehlung, die er durch die rote Linie („ideal") in Abb. 6.47 illustriert:

„Der Fahrer würde bei Geradeausfahrt … nach einer Seite eine Lenkkraft suchen. Dazu muss zunächst die Absolutwahrnehmungsschwelle überschritten werden. Die ‚Suche' der Lenkkraft erfolgt über eine Änderung des Lenkwinkels. Das Fahrzeug sollte infolge der Erwartung an den Gera-

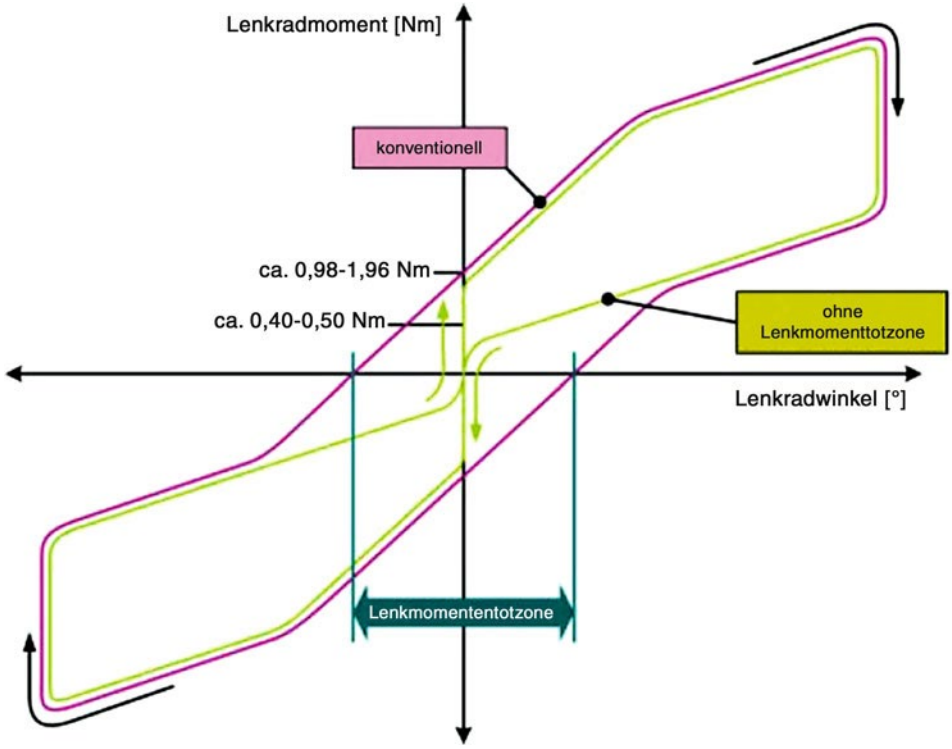


Abb. 6.48 Prinzip einer fühlbaren Lenkungsmittenlage ohne Lenkradmomententotzone (aus Wolf 2009)

deauslauf durch den Fahrer trotz einer Lenkwinkeländerung noch geradeaus fahren. Dem steht allerdings das Ziel entgegen, eine möglichst spielfreie und steife Lenkung zu entwickeln. Folglich muss der Anstieg bis zu einer fühlbaren Lenkkraft steil genug sein, damit nicht zu viel Lenkwinkel seitens des Fahrers aufgebracht wird (siehe auch Kushiro et al. 2008)".

Ein weiterer Vorschlag Wolfs (2009) sieht ein situationsabhängiges Center-point-feeling vor, das den Nachteil der nun doch wieder vorhandenen toten Zone des ersten Vorschlags kompensieren könnte. Der Vorschlag wird durch Abb. 6.48 (grüne Linie) illustriert. Es werden dabei die Versuchsergebnisse von Sato et al. (1990) übernommen, wonach das Lenkmoment beim Anlenken zwischen 0,98 und 1,96 Nm liegen sollte. Eine sichere Lenkmomentwahrnehmung wird gemäß Buschardt (2003) bei einem Wert von 0,8 Newtonmeter erreicht. Wolf bezweifelt allerdings, dass eine solche Auslegung unter allen Bedingungen opportun ist. Er führt aus, dass eine solche Ausführung womöglich – gesteuert durch entsprechende Sensorik – speziell bei Baustellenfahrten, starker Sichteinschränkungen (z. B. starker Regen, Nebel) und Nachtfahrt mit Abblendlicht sinnvoll ist, während für Stadtfahrten, kurvenreiche Landstraßenfahrten oder gar Geländefahrten wohl eher eine konventionelle Auslegung zu bevorzugen ist.

Aus der Beschreibung der Interaktion des Hand-Arm-Systems des Fahrers mit dem Lenkrad mit Hilfe von Fahrermodellen ist nach den Recherchen von Wolf wenig Nutzen für eine hinreichende Interpretation des Lenkgefühls zu ziehen. Überhaupt stellt er zusammenfassend fest, dass wissenschaftliche Arbeiten, die eine Korrelation zwischen objektiv messbaren Kenngrößen und subjektiven Beurteilungen des Lenkverhaltens zum Gegenstand haben, häufig nur schwache oder gar keine Zusammenhänge zeigen. Stärkere Korrelationen wurden nur für die ***zeitlichen Aspekte*** der Wahrnehmung gefunden. In diesem Zusammenhang spielt das in ▶ Abschn. 3.3.1 dargestellte Erleben der Zeit eine wesentliche Rolle. Wolf hat auf der

Grundlage der Arbeiten von Pöppel (2000) und Vaas (2005) eine Zusammenstellung der Eindrücke auf die verschiedenen Sinnesorgane beim Lenken gemacht, die in ◘ Abb. 6.49 wiedergegeben ist. Danach ist es in einem Zeitfenster von 30–40 ms praktisch nicht möglich, zeitlich versetzte Signale voneinander zu unterscheiden bzw. deren Reihenfolge wahrzunehmen (Zone I und II). Manche Untersuchungen zum Fahrzeughandling legen außerdem nahe, dass es eine untere Grenze von 40–60 ms für die Fahrzeugreaktion gibt (Fujinami et al. 1995), unterhalb derer die Reaktion als „zu heftig und schnell" empfunden würde (Zeitzone III). Reaktionen im Bereich zwischen 60 und 150 ms können chronologisch korrekt zugeordnet werden, sind aber so zeitnah an der Eingabe, dass sie als „sofort" erlebt werden. Sie sind der ideale Bereich für das Erleben der Reaktion von Gierwinkel- und Querbeschleunigung auf eine Lenkradbewegung hin (Zone IV). Alles was deutlich über 150 ms liegt, würde als „stark verzögert" bis hin zu „nicht mehr damit im Zusammenhang stehend" erlebt werden (Zone V und VI). Voraussetzung dafür, dass solche Reaktionen wahrgenommen werden, ist in jedem Fall, dass die Wahrnehmungsschwellen bzw. Unterschiedsschwellen für die einzelnen Sinneswahrnehmungen überschritten werden (siehe hierzu ▶ Abschn. 3.2.1).

6.4.1.3 Das Lenkgefühl im weiteren Sinne

Das Lenkgefühl im weiteren Sinne bezieht die Fahraufgabe mit ein. Es kommen damit alle Aspekte in Betracht, die in ▶ Kap. 3 ausführlich dargestellt wurden. Speziell ist hierbei noch einmal auf die Bedeutung der inneren Modelle hinzuweisen. Ein „gutes" Lenkgefühl wird erreicht, wenn die durch innere Modelle gegebene Erwartung durch die tatsächliche Wahrnehmung erfüllt wird. Damit kommt aber auch die in ▶ Abschn. 3.3.4 angesprochene Orthogonalität zwischen „Komfort = Gefallen" und „Diskomfort = Erleiden" zum Tragen. Durch Beachtung ergonomischer Regeln können zwar weitgehend unangenehme Sensationen am Lenkrad (zum Beispiel Vibration, Stöße, ungleichmäßige Aufbau der Rückstellkraft) beseitigt werden, unabhängig davon werden aber Nutzer, basierend auf ihren Erwartungen, durchaus unterschiedliche Auslegungen bevorzugen. So hat Wolf (2009) im Straßenversuch beispielsweise eruiert, welche Vorstellungen „Normalfahrer" bezüglich der Lenkungseigenschaften von verschiedenen Fahrzeugen haben, wie sie das Lenkverhalten beurteilen und ob signifikante Unterschiede zu sog. Testfahrern bestehen. Kurz zusammengefasst zeigen sich folgende Ergebnisse:

- Aufgrund des äußeren Erscheinungsbildes werden den Fahrzeugen bestimmte Fahr-/Lenkeigenschaften zugeordnet (ein Roadster löst z. B. die Erwartung einer besonders zielgenauen, direkten Lenkung aus).
- Es konnte eine „Landkarte" erstellt werden, welche den Einfluss von technischen Eigenschaften auf die subjektiven Bewertungen der Probanden wiedergibt (◘ Abb. 6.50).
- Bei Kriterien wie Geradeauslauf, Korrekturaufwand, Ansprechverhalten und Zielgenauigkeit zeigt sich eine hohe Übereinstimmung zwischen Kunden- und Expertenurteilen; akzeptabel sind sie für die Kriterien Stößigkeit, Rückstellverhalten, Lenkkraftverlauf und Lenkkraftniveau, sehr schlecht ist die Übereinstimmung bei Mittengefühl und Rückmeldung.

Die inneren Modelle in Verbindung mit den Zeitkonstanten des Menschen (s. o.) sowie verschiedenen regelungstechnischen Ansätzen liefern eine vertiefte Einsicht in das Entstehen von Lenkgefühl im weiteren Sinne. In besonderem Maße kommt hier den Bildverschiebungsvektoren aus Fahrersicht bei Kurvenfahrt Bedeutung zu, die bereits in ▶ Abschn. 3.2.2.2 angesprochen worden sind.

Remlinger (2013) hat die dynamischen Wahrnehmungsgrenzen bei Kurvenfahrt berechnet. Er hat dabei berücksichtigt, dass das menschliche Auge Verschiebungsvektoren unter 2′/s nicht mehr als „bewegt" zu erkennen vermag und andererseits Verschiebungsvektoren über 20°/s zu einem verschwommenen, unscharfen Bildeindruck führen. ◘ Abbildung 6.51 gibt den vom Fahrer wahrnehmbaren optischen Fluss in Draufsicht wieder. Die Position des Fahrzeugs befindet sich an der Stelle x = y = 0. Die Berechnung zeigt eine gebogene Linie optischer Ruhe, die sich links von der als Beispiel dienenden Linkskurve befindet. Durch die Falschfarbendarstellung wird die zunehmende optische Flussgeschwin-

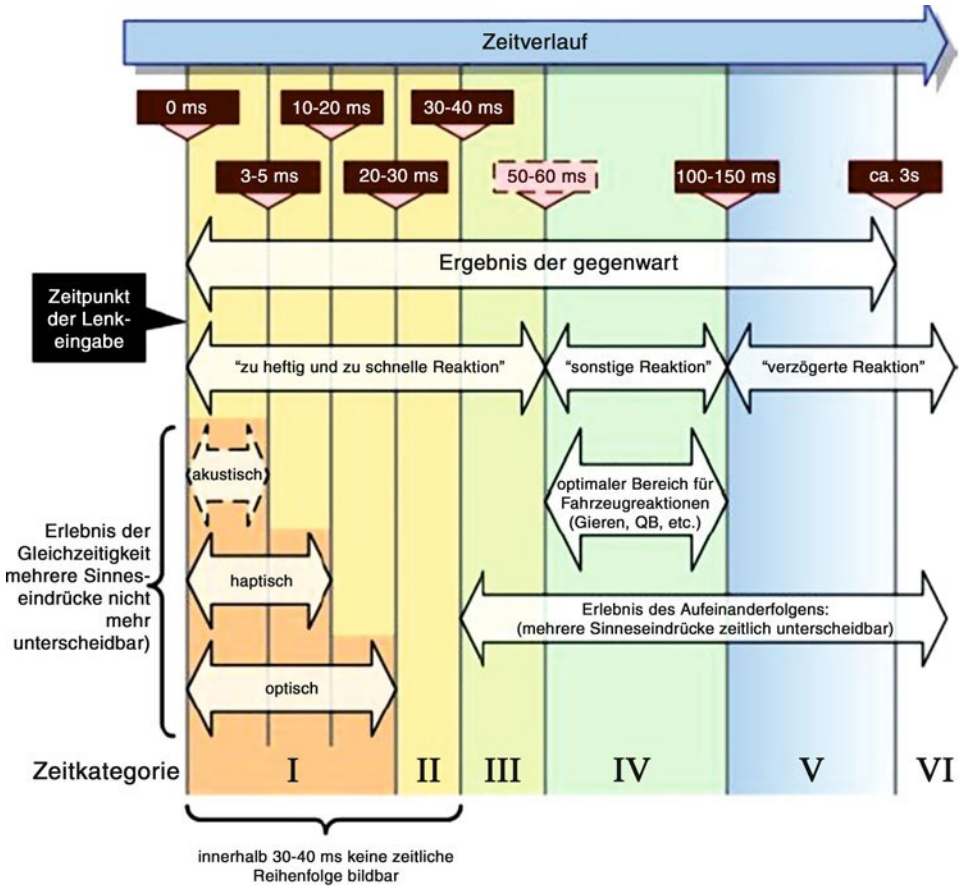


Abb. 6.49 Zeitliches Erleben von Sinneseindrücken zusammengestellt von Wolf (2009) auf der Basis der Veröffentlichungen von Vaas (2005) und Pöppel (2000)

digkeit ausgehend von der Zone der Ruhe dargestellt. Sie steigert sich (wiedergegeben durch den Übergang von Rot über Gelb nach Grün) bis in den Bereich, in dem die Flussgeschwindigkeit für ein scharfes Sehen zu hoch ist. Dieser Bereich, der sich links und rechts vom Fahrzeug befindet, ist dunkelrot wiedergegeben. Im Vergleich zu einer Geradeausfahrt, wo das Zentrum des optischen Flusses und der Schnittpunkt der Straßenbegrenzungen übereinstimmen, ergibt sich also hier ein deutlicher nach links orientierter Offset zwischen der wahrgenommenen Orientierung der Bahnkurve und dem Zentrum des optischen Flusses.

Abbildung 6.52 zeigt eine entsprechende Darstellung für Geschwindigkeiten von 120 und 150 km/h. Es wird daran deutlich, dass das angesprochene Offset mit zunehmender Querbeschleunigung größer wird. Außerdem ist aus der Abbildung ersichtlich, wie mit zunehmender Geschwindigkeit ein „Tunnelblick" entsteht, da nun die Zone der Unschärfe links und rechts vom Fahrer immer größer wird. Die Darstellungen können hinsichtlich des Lenkgefühls erklären, durch welche Stimuli der Fahrer ***untersteuerndes, neutrales und übersteuerndes Fahrzeugverhalten*** unterscheiden kann. Denn bei gleicher Geschwindigkeit und Kurvenradius, also damit gleicher Querbeschleunigung, lassen sich diese Unterschiede nicht über das kinästhetische Empfinden wahrnehmen (trotz der immer wieder behaupteten Existenz des „Popometers"). Vielmehr ist dies nur über die optische Wahrnehmung, welche natürlich mit dem kinästhetischen und haptischen Empfinden gekoppelt ist, möglich: bei übersteuerndem Fahrzeug ist die wahrgenommene Fahrzeuglängsachse mehr zu dem Bereich

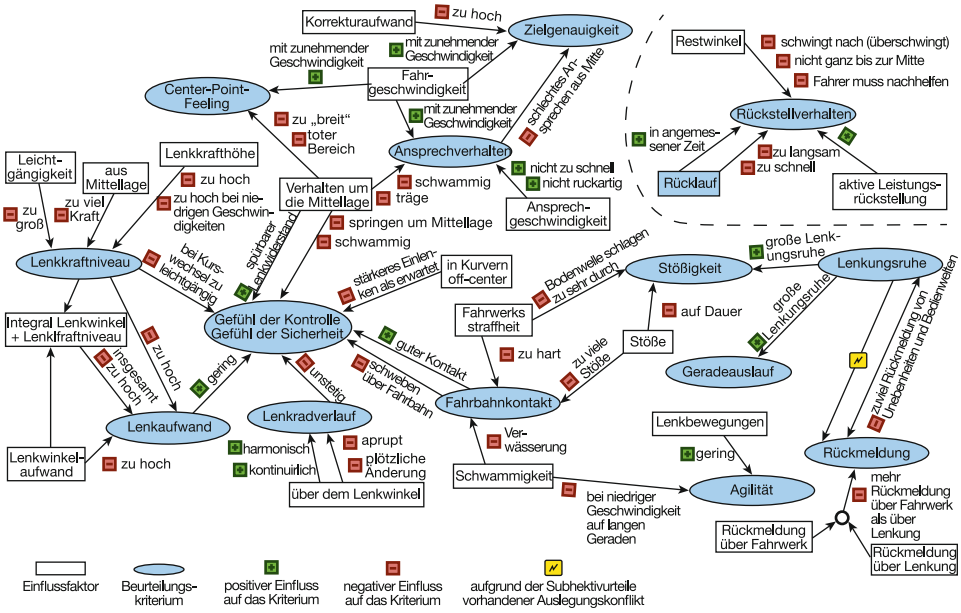


Abb. 6.50 Einflüsse auf das Lenkgefühl auf Basis von definierten Kriterien und Kundenurteilen (Wolf 2009; nur für Fahrzeuge mit Hinterradantrieb gültig)

der optischen Ruhe ausgerichtet, während bei untersteuerndem Fahrzeug diese mehr in Richtung der wahrgenommenen Kurve orientiert ist.[41]

Ein weiterer wesentlich das Lenkgefühl beeinflussender Parameter ist die ***Lenkübersetzung***. Wie bereits unter ▶ Abschn. 6.4.1.2 erwähnt, spielt hierfür der am Lenkradkranz notwendige Weg in Relation zu dem dadurch eingestellten Kurvenradius die für den Fahrer fühlbare Rolle. Für sportliche Fahrzeuges sieht man dazu einen wesentlich kleineren Wert (so genannte direkte Lenkung) als für luxuriöse Komfortlimousinen (indirekte Lenkung) vor. Wie bereits in ▶ Abschn. 2.4.1 dargelegt wird, verbessert eine geschwindigkeitsabhängige Lenkübersetzung, welche bei einer niedrigen Geschwindigkeit eine direkte und bei höherer Geschwindigkeit eine indirekte Übersetzung vorsieht, das Lenkgefühl erheblich. Mittels verschiedener Varianten der sog. Überlagerungslenkung ist dies elektronisch gesteuert ohne weiteres technisch realisierbar (Reuter und Saal 2013). Aus ergonomischer Sicht sollte die Lenkungsübersetzung dabei so gewählt werden, dass – wie in ◘ Abb. 2.20 dargestellt – mit dem Lenkrad auf einen im 2-Sekunden-Abstand befindlichen Bezugspunkt gezielt wird. Remlinger (2013) berechnet dafür den Vorausschauwinkel δ nach der Formel:

$$\partial = 90° \cdot \frac{a_y \cdot t_v}{\pi \cdot v}$$

mit:

a_y= Querbeschleunigung, t_v= Voraussichtzeit, v= Geschwindigkeit [m/s].

Die zugehörige Lenkradstellung und damit das genaue Lenkungsübersetzungsverhältnis hängt von der anthropometrischen Position von Lenkrad und Fahrer im gegebenen Fahrzeug ab. Da es sich bei alledem um Richtgrößen (die Voraussichtzeit von 2 s ist nur ein Richtwert!) handelt, kann für die Berechnung von der Augenposition eines mittelgroßen Fahrers ausgegangen werden. Unter der Voraussetzung, dass der Normalfahrer keine größeren Querbeschleunigungen als 0,3 g wählt, kann – mit Einschränkung – ein ähnlicher Effekt erzielt werden, wenn man eine nichtlineare Lenkübersetzung wählt, welche nach diesen Überlegungen im mittleren Bereich indirekt und zu den Randbereichen zunehmend direkter wird

41 Ein ähnlicher optischer Effekt entsteht auch auf gerader Strecke bei dem so genannten „Dackelgang", der durch ein verzogenes Fahrwerk zustande kommt.

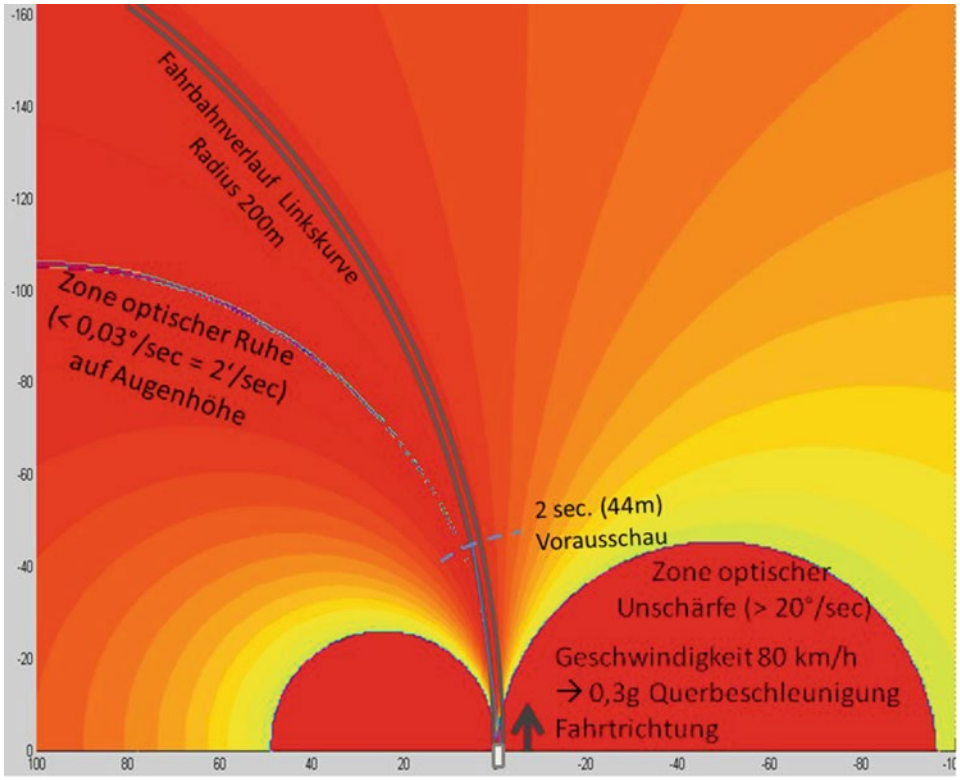


Abb. 6.51 Optischer Fluss im Auge des Fahrers bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h und einer Linkskurve mit einem Radius von 200 m (Querbeschleunigung: 0,3 g)

(Hackenberg u. Heißing 1982; siehe auch Friedrich et al. 2001). In Verbindung mit der Anzeige des Fahrschlauchs im HUD (siehe ▶ Abschn. 6.3.1.2) würde so eine ganz neuartige und letztlich einfachere Fahraufgabe entstehen, die Aspekte, wie sie heute bei in die Rückfahrkamera eingeblendeten lenkradabhängigen Bewegungsspuren schon gegeben sind, auf den gesamten Fahrprozess überträgt.

Eine elektronisch beeinflussbare Überlagerungslenkung, wie sie zuerst erwähnt worden ist, hat den Vorteil, dass damit verschiedene Assistenzfunktionen realisierbar sind. Da der Fahrer für niedrige Geschwindigkeiten (< 40 km/h) offensichtlich das innere Modell eines durch die Lenkradstellung bestimmten Kurvenradius besitzt und für höhere Geschwindigkeiten das einfache innere Modell des Anpeilens eines Zielpunktes, kann man dem mit einer in entsprechender Weise beeinflussten geschwindigkeitsabhängigen Lenkungsübersetzung entsprechen. Aufgrund des sog. Längenservomechanismus (▶ Abschn. 3.2.3) übt der Fahrer eine Kraft auf das Lenkrad so aus, dass die durch das entsprechende innere Modell gewünschte Lenkradstellung zustande kommt. Die Überlagerungslenkung ist also im Sinne eines aktiven Bedienelements zu realisieren. Damit wird erreicht, dass irgendeine äußere Störung (zum Beispiel Seitenwind, geneigte Fahrbahn) zwar gespürt wird, der einmal gewählte Lenkradwinkel aber gehalten und so das richtige kompensierende Moment auf das Lenkungssystem übertragen wird. Zudem kann eine gewünschte Fahrzeugcharakteristik (neutral, im Grenzbereich über- bzw. untersteuernd) programmiert werden. Prinzipiell ist so auch die Annäherung an den Grenzbereich darstellbar (wohl gemäß der bisherigen Erfahrung durch ein nachlassendes Lenkmoment). Allerdings ist noch zu erforschen, durch welche Parameter diese Annäherung sicher prognostiziert werden kann. Eine derartig konzipierte

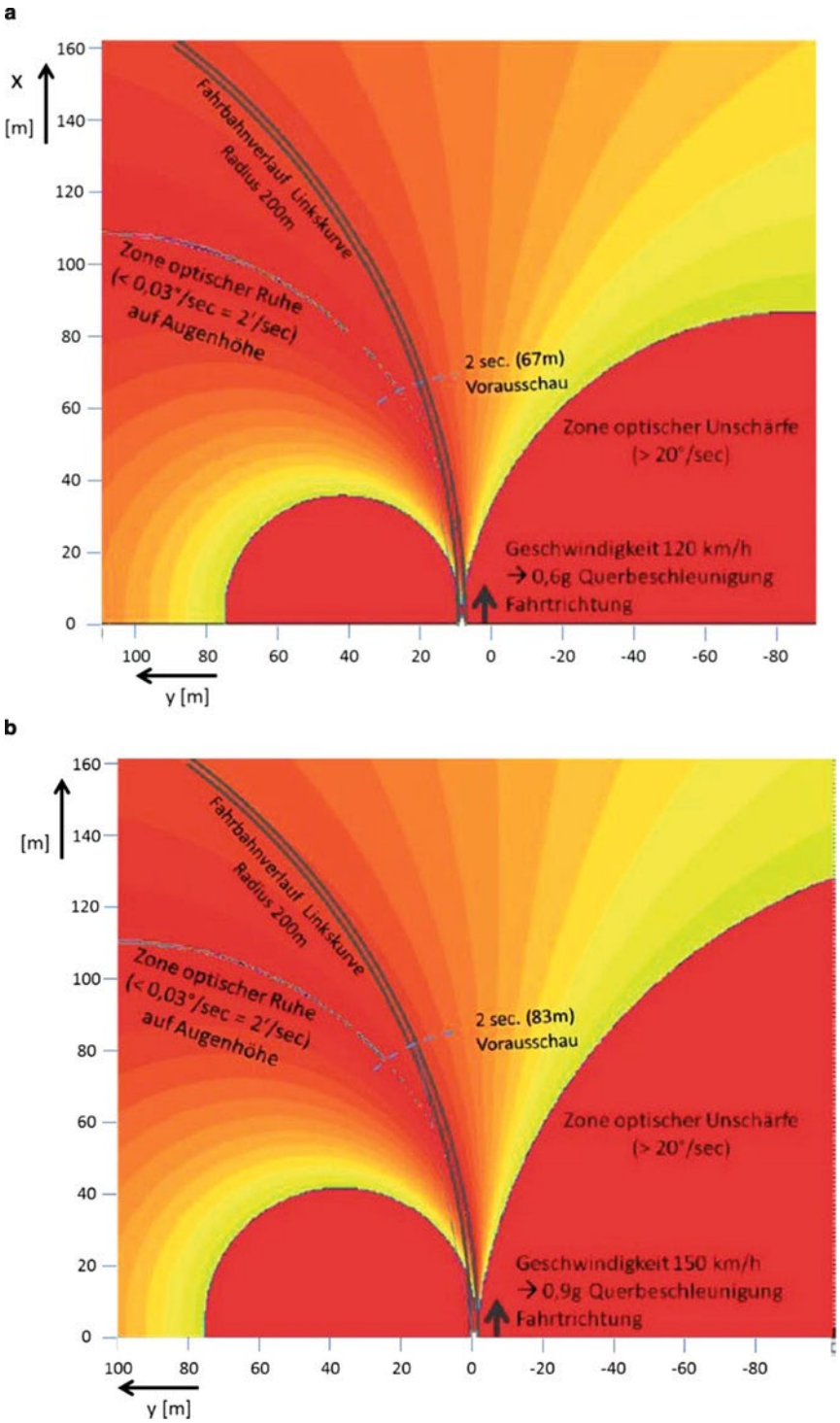


Abb. 6.52 Optischer Fluss im Auge des Fahrers bei einer Geschwindigkeit von 120 km/h (**a**) und 150 km/h (**b**) jeweils bei einer Linkskurve mit einem Radius von 200 m (Querbeschleunigung: 0,9 und 0,6 g)

Überlagerungslenkung bietet den Vorteil, die Informationen auch weiterer Assistenzfunktionen wie Spurverlassenswarner, Spurhalteassistent und Spurwechselassistent dem Fahrer ergonomisch kompatibel zu vermitteln.

6.4.2 Längsdynamik

Bisher existieren keine expliziten Untersuchungen bezüglich des Erlebens der Fahrzeuglängsführung, die mit denen des Lenkgefühls vergleichbar wären. Eberl (2014) identifizierte ausgehend von einer Literaturrecherche verschiedene Erlebnisdimensionen der Fahrzeuglängsführung, die er auf der Grundlage eines Expertenworkshops und zweier explorativen Probandenversuche konkretisiert und operationalisiert hat. Danach kann neben den bekannten Erlebnisdimensionen Sicherheit, Diskomfort und Komfort auch eine neu definierte Dimension, nämlich Energiegefühl beschrieben werden.

- Bezüglich der lokalen, d. h. subjektiv erlebten ***Sicherheit*** (Jürgensohn 1997) spielt dabei das Gefühl, eine Situation zu kontrollieren, eine wesentliche Rolle. Dieses wird nach Haider (1977) durch die hierarchisch aufeinander aufbauenden Stufen Durchschaubarkeit, Vorhersehbarkeit und Beeinflussbarkeit beschrieben (Grote 1997). Speziell die Beeinflussbarkeit ist dabei durch die Dosierbarkeit, d. h. die Präzision, mit der eine Veränderung der Fahrzeugreaktion eingestellt werden kann, und die Direktheit – das ist der Grad der zeitlichen Beeinflussung, mit der eine Veränderung der Fahrzeuggeschwindigkeit herbeigeführt wird – beschrieben.
- Der ***Diskomfort*** charakterisiert die physische und psychische Beanspruchung, die mit der Kontrolle der Längsdynamik verbunden ist. Die physische Beanspruchung ist dabei wesentlich durch den notwendigen Wechsel zwischen Fahr- und Bremspedal und durch die anthropometrische bedingte Fußhaltung bestimmt. Die psychische Beanspruchung erwächst aus der kognitiven Belastung, aus dem Verkehrsumfeld die aktuellen Handlungsnotwendigkeiten zu selektieren.
- Der ***Komfort*** ist demgegenüber mit dem positiv emotionalen Erleben verbunden, das durch eine gesamthafte Bewertung des durch die Fahrtätigkeit ausgelösten Erlebens sowie einen Zustand, der subjektiv durch das Fehlen von Aufregung, Verspannung, Nervosität bzw. durch das Vorhandensein von Gelöstheit, Gelassenheit und innere Ruhe gekennzeichnet ist (Petermann 2009). Dazu kommt der hedonistische Aspekt, sich durch das Fahrzeug oder das Fahrverhalten von anderen abzugrenzen bzw. andere zu übertrumpfen (Dick 2002). Diese hedonistischen Attribute werden durch die Aspekte Kompetenz als Zustand des Menschen sich zu einer Tätigkeit fähig zu fühlen (Hassenzahl et al. 2009), Stimulation, welche die auf den Fahrer einwirkende Anregung durch die Merkmale des Fahrzeugs darstellt und Autonomie als das Bedürfnis, Dinge frei und selbstbestimmt entscheiden und ausführen zu können (Diefenbach und Hassenzahl 2010), näher beschrieben.
- Gerade in Verbindung mit den steigenden Treibstoffpreisen aber auch speziell in Verbindung mit der in Zukunft mehr Bedeutung gewinnenden Elektromobilität spielt der Aspekt des ***Energiegefühls*** eine wesentliche Rolle. Mittels entsprechender Anzeigen[42] wird dieses Gefühl unterstützt durch das erlebte Ausmaß der Energierückgewinnung durch Rekuperation und die Einschätzung, durch die Fahrhandlung den Energieverbrauch zu beeinflussen.

Die beiden wesentlich die Längsdynamik des Fahrzeug beeinflussenden Stellteile, nämlich Gaspedal und Bremspedal (von den nur die „Technik" des Fahrzeugs bedienenden Stellteilen „Kupplung" und „Schalthebel" soll hier abgesehen werden), heben sich vom die Querdynamik beeinflussenden Lenkrad wesentlich dadurch ab, dass sie bedingt durch die verwendete Technik dem Fahrer keinerlei Rückmeldung über den Erfolg der initiierten Handlung

42 Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, dass derartigen Anzeigen nur in einer vom Verkehr her wenig fordernden Situation ein Nutzen zugewiesen werden kann.

hinsichtlich der Fahrzeugbewegung vermitteln. Sie liefern nur mehr oder weniger präzise (s. u.) Information über die Stellung des Pedals und die damit verbundene Rückstellkraft.

6.4.2.1 Beschleunigungsverhalten

Die Gestaltung der Rückstellkräfte beim ***Gaspedal*** (allg. Fahrpedal) ist dabei vergleichsweise einfach, da es hier nur auf die Stärke der Rückholfeder ankommt. Wang et al. (1996) haben sich in ihren Untersuchungen mit der subjektiven Empfindung von Kräften auf der Basis der Beurteilung nach der Borg-Skala (Borg 1982) beschäftigt. Diese liegen bei kurzfristiger Betätigung für „sehr starke" Kräfte bei 48 N, was nach der Borg-Skala zwischen der Bezeichnung „schwach" und „moderat" liegt. Für Dauerbetätigung dürften jedoch nur 15 % dieser Kraft, also 7,2 N zugemutet werden. Wenn man allerdings bedenkt, dass nach der erwähnten Erhebung die Ruhekraft des Fußes durchschnittlich bei 20 N liegt, erschient es akzeptabel, für Dauerbetätigung bei 2/3 der Gaspedalstellung einen Wert von ca. 27 N festzulegen. Das entspricht auch dem Wert, der in den meisten Kraftfahrzeugen realisiert wird. Auch dies stimmt gut mit Richtwertangaben des HdE (Handbuch der Ergonomie, Schmidtke und Rühmann 1989) überein, die bei sicherheitskritischer Pedalbetätigung für Frauen ein Überschreiten von 26 N für nicht akzeptabel halten.

In Verbindung mit dem sog. elektronischen Gaspedal[43] besteht zusätzlich die Möglichkeit, die Verbindung zwischen Gaspedalstellung und Drosselklappe nichtlinear und zudem noch abhängig von weiteren Parametern (z. B. Motordrehzahl, Lastzustand) relativ frei zu gestalten. Dadurch eröffnet sich die Chance, den nichtlinearen Zusammenhang von Drosselklappenstellung bzw. Einspritzmenge, Motordrehzahl und Drehmoment für das Empfinden des Fahrers quasi zu linearisieren. Er bekommt dadurch das Gefühl vermittelt, dass der Motor scheinbar besser „am Gas hängt". Dabei können unterschiedliche Taktiken zur Anwendung kommen: Man kann einerseits versuchen, einen möglichst linearen Zusammenhang zwischen der Gaspedalstellung und dem Drehmoment zu erreichen, wobei man sich auf die Drehzahl mit der jeweiligen Drehmomentspitze bezieht. Aus ergonomischer Sicht ist diese Auslegung zu bevorzugen, weil sie der grundsätzlichen menschlichen Annahme eines linearen Zusammenhangs von Stellteilbewegung und damit erreichtem Effekt entgegenkommt. Man kann aber auch eine nichtlineare Charakteristik bevorzugen, um dadurch eine eventuell gegebene Antrittsschwäche des Motors zu kaschieren. Der Motor des Fahrzeugs erscheint dann auf Kosten des Verbrauchs „spritziger" als er ist. Durch das Schalten einer „Öko-Kennlinie" wird auch bei großer Gaspedalstellung nur ein geringes Drehmoment abgerufen, wodurch der Fahrer zu einer sparsamen Fahrweise gedrängt werden soll.

Neuere Entwicklungen gehen noch einen Schritt weiter: Sie führen zum sog. „Aktiven Gaspedal". Hier wird im Extremfall die Rückstellkraft vollkommen synthetisch produziert. Dadurch eröffnet sich die Möglichkeit, zusätzlich fahrdynamische Informationen über das Gaspedal rückzumelden. Eine Anwendung des Aktiven Gaspedals kann beispielsweise darin liegen, Strategien für verbrauchsoptimiertes Fahren dem Fahrzeugführer situationsangepasst zu vermitteln (auch unter Berücksichtigung von Höhenunterschieden, beeinflusst durch die Information des Navigationsrechners, Samper und Kuhn 2001). Wie entsprechende Versuche zeigen, können derartige Anzeigen zu einer Verbrauchsminderung von ca. 10 % führen, allerdings nur, wenn seitens des Fahrers eine Bereitschaft vorhanden ist, den Empfehlungen zu folgen, durch die eine eher ruhige Fahrweise vorgegeben wird.

In jedem Fall erwartet der Fahrer, dass mit einer Änderung der Fahrpedalstellung eine entsprechende Rückmeldung der Fahrzeugbewegungen (Beschleunigung bzw. Verzögerung) erfolgt. Dafür gelten im Prinzip die gleichen Zeitüberlegungen, die auch für die Lenkcharakteristik von Bedeutung

43 Beim sog. elektronischen Gaspedal wird die Stellung des Gaspedals über ein Potentiometer oder eine Technik mit entsprechender Wirkung in eine elektrische Größe umgewandelt. Die Beeinflussung des Motors (zum Beispiel über die Drosselklappe) geschieht über einen Stellmotor. Deshalb ist es prinzipiell möglich, die Verbindung zwischen Gaspedal- und Stellmotorstellung durch eine beliebig definierbare Kennlinie zu gestalten.

sind und die in Abb. 6.49 dargestellt sind: d. h. eine spürbare Reaktion zwischen 50 und 150 ms würde als „sofort" empfunden werden, alles was länger dauert als „verzögert". Für das kinästhetische Empfinden ist dabei entscheidend, dass mindestens die Reizschwelle für Translationsbeschleunigung überschritten werden muss. Heißing et al. (2000) geben hier einen Bereich von 0,02 bis 0,8 m/s² als Wahrnehmungsschwelle an. In Experimenten im Rahmen von verschiedenen Realfahrzeug-Feldstudien konnten Rockwell und Snider (1965) eine Unterschiedsschwelle von 0,15 m/s² ermitteln. Müller et al. (2013, 2014) fanden in einem doppelten Staircase-Experiment eine 50 %-Schwelle von 0,1 m/s2, welche auch über verschiedene Versuchsbedingungen (Geschwindigkeit, Motorgeräusch, Fahrerbeanspruchung) hinweg konstant bleibt. Aus sinnesphysiologischer Sicht ist es dabei durchaus möglich, ein verzögertes Ansprechen der Antriebseinheit durch eine entsprechend frühzeitig einsetzende akustische Rückmeldung zu kaschieren. Allerdings darf der Verzug zwischen dem akustischen Anschwellen des Motorgeräuschs und dem fühlbaren kinästhetischen Empfinden dann ebenfalls 200 ms nicht übersteigen. Ebenfalls wird vom Fahrer wenig toleriert, wenn die Veränderung der akustisch wahrgenommenen Frequenzen (synonym mit der Motordrehzahl) nicht hinreichend synchron mit dem Geschwindigkeitszuwachs (= kinästhetisch wahrgenommene Beschleunigung) ist, wie es bei Automatikgetrieben mit hohem Wandlerschlupf und den früheren Auslegungen von stufenlosen Getrieben (sog. Umschlingungsgetrieben) der Fall war. Auch hier dürfte die Toleranzschwelle bei < 200 ms für einen zeitlichen Verzug zwischen den wahrnehmbaren Änderungen dieser beiden Reize liegen.

Neben dem Ansprechverhalten spielt aber auch das absolute Niveau der durch den Antrieb möglichen Längsbeschleunigung eine wichtige Rolle. Wenn man im Sinne des Regelkreises (Abb. 2.1 und 2.2) das Fahrzeug als Verstärker des Willens des Fahrers versteht, so sollte jede Stellteilbewegung (= Fahrpedal) unmittelbar und ohne Zeitverzögerung in eine entsprechendes Ausgangssignal (= Geschwindigkeit) umgesetzt werden. Dies ist aber aus regelungstechnischen Gründen nur mit einer unendlich großen Leistung des Übertragungselementes (= Fahrzeug) möglich.[44] Eine natürliche Grenze für diesen Leistungsanspruch ist allerdings dadurch gegeben, dass unter normalen Umständen der Reibungskoeffizient an den Rädern den Wert „1" kaum übersteigt. Damit sind die maximalen Beschleunigungen bzw. Verzögerungen auf 1 g beschränkt. Die häufig als Leistungsindikator herangezogene Zeit, die verstreicht, bis das Fahrzeug eine Geschwindigkeit von 100 km/h erreicht hat, würde dafür ungefähr 3 s betragen (dies sind Werte, die heute von extrem leistungsstarken Sportwagen bereits erreicht bzw. sogar unterschritten werden!). Es ist offensichtlich, dass dieser Wert noch innerhalb des Erlebens der Gegenwart liegt. Selbst die heute mit den meisten Fahrzeugen möglichen Werte zwischen 8 und 13 s liegen noch im Bereich der „Gegenwart der Vergangenheit", d. h. sie werden sehr unmittelbar erlebt. Demgegenüber liegen historische Werte (zum Beispiel 36 s beim VW 1200 von 1956) deutlich außerhalb dieses Bereichs. Das Verhalten dieser Fahrzeuge wurde deshalb als „quälend langsam" erlebt. Die in der historischen Entwicklung zu beobachtende ständige Zunahme der Motorleistung der Fahrzeuge hat hier eine Begründung. Für das Empfinden des Leistungsverhaltens des Fahrzeugs während der Fahrt spielen allerdings bevorzugt die Zeiten eine Rolle, die zum Beschleunigen z. B. beim Überholen (von 80 auf 120 km/h) benötigt werden. Auch diese Zeiten sollten mindestens im Bereich der „Gegenwart der Zukunft" bzw. „Gegenwart der Vergangenheit" (also im Bereich von 10–15 s) liegen, um wenigstens unter diesem Aspekt ein sicheres Abschätzen eines Überholvorgangs zu ermöglichen.

Da der Mensch von einem linearen Übertragungsverhalten der Regelstrecke ausgeht, sollte die Motorcharakteristik durch einen Drehmomentverlauf beschrieben sein, der unabhängig von der Drehzahl ist. Die heutigen aufgeladenen Verbrennungsmotoren kommen dieser Forderung für einen großen Drehzahlbereich (oftmals allerdings erkauft durch ein verzögertes Ansprechen)

44 Es sei hier darauf hingewiesen, dass für eine akustische HiFi-Anlage die großen Leistungen nicht notwendig sind, um möglichst große Lautstärken zu erzeugen, sondern – aus dem gleichen Grund – dafür, dass das akustische Ausgangssignal möglichst genau den Vorgaben des Tonträgers folgt.

nach, nicht zu reden von den Qualitäten des Elektroantriebs, der diese Forderung weitgehend ideal erfüllt.

Überhaupt ergeben sich durch den ***Elektroantrieb*** ganz neue Herausforderungen bei der Gestaltung der Charakteristik des Fahrpedals. Wenn in bisherigen Hybridfahrzeugen in der Verzögerungsphase nur eine leichte Rekuperation (Rückgewinnung) der Bewegungsenergie in Form des Aufladens der Starterbatterien erfolgt, so besteht bei einem vollständigen Elektroantrieb die Möglichkeit, nicht nur den Vortrieb, sondern auch das Bremsen elektrisch zu gestalten und so, nur reduziert durch den Wirkungsgrad des Antriebsmotors und den Ladungsverlusten der Batterie, Bewegungsenergie beim Verzögern zu einem großen Prozentsatz zurückzugewinnen. Es gibt dabei grundsätzlich zwei konzeptionelle Ansätze, die Rekuperationsfunktion in die Längsdynamikinteraktion zu integrieren. Zum einen kann die Steuerung der Rekuperation mit der (auch im Elektrofahrzeug vorhandenen) mechanischen Bremse im konventionellen Bremspedal zusammengefasst werden. Zum anderen bietet die Realisierung einer Ein-Pedal-Interaktion – die Rekuperationsfunktion wird hierbei in das Fahrpedal („Gaspedal") integriert – die Möglichkeit die Beschleunigung und die Verzögerung des Fahrzeuges ohne Umsetzen des Fußes allein durch die Stellung des Fahrpedals zu regeln (sog. One-Pedal-Drive). Da im normalen Fahrbetrieb keine Verzögerung größer 0,3 g vorkommt, reicht die Leistung des oder der Antriebsmotoren auch für einen Bremsvorgang in diesem Rahmen aus. Nun ist die Frage: Soll die Verzögerung bis zu dieser Größe bereits durch vollkommenes Zurücknehmen des Fahrpedals erfolgen? Dies würde ein ganz neues Fahrgefühl zur Folge haben, da nun durch die Fahrpedalstellung nach einer gewissen Verzugszeit quasi direkt die Geschwindigkeit des Fahrzeugs bestimmt werden würde (mittels des aktiven Gaspedals und einer entsprechenden elektronischen Regelung könnte dies sogar im Sinne eines aktiven Bedienelements vollkommen korrekt erfolgen). Oder sollte man in Analogie zu der bisherigen Fahrer-Fahrzeug-Interaktion mit dem Zurücknehmen des Fahrpedals das Fahrzeug vollkommen antriebslos lassen (so genanntes Segeln), wodurch – falls der Fahrer dies in seine Fahrstil sinnvoll aufnimmt – eine signifikante Reduktion des Energiekonsums erreicht werden würde. In diesem Fall würde rekuperierendes Bremsen nur über das Bremspedal erfolgen. Man könnte dann dort bei Überschreiten eines besonderen Druckpunktes signalisieren, dass ein Bremsvorgang eingeleitet wird, der nun Bewegungsenergie in Wärmeenergie umgewandelt.

Feldversuche zum Umgang mit einem Ein-Pedal-Bedienkonzept (One-Pedal-Drive), wie beispielsweise im MINI-E genutzt, haben gezeigt, dass die Gewöhnung an diese längsdynamische Interaktionsform im Minutenzeitraum stattfindet und bei erfahrenen Fahrern im Hinblick auf effizientes Fahren kein Nachteil gegenüber konventionellen Verbrennerfahrzeugen besteht. Das Ein-Pedal-Bedienkonzept (One-Pedal-Drive) ermöglicht also gleichermaßen eine dynamisch-sportliche wie auch eine gleichmäßig-effiziente Fahrweise und ist daher als ideale Längsdynamikinteraktionsform für Elektrofahrzeuge zu empfehlen. Auch technisch gesehen ist dieses Interaktionskonzept durch die Trennung von mechanischem Bremspedal und elektronischem Stellteil zur Regelung der E-Maschine weniger aufwändig. Eine erste ausführliche Analyse wurde von Eberl (2014) vorgelegt. Sie wurde in Verbindung mit einem auf Elektroantrieb umgestellten Mini durchgeführt. Diese Studie konnte allerdings nur mit entsprechend berechtigten Werksangehörigen – also eher mit technikaffinen Probanden – durchgeführt werden, da das Versuchsfahrzeug noch keine allgemeine Straßenzulassung hatte. Dennoch kann man davon ausgehen, dass die im Folgenden geschilderten Ergebnisse eine gewisse Allgemeingültigkeit besitzen. In Übereinstimmung mit Berichten von Journalisten, die erste Kontakte mit Elektrofahrzeugen hatten, wird auch bei Eberl das spontane Verhalten eines Elektrofahrzeugs in der Beschleunigungsphase generell positiv bewertet. Von besonderem Interesse ist das Verzögerungsverhalten. Er hat dafür vier unterschiedliche Niveaus definiert, versuchstechnisch realisiert und durch seine Probanden bewerten lassen. Die Ergebnisse lassen sich in folgender Weise zusammenfassen:

1. Segeln ist durch eine extrem niedrige Verzögerung charakterisiert, die allein durch die Fahrwiderstände (Reifen, Luftwiderstand, innere

Reibungsverluste) zustande kommt (≈ 0,1 m/s²). Es wird vornehmlich als Kontrollverlust der Fahrzeuglängsführung erlebt, was zu einem hohen Diskomfort wegen des notwendig häufigen Pedalwechsels führt. Auch bei ausgeprägter Vorausschau ist es wegen der niedrigen Verzögerung kaum möglich, sich auf Verkehrssituationen nur durch Lösen des Fahrpedals korrekt einzustellen.

2. Das Verbrennerschleppmoment (sog. Motorbremse) entspricht einer Verzögerung von ca. −0,8 m/s². Es wird in den verschiedenen Erlebnisdimensionen weitgehend neutral bewertet, da es der gewohnten Kontrolle der Fahrzeuglängsführung auch mit einem neutral erlebten Energiegefühl entspricht. Wegen dieses gewohnten Verhaltens wird es aber zugleich auch als langweilig mit geringer Stimulation und wenig Potenzial zur Erweiterung der Fahrerkompetenz erlebt.
3. Ein sog. erlebbares Schleppmoment wurde mit einer Verzögerung von −1,5 m/s² festgelegt. Es ermöglicht in vielen Verkehrssituationen das Auslösen einer hinreichenden Verzögerung allein durch das Lösen des Fahrpedals (Ein-Pedal-Bedienung). Von den Probanden wird dies mit einer deutlich gesteigerten Kontrolle und einem positiven Erleben der Energierückgewinnung bewertet. Die notwendige Vorausschau in Fahrsituationen mit hoher Dynamik und dem damit bedingten Abgleichen der Verzögerung beim Lösen des Fahrpedals mit den durch die Verkehrssituation gegebenen Bedingungen wird als beanspruchend beschrieben. Andererseits wird die Ein-Pedal-Bedienung als stimulierend erlebt.
4. Das hohe Schleppmoment bewirkte eine Verzögerung von −2,3 m/s² und entspricht damit einen Wert, der im normalen Fahrbetrieb bei konventionellen Fahrzeugen als noch komfortables Bremsen empfunden werden würde. Diese Auslegung wird subjektiv als besonders sicher erlebt, da dadurch eine symmetrische Interaktion mit dem Fahrzeug über das Fahrpedal durch Auslösen ähnlich ausgeprägter Beschleunigungen und Verzögerungen möglich ist. Allerdings wird die notwendige präzise Pedalinteraktion auch als psychisch beanspruchend empfunden. Das Grundkonzept Hohes Schleppmoment bietet das höchste Potenzial zur Ausbildung eines Erlebens der Fahrzeuglängsführung und damit einhergehend eine ausgeprägte Stimulation und Erweiterung der Fahrerkompetenz durch die Ein-Pedal-Bedienung.

In einer Gesamtschau vermutet Eberl, dass man eine Wahlmöglichkeit zwischen dem erlebbaren und dem hohen Schleppmoment vorsehen müsse, um damit individuell unterschiedlichen Bedürfnissen aber auch unterschiedlichen Verkehrsbedingungen gerecht zu werden. Das negative Abschneiden des Segelns, das man heute auch in Verbindung mit konventionellen Antrieben als eine Möglichkeit der Reduktion des Energieumsatzes ansieht, erfüllt aus der subjektiven Sicht offensichtlich nicht die technisch begründeten Erwartungen.

6.4.2.2 Verzögerungsverhalten

Prinzipiell gelten für das Verzögerungsverhalten und damit für die Eigenschaften des ***Bremspedals*** die gleichen Forderungen wie für das Fahrpedal, insbesondere was das Ansprechverhalten anlangt. Bedingt durch die technische Realisierung wird das Maß der Verzögerung über das Bremspedal eigentlich nur durch den Druck auf das Pedal bestimmt. Dieser Effekt wurde in der Bremsbetätigung der Citroën DS und des späteren Citroën CX verwirklicht, indem mit dem Fuß – ohne jeden Pedalweg – ein ballartiges Gummielement, das mit dem hydraulischen Bremssystem direkt verbunden war, betätigt wurde. Diese Bremsbetätigung war jedoch so sehr abweichend von den in den sonstigen Fahrzeugen realisierten Systemen, dass dies zu einer weitgehenden Ablehnung seitens der Kunden führte. Offensichtlich benötigt der Mensch, bedingt durch den Wegservomechanismus (siehe ▶ Abschn. 3.2.3) das Empfinden, „eine Kraft so aufzubringen, dass ein gewünschter Weg erzielt wird". Durch Elastizität im Bremssystem wird dieser Effekt mehr oder weniger gezielt erreicht.

Abbildung 6.53 gibt den gemessenen Kraft-Weg-Verlauf einer konventionellen Servobremse für unterschiedliche Bremsbetätigungen wieder. Diese ist – durch die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften des Systems bedingt – unabhängig von der Art der Betätigung immer durch

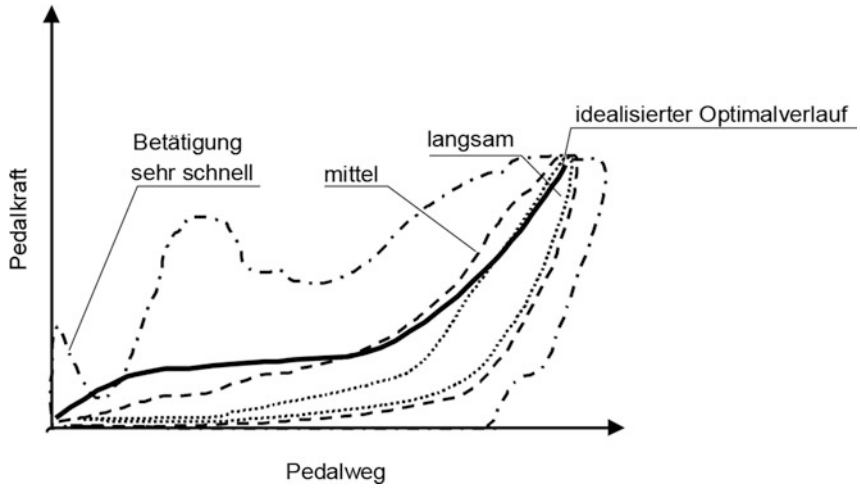


Abb. 6.53 Weg-Kraft-Verlauf am Bremspedal eines modernen PKW mit Servobremse

eine starke Hysterese gekennzeichnet. Hinzu kommt, dass sich diese Charakteristik erheblich in Abhängigkeit von der Betätigungsgeschwindigkeit verändert. Im Hinblick auf die schon erwähnte grundsätzliche menschliche Erwartung eines linearen Verhaltens ist dies natürlich von Nachteil. In jüngerer Zeit wird deshalb auch diskutiert, das Bremsgefühl durch die Einführung einer elektrischen Bremse zu gestalten. Mit Hilfe elektrischer „By-Wire-Bremsen" mit elektronischer Regelung kann die Hystereseeigenschaft kompensiert werden. In Abb. 6.53 ist zusätzlich ein elektronisch verwirklichter Optimalverlauf eingezeichnet, der weder eine Hysterese noch eine Abhängigkeit von der Betätigungsgeschwindigkeit zeigt. Sein progressiver Verlauf ist auf Arbeiten von Göktan (1987) zurückzuführen, bei denen in simulierten Nachfahrversuchen und Bergabfahrten diese Charakteristik als bester Kompromiss gefunden wurde. Es geht daraus hervor, dass der Fahrer einen Ansprechweg erwartet, der für leichte bis mittlere Verzögerung nur geringe Rückstellkräfte bereithält (Plateau im mittleren Pedalwegbereich). Dem schließt sich ein quasi linearer Kraft-Weg-Verlauf an, der für hohe Verzögerungswerte (> 0,4g) wirksam ist. Wie allerdings Bill et al. (1999) betonen, hängt das Pedalgefühl auch erheblich von der Bauart des Fahrzeugs (z. B. Pkw oder Lieferwagen) ab. Auch dafür und insbesondere in Verbindung mit dem zukünftigen Elektroantrieb besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

6.4.3 X-by-Wire

Unter X-by-Wire versteht man allgemein, dass die mechanische Verbindung zwischen Bedienelement und ausführendem Organ vollkommen durch eine elektrisch/elektronische Verbindung ersetzt ist. Dazu ist in jedem Fall am Bedienelement ein Sensor notwendig, der den Bedienwunsch des Fahrers erfasst und ein Aktuator am ausführenden Organ. Der Fall des elektronischen Gaspedals stellt eine solche Variante des X-by-Wire dar (hier mit „*Drive-by-Wire*" bezeichnet). Wie mehrfach angesprochen, ist für den Fahrer eine haptische Rückmeldung zumindest während des Bedienvorgangs notwendig. Im Fall des elektronischen Gaspedals erfolgt diese mechanisch durch eine Feder. In mehr elaborierten Fällen soll diese Rückmeldung aber auch Information über den gewünschten Effekt vermitteln. Deshalb ist dafür auch am Bedienelement ein Aktuator notwendig. Beim aktiven Gaspedal erfolgt diese Rückmeldung durch einen Drehmomentmotor, der in Grenzen Rückstellkräfte gesteuert durch eine Elektronik erzeugen kann.

Auch für die Lenkung werden schon seit längerer Zeit solche X-by-Wire-Techniken diskutiert, da sie vor allem in Verbindung mit Fahrerassistenzsystemen Vorteile bieten würden (z. B.: beeinflussbare Funktionalität, bessere Voraussetzungen für passive Sicherheit, Variantenreduktion, einfachere Achsgeometrie, gezielt gestaltete Rückmeldung, Design; zitiert nach Pruckner 2013). Man

bezeichnet diese Art der Lenkung als „*Steer-by-Wire*". Für eine Steer-by-Wire-Lenkung ist am Lenkrad beispielsweise ein Drehmomentsensor notwendig, der den Fahrerwunsch aufnimmt und ein Stellmotor, welcher den von der Elektronik berechneten Lenkradwinkel einstellt. Die Reaktion des Fahrzeugs wird dann entweder direkt an der Spurstange der Lenkung oder global durch Beschleunigungssensoren am Fahrzeug gemessen und über einen Drehmomentmotor am Lenkrad dem Fahrer zurückgemeldet. Schon Segel und Bundorf (1966) stellten ein Versuchsfahrzeug vor, bei dem die Lenksäule mechanisch vollkommen getrennt war von einer Servoeinrichtung zur Verstellung der Spurstange. Durch einen Drehmomentmotor wurde künstlich eine Rückstellkraft für den Fahrer bereitgestellt. Durch diese Versuchsanordnung waren bereits moderne Vorstellungen des „Steer-by-Wire" vorweggenommen worden. Die Lenkradstellung beeinflusste zwar direkt die Servoeinrichtung für die Spurstange. Auf den Drehmomentmotor, der die Rückstellkraft simuliert, werden aber mit einstellbarem Gewicht Informationen über Rollwinkel und Rollwinkeländerung, Gierwinkel, Gierwinkeländerung, Querbeschleunigung, Fahrzeuggeschwindigkeit und Rückstellkräfte in der Spurstange gegeben. Ziel war dabei, ein optimales Lenkgefühl experimentell zu synthetisieren. Mit den heute erweiterten Möglichkeiten des „Steer-by-Wire" und der Aussicht auf eine gesetzliche Änderung, die eine Abkehr von der mechanisch starren Verbindung von Lenkrad und Spurstange ermöglicht, werden in allen Fahrzeugfirmen Versuche der geschilderten Art durchgeführt. So wurde von Friedrich et al. (2001) von einem VW-Bus berichtet, der mit einer derartigen Lenkung ausgerüstet ist. Versuchsfahrer konnten bei entsprechender Einstellung des Systems den Unterschied zu einer konventionellen Lenkung nicht erkennen.

Wie bereits angedeutet, bietet die „by-wire-Steuerung" dem Fahrer neuartige Möglichkeiten, eine intuitive und damit bediensicherere Einwirkung auf das Fahrzeug zu gestatten als dies bei dem konventionellen Konzept möglich ist, das letztlich auf Grund der historisch-technischen Entwicklung des Fahrzeugs und nicht aus grundsätzlichen bedientechnischen Überlegungen zustande gekommen ist. Das Argument ist: Mit den Möglichkeiten moderner Mikroelektronik in Verbund mit dem ausgefeilten Potential der Mechanik (Stichwort: *Mechatronik*) kann technisch fast jede Form der Bedienung realisiert werden. Deshalb ist es nun möglich, aus der Sicht der physiologischen und psychologischen Eigenschaften des Menschen diese Bedienung zu gestalten. Insbesondere eröffnet sich dadurch die Gelegenheit, eine ergonomische Forderung zu erfüllen, nämlich die zweidimensionale Aufgabe des Autofahrens auch durch ein zweidimensionales Bedienelement zu bewerkstelligen. Als Bedienelement kommt hierfür in erster Linie der Joystick in Frage. Bereits 1958 wurde von General Motors ein Versuchsfahrzeug (Chevrilet Impala) vorgestellt, das über ein solches Bedienelement zur Lenkung des Fahrzeugs verfügte („Unicontrol", ◘ Abb. 6.54)[45]. Erst mit den Möglichkeiten der Mechatronik und der Realisierung dieses Bedienelements als „Aktives Stellteil" (siehe ◘ Abb. 6.24) konnte diese Art der Fahrbewegungsbeeinflussung für das Kraftfahrzeug interessant werden. Versuche in dieser Richtung wurden zuerst von Bolte (1991) am Simulator durchgeführt. Eckstein (2001) installierte das „Aktive Stellteil" zum ersten Mal in verschiedene reale Fahrzeug (Mercedes-Benz 200, 500 SE und 500 SL) und Friedrich et al. (2001) berichten vom Aufbau ähnlicher Versuchsfahrzeuge bei VW bzw. Audi. In allen Fällen wird die paarweise Bestückung eines Fahrzeugs mit einem derartigen „*Sidestick*" bevorzugt (◘ Abb. 6.55), die wodurch wie bei der Lenkradbedienung beliebig zwischen Beidhand- und Einhandbedienung gewechselt werden kann.

Ein besonderer Vorteil des aktiven Bedienelements ist, dass die Rückmeldung über den Fahrzustand frei gestaltet werden kann und nicht von Bedingungen abhängt, die durch mechanische Gegebenheiten festgelegt sind. Huang (2004) hat sich mit diesen Möglichkeiten der Rückmeldung im Detail auseinandergesetzt. Hinsichtlich der ***Längsdynamik*** empfiehlt er ein Konzept mit Kraftvor-

45 Die Rückmeldung erfolgte hier auf einfachem mechanischen Weg, indem der Joystick im Griff mit einem schweren Gewichte bestückt war, welches die Massenträgheitskräfte beim Beschleunigen, Verzögerung und Kurvenfahren für den Fahrer am Bedienelemente spürbar machte.

Abb. 6.54 Bedienung des Fahrzeugs mittels Sidestick in einem Versuchsfahrzeug von GM 1958

Abb. 6.55 Beispiel für Versuchsfahrzeug mit Sidesticksteuerung (Mercedes 500 SL; Eckstein 2001)

gabe für die Längsbeschleunigung. Es sollte dabei in Fahrversuchen überprüft werden, ob eine Rückmeldung über die erreichte Fahrgeschwindigkeit mittels eines wegbehafteten Bedienelements geschieht oder ein rein isometrisches Bedienelement (also ohne Wegauslenkung) zum Einsatz kommt. Dies hängt u. a. auch von der Auslegung des Bedienelements ab: Für den Fall nur geringer möglicher Winkelauslenkungen zeigt die isometrische Variante Vorteile. Eckstein (2001) hat sich in seinem Aufbau eines Realfahrzeugs (Mercedes-Benz 500 SL, siehe Abb. 6.55) für die isometrische Variante entschieden, wobei die jeweils erreichte Geschwindigkeit durch einen Tempomaten gehalten wird. Jüngere Versuche zur Verbindung eines solchen Konzeptes mit Assistenzsystemen (s. u.) lassen allerdings für das Bedienelement mit Wegrückmeldung der Geschwindigkeit Vorteile erkennen.

Im Zusammenhang mit der Regelung der Längsdynamik durch ein handgeführtes Bedienelement tritt immer wieder die Frage der Richtungskompatibilität auf. Es wird nämlich befürchtet, dass bei der ergonomisch kompatiblen Zuordnung „Bewegung des Stellteils nach vorne = Beschleunigung – Bewegung des Stellteils nach hinten = Bremsen" der beim Bremsen nach vorne fallende Oberkörper den Bremsvorgang hindern könnte. Bolte (1991) beantwortet diese Frage eindeutig damit, dass die Füße nicht mehr mit Pedalbewegungen beschäftigt sind, sondern dazu genutzt werden können, abstützende Kräfte aufzubringen und damit den Oberkörper im Sitz zu halten. Schließlich ist der menschliche Organismus an Reaktionen im Bereich von 1 g Beschleunigung ausgelegt und folglich in der Lage, durch versteifende Nutzung der Bein-, Hüft- und Rückenmuskulatur den Oberkörper entsprechend abzustützen. Dazu kommt, dass der Fahrer den Bremsvor-

gang aus eigener Initiative einleitet, also aufgrund seines inneren Modells weiß, was auf ihn zukommt. Auch die verschiedenen von Eckstein aufgebauten Realfahrzeuge waren nach anfänglichen Versuchen mit dem alternativen Konzept nach dem systemergonomisch korrekten Konzept realisiert.

Ein weiteres Problem stellt die Rückwärtsfahrt dar. Eine *richtungskompatible* Zuordnung würde bedeuten, dass nach „Einlegen des Rückwärtsgangs" ein Nach-hinten-drücken des Bedienelements das Fahrzeug nach hinten beschleunigt und ein Nach-vorne-drücken verzögert. Im Gegensatz dazu ist auch die *funktionale* Zuordnung denkbar, bei der – auch nach „Einlegen des Rückwärtsgangs" – die nach vorne drückende Kraft grundsätzlich die Motorleistung beeinflusst und die nach hinten ausgeübte Kraft immer das Bremsen anspricht. Diese Frage ist gegenwärtig praktisch nicht zu entscheiden. Müller (1999) fand in einem statischen Simulator, dass für das Rückwärtsfahren von 38 Versuchspersonen 57 % die richtungskompatible Zuordnung bevorzugten und 38 % die funktionale Zuordnung. Ähnliche Ergebnisse erhielt auch Penka (2000): vor einer Testfahrt im statischen Simulator gaben 81 % der 37 Versuchspersonen der richtungskompatiblen Zuordnung den Vorzug, nach dem Versuch reduzierte sich diese Bevorzugung auf 70 % der Versuchspersonen. Eckstein fand bei 12 Siebzehnjährigen ohne Fahrerfahrung im Feldversuch mit dem Stickfahrzeugauto, dass anfangs 6 Versuchspersonen die richtungskompatible Zuordnung bevorzugten, sich nach der zweiten Fahrt aber 8 von 11 Probanden (1 Ausfall) für die funktionale Zuordnung aussprachen.

Gerade für die im Vergleich zur Längsdynamik praktisch um den Faktor 10 schnellere ***Querdynamik*** ist die Frage des Konzepts des aktiven Bedienelements von herausragender Bedeutung. Unter der Voraussetzung verzögerungsfreier Übertragung ist das Konzept Wegvorgabe-Kraftrückmeldung und Kraftvorgabe-Wegrückmeldung äquivalent (Gillet 1998; Huang 2004). Da die Verzögerung zwischen Vorgabe und Fahrzeugreaktion bei der Querdynamik nicht so groß ist wie bei der Längsdynamik, können beide Regelkonzepte zur Fahrzeugführung verwendet werden. Allerdings benötigt man nach den Überlegungen von Huang (2004) bei niedriger Fahrgeschwindigkeit einen Tiefpassfilter in der Vorgabe. Deshalb ist das Regelkonzept Kraftvorgabe-Wegrückmeldung aus Flexibilitäts- und Stabilitätsgründen vorteilhafter. Für das Konzept Kraftvorgabe-Wegrückmeldung spricht zusätzlich, dass in der Realität kein System verzögerungsfrei ist, was für das Konzept Wegvorgabe-Kraftrückmeldung die Gefahr zusätzlicher Instabilität mit sich bringt.

Bei der Querdynamik kann aufgrund vieler Einzelbefunde für niedrige Geschwindigkeiten bis 25 km/h die Lenkvorgabe des Kurvenradius κ_{soll} und bei höheren Geschwindigkeiten (> 45 km/h) die der Giergeschwindigkeit ψ_{soll} mit einer kontinuierlichen Übergangszone zwischen diesen beiden Extremen empfohlen werden. Dabei kann die Fahraufgabe bei niedrigen Geschwindigkeiten den Charakter einer Folgeaufgabe annehmen, da sich der Fahrer auf der Basis seiner inneren Modelle die Lage und Bewegung seines Fahrzeugs „in der Welt" vorstellen kann. Bei mittleren und höheren Geschwindigkeiten gelingt dies nicht mehr. Vielmehr will der Fahrer den Gierwinkelfehler durch eine Giergeschwindigkeitssteuerung reduzieren bzw. regeln. Der Fahrer peilt ein „Ziel" in der realen Umgebung an. Die Fahraufgabe wird hier also eindeutig zu einer Kompensationsaufgabe.

Eckstein (2001) konnte im dynamischen Fahrsimulator der Firma Daimler-Benz zeigen, dass die Fahrgüte mit dem aktiven Sidestickbedienkonzept der Fahrzeugführung mit Lenkrad und Pedal bezüglich der Längsdynamik eindeutig überlegen ist, was im Wesentlichen auf die wegfallende Umsetzzeit des Fußes vom Gaspedal auf das Bremspedal und den Dauereinsatz des Tempomats zurückzuführen ist. Auch in querdynamischer Hinsicht wurde mit dem aktiven Stellteilkonzept eine nahezu identische Fahrgüte wie mit Lenkrad und Pedal erreicht. Unter Seitenwindeinfluss erzielten die Probanden mit dem aktiven Stellteil signifikant bessere Fahrgüten. Der grundlegende Unterschied zwischen den beiden Bedienkonzepten zeigte sich bei der Analyse reaktionskritischer Situationen auf Autobahnabschnitten: Bei Fahrmanövern, die sowohl eine Reaktion in Längs- wie in Querdynamik erforderten, waren die Sidestickprobanden den Probanden mit dem herkömmlichen Bedienkonzept klar überlegen, da sie die gleichzeitige Beeinflussung auch unter diesen Bedingungen gewohnt waren. Die mit dem herkömmlichen Bedienkonzept fahrenden Probanden

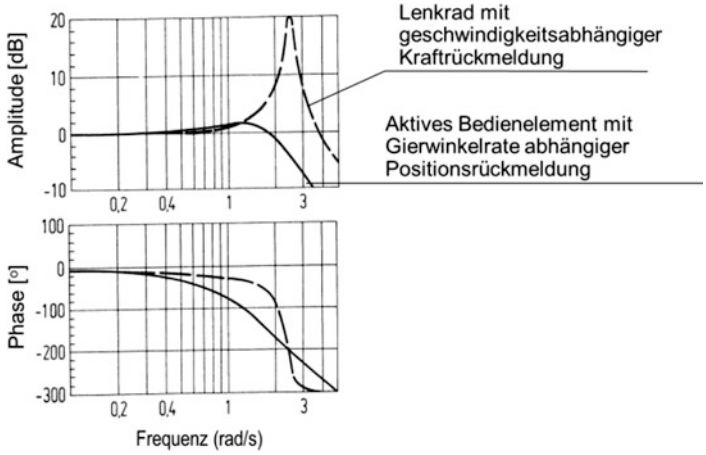


Abb. 6.56 Bodediagramm der Wirkung des Aktiven Bedienelements bezüglich der Querdynamik in Relation zu der Bedienung durch ein konventionelles Lenkrad (Bolte 1991)

reagierten fast ausnahmslos sequenziell, d. h. sie betätigten entweder das Bremspedal oder das Lenkrad, d. h. sie nutzen den Vorteil der gleichzeitigen Lenkbarkeit beim Bremsen eines ABS-Fahrzeugs eigentlich nicht, ein Effekt, der auch sonst aus Unfallanalysen bekannt ist (Petit et al. 1993).

Bolte (1991) schildert für eine solche neuartige Fahrzeugbeeinflussung mittels aktivem Bedienelement vor allem Handlingvorteile. So zeigt er, dass die Querdynamik des geschlossenen Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises bei der konventionellen Lenkung bei ca. 0,4 Hz eine Resonanzstelle besitzt (s. a. Donges 1982), die beim aktiven Stellteil völlig verschwindet (Abb. 6.56; siehe dazu auch ▶ Abschn. 2.3.3). Erklärt wird dies mit der wesentlich kürzeren Reaktionszeit des haptischen Sinneskanals, der im Gegensatz zu den anderen Sinnesorganen (Augen, aber auch Macula-/Vestibularorgan) über das Rückenmark einen eigenen Unterregelkreis (sog. „Eigenreflexbogen“) besitzt, welcher eine ca. vierfach schnellere Reaktion erlaubt. Eckstein (2001) fand – ebenfalls in Simulatorexperimenten – für Fahranfänger eine kürzere Eingewöhnungszeit, was darauf zurückgeführt werden kann, dass für das Erlernen einer solchen Steuerung leichter auf bereits in der Phase des Heranwachsens gebildete innere Modell zurückgegriffen werden kann. Er schildert zudem aber auch deutliche Eingewöhnungsprobleme für ältere, an das konventionelle System gewöhnte Personen. Dies weist erneut auf die Wirkung der gebildeten inneren Modelle hin.

Allerdings zeigt das aktive Bedienelement im realen Fahrversuch weniger Vorteile als im statischen Fahrsimulator. Als Ursache dafür ist die Wirkung der kinästhetischen Rückmeldung anzuführen, die unter dynamischem Aspekt eine ähnliche Wirkung zeigt wie die haptische Rückmeldung des aktiven Stellteils. Auch Eckstein (2001) konnte mit seinem real aufgebauten Fahrzeug mit aktiver Sticksteuerung unter extremen Fahrbedingungen (Glatteis) keinen Vorteil dieses Konzeptes für die Regelungen im fahrdynamischen Grenzbereich feststellen. Er empfiehlt deshalb, auf jeden Fall die autonome Regelung auf Stabilisierungsebene durch gesplitteten Bremseingriff zu unterlegen, wie er beispielsweise bei ESP gegeben ist.

Die Vereinigung der zwei Dimensionen des Fahrens in einem zweidimensionalen Bedienelement in Form eines Sidesticks hat auch Nachteile. So schildert Penka (2000), dass bei dem in seinen Versuchen rechts vom Fahrer angebrachten Stick beim Bremsen regelmäßig ein Nach-links-ziehen des Fahrzeugs beobachtet wurde. Er führt dies darauf zurück, dass der Fahrer in der Notsituation dazu neigt, den Stick an sich zu ziehen (siehe Abb. 6.57).

Es wurden immer wieder alternative Vorschläge zu der konventionellen Lenkradbedienung gemacht, welche die Zweidimensionalität ohne die Nachteile der Stickbedienung berücksichtigen. So wird schon 1985 ein Vorschlag von Lammel zitiert (Bubb 1985), bei dem die beiden mechanisch verbundenen drehbaren tellerartigen Handgriffe für die Querführung sorgen; die Längsführung erfolgt durch die Verschiebung des in der Mittelkonsole beweglich geführten Hebels (Abb. 6.58). Als ein

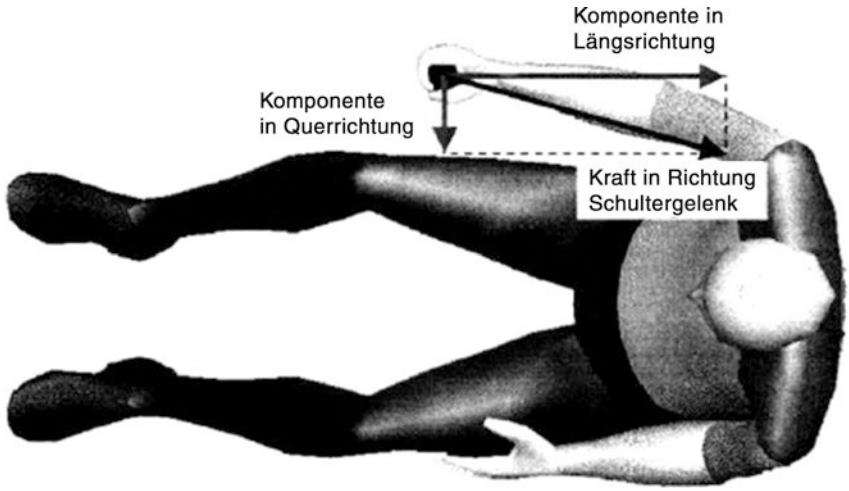


Abb. 6.57 Reaktionsrichtung des Fahrers bei kritischen Situationen (Penka 2000)

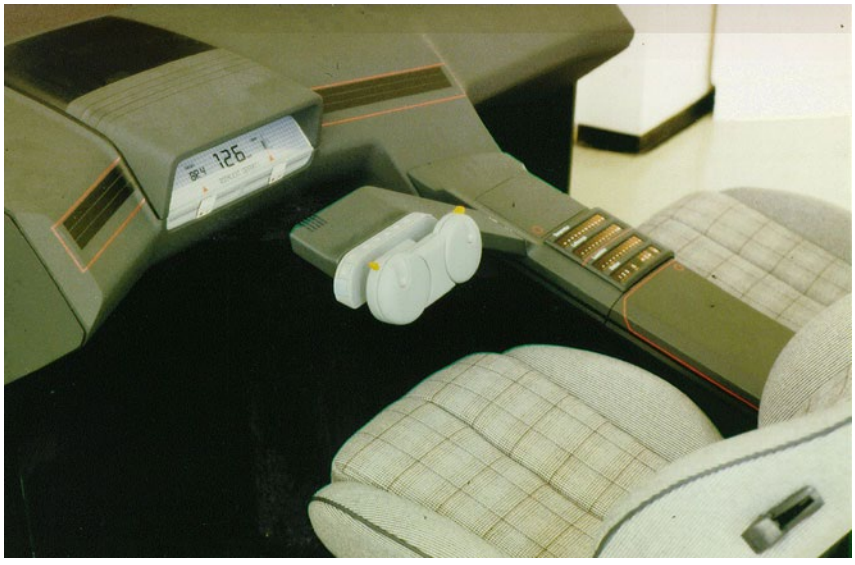


Abb. 6.58 Fahrerarbeitsplatz mit aktivem Bedienelement nach einem Designvorschlag von Lammel (Bubb 1985)

weiteres Beispiel sei das gemeinsam von den Firmen Bertone, SKF und Brembo entwickelte Drive-by-wire-Konzeptfahrzeug Filo genannt. Mit dessen Bedienelement kann mit zwei gleichsinnig mechanisch gekoppelten Griffen gelenkt werden (Abb. 6.59). Beim Drehen des Griffs wird wie beim Motorrad Gas gegeben. Durch Zusammendrücken der Griffe wird das Fahrzeug gebremst. Das Bedienelement ist in der Querführung aktiv und in Längsführung passiv realisiert (zitiert nach Huang 2004). Gegenwärtig wird am Lehrstuhl für Ergonomie der TUM ein System – „Yoke" genannt – erprobt, das wie das aus dem Flugzeug bekannte Steuerhorn gedreht und für die Längsführung vor- und zurückgeschoben werden kann. Beide Bediendimensionen sind aktiv ausgelegt. Dieses Bedienelement erreicht bei den Probanden subjektiv ähnliche Akzeptanz wie das Lenkrad, zeigt mit diesem vergleichbare Leistungen und wird dem Joystick eindeutig vorgezogen (Kienle 2014).

Im Hinblick auf die zunehmende Entwicklung von Assistenzsystemen sind solchen die Längs- und Querführung integrierenden Systemen durchaus theoretische Vorteile zuzuweisen (Naab und Reichart 1994). So haben z. B. radargestützte automatische Abstandshaltesysteme (ACC, Distronic)

Abb. 6.59 Filo-Bedienelement für Längs- und Querführung von Bertone und SKF 2001)

den systemergonomischen Nachteil, keine haptische Rückmeldung über den Antriebs- bzw. Bremszustand des Fahrzeugs liefern zu können. Das bereits erwähnte „aktive Gaspedal" liefert nur Information über die Notwendigkeit „Gas wegzunehmen", ein eingeleiteter Bremsvorgang kann nicht angezeigt werden (wie auch heute schon bei Nutzung des ACC der Fahrer im Unklaren darüber gelassen wird, ob nur die Motorbremse wirksam ist oder schon aktiv gebremst wird[46]). Das Aktive Stellteil würde dem gegenüber diese Information haptisch unmittelbar vermitteln und zudem wäre, falls aus menschlicher Sicht der Empfehlung des Assistenzsystems entgegen gehandelt werden muss, diese einfach richtungskompatibel zu überdrücken. Noch bedeutender wird diese Überlegung in Verbindung mit einem Assistenzsystem für die Spurhaltung. Penka (2000) hat deshalb am Simulator verschiedene Situationen untersucht, die ein Übersteuern von Assistenzsystemen notwendig machen. Sie zeigen, dass das aktive Stellteil unter solchen Bedingungen generell eine größere Akzeptanz erhält als die konventionelle Bedienung. Allerdings wird gegenüber den Assistenzsystemen ganz allgemein ein gewisses Misstrauen gehegt, sodass der konventionellen Bedienung – wegen seiner größeren Vertrautheit – trotzdem der Vorzug gegeben wird.

Trotz dieser einschränkenden Befunde lohnt es sich, mit Blick auf die zukünftige Entwicklung von Assistenzsystemen, durch die ein künstlicher dynamischer Schutzwall um das in Bewegung befindliche Fahrzeug aufgebaut wird (siehe Labahn und Boehlau 2001), sich mit dem Aktiven Stellteil in dieser oder jener Ausführungsform auseinanderzusetzen, ergibt sich doch dadurch die Chance, das Eindringen des eigenen Fahrzeugs in diesen Schutzwall unabhängig von der jeweiligen Fahrsituation immer auf gleiche Weise situationsadäquat über den haptischen Sinneskanal an den Fahrer rückzumelden. Wie dargelegt, werden dadurch nicht nur schnellere Reaktionen möglich, sie sind wegen der Konformität zu den inneren Modellen aus dem Alltagserleben zudem intuitiv richtig. Zudem können jederzeit die technischen Empfehlungen ohne irgendwelches Umdenken übersteuert werden. Der Fahrer bleibt also trotz Assistenz Herr der Situation.

Pfeffer und Harrer (2013) geben allerdings auch zu bedenken, dass bis auf die zuletzt erwähnten Einschränkungen hinsichtlich der Längsführung mittels der Überlagerungslenkung für das Bediengefühl die gleichen Effekte erzielt werden können wie beim aktiven Bedienelement. Im Hinblick auf die fragliche gesetzliche Freigabe von reiner Steer-by-Wire-Technik und die Akzeptanz der Kundschaft sehen sie für die hier dargestellte X-by-Wire-Auslegung in naher Zukunft eher keine Anwendung.

Aus ergonomischer Sicht ist bei alledem aber auch die optische Rückmeldung (nach Möglichkeit im kontaktanalogen HUD) über die Art des Eingriffs notwendig, denn wie Lange (2007) als Resümee aus seinen Experimenten feststellt, sollte der

46 Es wäre hier übrigens schon ein Vorteil, wenn das Aufleuchten der Bremsleuchten im Cockpit rückgemeldet werden würde.

Fahrer *haptisch* vermittelt bekommen, *was* er zu tun hat und *optisch, warum* dies notwendig ist.

Literatur

Verwendete Literatur

Ablassmeier, M.: Multimodales, kontextadaptives Informationsmanagement im Automobil. Dissertation an der Technischen Universität München (2009)

Arlt, F.: Untersuchung zielgerichteter Bewegungen zur Simulation mit einem CAD-Menschmodell. Dissertation an der Technischen Universität München (1999)

Assmann, E.: Untersuchung über den Einfluss einer Bremsweganzeige auf das Fahrerverhalten. Dissertation an der Technischen Universität München (1985)

Bechstedt, U., Bengler, K., Thüring, M.: Randbedingungen für die Entwicklung eines idealen Nutzermodells mit Hilfe von GOMS für die Eingabe von alphanumerischen Zeichen im Fahrzeug. In: Urbas, L., Steffens, C. (Hrsg.) Zustandserkennung und Systemgestaltung VDI-Fortschritt-Berichte, Bd. Reihe 22, Bd. 22, S. 125–130. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2005)

Bengler, K.: Automotive Speech-Recognition - Success Conditions Beyond Recognition Rate. Proc. LREC 2000. European Language Resources Association, Athens, S. 1357–1360 (2000)

Bengler, K.: Aspekte der multimodalen Bedienung und Anzeige im Automobil. In: Jürgensohn, T., Timpe, K.-P. (Hrsg.) Kraftfahrzeugführung, S. 195–206. Springer, Berlin, Heidelberg, New York (2001)

Bengler, K.: Potenzial von MMK-Technologien für zukünftige Fahrzeug-Bedienkonzepte. In: Fastl, H., Fruhmann, M. (Hrsg.) Fortschritte der Akustik: Tagungsband und CD-ROM der 31. Deutschen Jahrestagung für Akustik, DAGA 2005, München, Bd. I und II, DEGA, Berlin (2005)

Bengler, K., Bubb, H., Totzke, I., Schumann, J., Flemisch, F.: Automotive. In: Sandl, P., Stein, M. (Hrsg.) Information Ergonomics - A theoretical approach and practical experience in transportation. Springer, Berlin, Heidelberg (2012)

Bengler, K., Haller, R., Zimmer, A.: Experimental optimization of route-guidance information using context information. In: ERTICO (Hrsg.) Proceedings of the First World Congress on Applications of Transport Telematics and Intelligent Vehicle-Highway Systems, S. 1758–1765. Artech House, Boston (1994)

Bengler, K., Huesmann, A., Praxenthaler, M.: Investigation of Visual Demand in a Static Driving Simulator within the ADAM Project Proceedings of the Annual Spring Conference of the Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (GfA). ergonomia Verlag, München, S. 49–52 (2003)

Bengler, K., Noszko, T., Neuss, R.: In: Usability of Multimodal Human-Machine-Interaction while Driving Proceedings of the 9-th World Congress on ITS, CDRom, 9th World Congress on Intelligent Transport Systems, ITS America, Bd. 10/2002 (2002)

Bengler, K., Praxenthaler, M., Theofanou, D., Eckstein, L.: Investigation of Visual Demand in Different Driving Simulators within the ADAM Project Driving Simulator Conference 2004 Europe, Paris. Proceedings., S. 91–104 (2004)

Bergmeier, U.: Kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem Entwicklung und experimentelle Absicherung. Dissertation, Technische Universität München (2009)

Bernotat, R.: Anzeigengestaltung. In: Schmidtke, H. (Hrsg.) Ergonomie. Hanser Verlag, München, Wien (1993)

Bertone; SKF: Filo-Präsentations-CD (2001)

Bielaczek, C.: Untersuchung zur Auswirkung einer aktiven Fahrerbeeinflussung auf die Fahrsicherheit beim Pkw-Fahren im realen Straßenverkehr Fortschritts-Bericht VDI, Reihe 12, Bd. 35. VDI-Verlag, Düsseldorf (1998)

Bieniek, E.-M.: Untersuchung zur Akzeptanz verschiedener mechanischer Fahrersitzverstellmöglichkeiten in Personenkraftwagen. Diplomarbeit an der Philosophisch-Pädagogischen Fakultät der Katholischen Universität Eichstätt (1990)

Bill, K.H., Leber, M., Becker, H., Breuer, B.: Forschungswerkzeug zur Untersuchung der Schnittstelle Fahrer/Bremspedal. Automobiltechnische Zeitschrift **101**(2), 86–93 (1999)

Blattner, A., Bengler, K., Hamberger, W.: Optimized Combination of Operating Modalities and Menu Tasks for the Interaction between Driver and Infotainment-System using a Touchpad with Haptic Feedback. In: Stanton, N. (Hrsg.) Advances in human aspects of road and rail transportation, S. 13–19. CRC Press, Boca Raton, FL (2013)

Bolte, U.: Das aktive Stellteil - ein ergonomisches Bedienkonzept Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 17 „Biotechnik". VDI-Verlag, Düsseldorf (1991)

Borg, G.: A category scale with ratio properties for intermodal and interindividual comparison. In: Geisler, H.G., Petzold, P. (Hrsg.) Psychophysical Judgement and the Process of Perception, S. 25–34. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaft, Berlin (1982)

Bouis, D., Haller, R., Geiser, G., Heintz, F., Knoll, P.M.: Ergonomische Optimierung von LCD-Anzeigen im Kraftfahrzeug (1983). Proc. ISATA

Braess, H.-H., Donges, E.: Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen – „Konsumierbare" oder echte Verbesserungen? Tagung „Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz", Garching b. München, 4.-5. April, 200. (2006)

Braun, M.: Ergonomische Untersuchung zur Akzeptanz eines kombinierten Fahr-/Bremspedals. Institut für Nachrichtensysteme der Universität Karlsruhe, durchgeführt in der Forschungsabteilung F1M/Fa der Daimler-Benz AG. Stuttgart (1993)

Breuer, J., Bengler, K., Heinrich, C., Reichelt, W.: Development of advanced driver attention metrics (ADAM). In: Strasser, H., Kluth, K., Rausch, H., Bubb, H. (Hrsg.) Quality of Work and Products in Enterprises of the Future Proceedings of the 50th – Anniversary Conference of the GfA and the XVII Annual ISOES Conference in Munich, 2003. S. 37–40. Ergonomia, Stuttgart (2003)

Bubb, H.: Untersuchung über die Anzeige des Bremsweges im Kraftfahrzeug. Dissertation, Technische Universität München (1975)

Bubb, H.: The Influence of Braking Distance Indication on Driver's Behaviour. In: Oborne, D.J., Levis, J.A. (Hrsg.) Human Factors in Transport Research, Bd. II, S. 388–346. Academic Press, London and New York (1981)

Bubb, H.: Arbeitsplatz Fahrer – Eine ergonomische Studie. Automobil Industrie **30**, 265–275 (1985)

Bubb, H., Bolte, U.: Einfluss der fahrdynamischen Kräfte auf die haptische Rückmeldung bei konventionellen Bedienelementen und bei Aktiven Bedienelementen. Mitteilung Lehrstuhl für Ergonomie. TU München, (Interner Bericht) (1987)

Buschardt, B.: Synthetische Lenkmomente Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 22, Bd. 12. VDI-Verlag, Düsseldorf (2003)

Byblow, W.D.: Effects of redundancy in the comparison of speech and pictorial display in the cockpit environment. Applied Ergonomics **21**(2), 121–128 (1990)

Damböck, D.: Automationseffekte im Fahrzeug - von der Reaktion zur Übernahme, Dissertation, Technische Universität München (2013)

Dick, M.: Auf den Spuren der Motive, Auto zu fahren - Die Perspektive der Fahrenden. Verkehrszeichen **18**(4), 9–16 (2002)

Diefenbach, S., Hassenzahl, M. (Hrsg.): Handbuch zur Fun-ni Toolbox – User Experience Evaluation auf drei Ebenen. Abschlussbericht, Förderkennzeichen 01ISO9007. Universität der Künste, Folkwang (2010)

DIN EN 19 60000: DIN EN 196000:1992/A1: 2001: Deutsche Industrie Norm, Beuth-Verlag, 2001 (2001)

Donges, E.: Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. Automobil-Industrie 27(2), 183–190 (1982)

Eberl, T.: Charakterisierung und Gestaltung des Fahr-Erlebens der Längsführung von Elektrofahrzeugen. Dissertationsschrift an der Technischen Universität München (2014)

Eckstein, L.: Entwicklung und Überprüfung eines Bedienkonzepts und von Algorithmen zum Fahren eines Kraftfahrzeugs mit aktiven Sidesticks Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 12, Bd. 471. VDI-Verlag, Düsseldorf (2001)

Egger, T.: Berechnungen und experimentelle Untersuchungen zur indirekten Sicht aus Kraftfahrzeugen. Dissertation an der Technischen Universität München (1990)

Fricke, N.: Gestaltung zeit- und sicherheitskritischer Warnungen im Fahrzeug. Dissertationsschrift Technische Universität Berlin (2009)

Friedrich, H., Hoffmann, J., Kreft, J., Semmler, C., Witte, B.: Auf dem Weg zum intelligenten Auto – Steer-by-Wire als Basis zukünftiger Assistenzfunktionen. In: VDI (Hrsg.) Der Fahrer im 21. Jahrhundert VDI-Berichte, Bd. 1613, S. 277–296. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf (2001)

Fujinami, H., Yamamoto, M., Hisaoka, Y.: Vehicle Response and Drivers' Feeling. Toyota Technical Review **45**(1), (1995)

Gengenbach, W.: Experimentelle Untersuchung von Reifen auf nasser Fahrbahn. ATZ **70**(8 und 9), 83–89 (1968)

Gillet, G.: Ergonomische Optimierung eines Aktiven Stellteils. Dissertation an der Technischen Universität München (1998)

Göktan, A.G.: Optimale Bremspedal-Kraft-Weg-Charakteristiken bei Pkw-Bremsanlagen. Automobil-Industrie 32(2), 161–169 (1987)

Gold, C., Damböck, D., Lorenz, L., Bengler, K.: „Take over!" How long does it take to get the driver back into the loop? Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting September **57**, 1938–1942 (2013). doi:10.1177/1541931213571433

Goldstein, E.B.: Sensation and perception. Wadsworth Cengage Learning, Belmont, CA (2009)

Götz, M.: Die Gestaltung von Bedienelementen unter dem Aspekt ihrer kommunikativen Funktion. Dissertation an der Technischen Universität München (2007)

Gough, V.E.: Reibung von Gummi. Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (19), 22 (1962)

Grote, G.: Autonomie und Kontrolle: Zur Gestaltung automatisierter und risikoreicher Systeme. Vdf, Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich (1997)

Hackenberg, U., Heißing, B.: Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkeh. Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) **84**(7/8), 341–345 (1982)

Haider, E.: Beurteilung von Belastung und zeitvarianter Beanspruchung des Menschen bei kompensatorischen Regeltätigkeiten: Simulationen- Feldstudien- Modelle Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften. Biotechnik, Bd. 17. VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 3–18 (1977)

Hamberger, W., Gößmann, E.: Bedienkonzept Audi: die nächste Generation. In: VDI Wissenforum GmbH (Hrsg.) Elektronik im Kraftfahrzeug VDI-Berichte, Bd. 2075, S. 677–686. VDI-Verlag, Düsseldorf (2009)

Hamberger, W.: MMI Touch - New Technologies for New Control Concepts. In: IQPC (Hrsg.) Automotive Cockpit HMI. Steigenberger Graf Zeppelin, Stuttgart (2010)

Harrer, M.: Steering System Development in Premium Car Segment (2006). SAE 2006-01-0935

Harrer, M.: Auslegung von Lenkungen. In: Pfeffer, P., Harrer, M. (Hrsg.) Lenkungshandbuch – Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen, 2. Aufl. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer, Wiesbaden (2013)

Hassenzahl, M., Eckoldt, K., Thielsch, M.T., et al.: User Experience und Experience Design– Konzepte und Herausforderungen. In: Brau, H. (Hrsg.) Usability Professionals 2009. Fraunhofer Verlag, Stuttgart (2009)

Heißing, B., Brandl, J.: Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens. Vogel, Würzburg (2002)

Heißing, B., Kudritzki, D., Schindlmaister, R., Mauter, G.: Menschengerechte Auslegung des dynamischen verhaltens von Pkw. Erschienen. In: Bubb, H. (Hrsg.) Ergonomie und Verkehrssicherheit: Beiträge der Herbstkonferenz der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. Herbert Utz Verlag GmbH, München (2000)

Hofmann, M., Bengler, K., Lang, M.: Ein Assistenzsystem zur fahrer- und situationsadaptiven Prädiktion potenzieller Zielorte für eine robuste Interaktion mit sprachgesteuerten

Navigationssystemen Elektronik im Kraftfahrzeug. VDI-Berichte, Bd. 1646. VDI-Verlag, Düsseldorf (2001)
Huang, P.: Regelkonzepte zur Fahrzeugführung unter Einbeziehung der Bedienelementeigenschaften. Dissertation, Lehrstuhl für Ergonomie, TU München (2004)
ISO 15008: „Ergonomic aspects of transport information and control systems—visual presentation of information," (2009)
Israel, B.: Potenziale eines kontaktanalogen Head-up Displays für den Serieneinsatz. Dissertation an der Technischen Universität München (2013)
Jürgensohn, T.: Hybride Fahrermodelle, 1. Aufl. Pro-Universitate-Verlag, Sinzheim (1997)
Kienle, M.: Anzeige-Bedienkonzept hochautomatisierter Fahrzeuge – vom manuellen zum hochautomatisierten Autofahren. Dissertationsschrift an der Technischen Universität München (2014)
König, W., Weiss, K.E., Gehrke, H., Haller, R.: S.A.N.T.O.S Situationsangepasste und nutzertypzentrierte Optimierung von Systemen zur Fahrerunterstützung GfA Herbstkonferenz über Ergonomie und Verkehrssicherheit, Technische Universität München, 12.-13.10.2000. (2000)
Kosaka, H., Watanabe, K.: Reaction Forces of Switches and Push Feeling. Automotive Design Avancements in Human Factors: Improving Drivers´ Comfort and Performance. SAE, Warrendale, S. 169–174 (1996). Publication No.SP-1155
Kühner, M.: Haptische Unterscheidbarkeit mechanischer Parameter bei rotatorischen Bedienelementen. Dissertation an der Technischen Universität München (2014)
Kühner, M., Wild, J., Bubb, H., Bengler, K., Schneider, J.: Haptic perception of viscous friction of rotary switches. In: Jones, L.A., Harders, M., Yokokohji, Y. (Hrsg.) IEEE World Haptics Conference WHC 2011, Istanbul, Turkey, 21-24 June 2011. S. 587–591. IEEE Computer Society, Piscataway, N.J. (2011)
Kushiro, I. et al. (2008): A New Approach in the Study On-Center-Handling. Paper 20080432, AVEC (zitiert aus Wolf, 2009).
Labahn, N., Boehlau, C.: Unterstützung des Fahrers durch Umweltsensorik und intelligente Lichtsteuerung. In: VDI (Hrsg.) Der Fahrer im 21. Jahrhundert VDI-Berichte, Bd. 1613, S. 315–332. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2001)
Lange, C., Schmitt, G., Arcati, A., Bengler, K., Bubb, H.: Haptic gear shifting indication: Naturalistic driving study for parametrization, selection of variants and to determine the potential for fuel consumption reduction, In: Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, Miami (17.–20. Juli 2010)
Lange, C.: Wirkung von Fahrerassistenz auf der Führungsebene in Abhängigkeit der Modalität und des Automatisierungsgrades. Dissertation an der Technischen Universität München (2007)
Lorenz, S.: Assistenzsystem zur Optimierung des Sitzkomforts im Fahrzeug. Dissertation an der Technischen Universität München (2011)
McKenzie, C.L.: A note on information-theoretic basic for Fitt's law. Journal of Motor Behavior **21**, 323–330 (1989)
McKenzie, C.L., Paulignan, Y., Marteniuk, R., Jeannerod, M.: The coupling of arm and finger movements during prehension. Experimental Brain Research **79**, 432–435 (1990)
Meyer-Eppler: Grundlagen und Anwendungen der Informationstheorie. Springer-Verlag, Berlin (1959)
Michon, J.A.: Generic Intelligent Driver Support. Taylor & Francis, London. (1993)
Müller, F.: Realisierung eines Fahrzeugführungskonzeptes mit Steuerknüppel im BMW Fahrsimulator. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Ergonomie, TU München (1999)
Müller, T., Hajek, H., Radić-Weißenfeld, L., Bengler, K.: Can You Feel The Difference? The Just Noticeable Difference of Longitudinal Acceleration September 2013. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting., S. 1219–1223 (2013)
Müller, T., Hajek, H., Frank, T., Bengler, K.: Das menschliche Auflösungsvermögen von Dynamikveränderungen im Fahrzeug Conference on Future Automotive Technology, Garching b. München, 17-18. März 2014. (2014)
Murrel, K.: Ergonomics. Chapman and Hall, London (1969)
Naab, K., Reichart, G.: Driver assistance system for lateral and longitudinal vehicle guidance—heading control and active cruise support. In: Proceedings of International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC '94) Tsukuba, Japan. S. S449–S454 (1994)
Norman, D.: Categorization of Action Slips. Psychological Review **88**, 1–15 (1981)
Norman, D.: New Views in Information Processing: Implications for Intelligent Decision Support Systems. In: Hollnagel, E., Manchini, G., Woods, D.D. (Hrsg.) Intelligent Decision Support in Process Environments. Springer-Verlag, Berlin (1986)
Norman, D.: The Psychology of Everyday Things. Basic Books, New York, S. 8–10 (1988)
Osumi, Y., Inuzuka, Y., Hideichi, I.: Operability of Car Audio Controls. In: Countdown to the 21st Century Proceedings of the Human Factors Society 34th Annual Meeting, Orlando (USA), Bd. 1, S. 618–622. The Human Factors Society, Santa Monica, California (1990)
Oviatt, S.: Ten Myths of Multimodal Interactio. Communications of the ACM **42**(11), 74–81 (1999)
Oviatt, S.: Multimodal System Processing in Mobile Environments. In: Proceedings of 6th International Conference on Spoken Language Processing (ICSLP 2000) Beijing, China, October 16-20, 2000. (2000)
Parkes, A., Franzen, S.: Driving Future Vehicles. Taylor & Francis, London. (1993)
Penka, A. (2000): Vergleichende Untersuchung zu Fahrerassistenzsystemen mit unterschiedlichen aktiven Bedienelementen. Dissertation an der Technischen Universität München.
Petermann, F.: Entspannungsverfahren, 4. Aufl. Beltz, PVU, Weinheim (2009)
Petermann-Stock, I., Hackenberg, L., Muhr, T., Mergl, C.: Wie lange braucht der Fahrer?: Eine Analyse zu Übernahmezeiten aus verschiedenen Nebentätigkeiten während einer

hochautomatisierten Staufahrt 6. Tagung Fahrerassistenzsysteme, München. (2013)
Petit, C., Priez, A., Brigout, C., et al.: Driver's Use of ABS in Emergency. A Physiological an Behavioral Trail Proceedings of the ISATA Conference. (1993)
Pfeffer, P.: Lenkgefühl, Interaktion Fahrer- Fahrzeug. In: Pfeffer, P., Harrer, M. (Hrsg.) Lenkungshandbuch – Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen, 2. Aufl. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer, Wiesbaden (2013)
Pfeffer, P., Harrer, M.: Ausblick – Zukunft der Lenkung im Automobil. In: Pfeffer, P., Harrer, M. (Hrsg.) Lenkungshandbuch – Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen, 2. Aufl. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer, Wiesbaden (2013)
Pöppel, E.: Grenzen des Bewußtseins - Wie kommen wir zur Zeit und wie entsteht Wirklichkeit? Insel Taschenbuch, Frankfurt a.M. und Leipzig (2000)
Poulton, E.C.: Tracking Skill and Manual Control. Academic Press, New York. (1974)
Pruckner, A.: Steer-by-Wire. In: Pfeffer, P., Harrer, M. (Hrsg.) Lenkungshandbuch – Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen, 2. Aufl. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer, Wiesbaden (2013)
Rassl, R.: Ablenkungswirkung tertiärer Aufgaben im Pkw - Systemergonomische Analyse und Prognose. Dissertation an der Technischen Universität München (2004)
Reinig, H.J.: Anthropometrische Untersuchung von Schriftzeichen im öffentlichen Personenverkehr. ETR 12(26), 843-847 (1997)
Reisinger, J.: Haptik von Bedienelementen. Ergonomie Aktuell 07, 29–34 (2007)
Reisinger, J. (2009): Parametrisierung der Haptik von handbetätigten Stellteilen. Dissertation an der Technischen Universität München.
Reisinger, J., Wild, J.: Haptische Bedienschnittstelle. In: Meroth, A., Tolg, B. (Hrsg.) Informationssysteme im Kraftfahrzeug. Grundlagen, Komponenten, Systeme und Anwendungen, 1. Aufl. Vieweg, Wiesbaden (2007). Kap. 6
Remlinger, W., Bubb, H., et al.: Erweiterte Möglichkeiten der Sichtanalyse mit dem Menschmodell RAMSIS. In: Grandt, M., Bauch, A. (Hrsg.) Simulationsgestützte Systemgestaltung DGLR-Bericht, Bd. 2007-04, S. 189–198. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt e.V., Bonn (2007)
Remlinger, W. M.: Analyse von Sichteinschränkungen im Fahrzeug. Dissertation an der Technischen Universität München (2013)
Reuter, M., Saal, A.: Überlagerungslenkung. In: Pfeffer, P., Harrer, M. (Hrsg.) Lenkungshandbuch – Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen, 2. Aufl. ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer, Wiesbaden (2013)
Rockwell, T., Snider, J.: An Investigation of Variability in Driving Performance on the Highway: Final Report. Ohio State University, Columbus, Ohio (1965)
Rühmann, H.: Schnittstellen in Mensch-Maschine-Systemen. In: Schmidtke, H. (Hrsg.) Ergonomie. Hanser Verlag, München (1993)
Sacher, H.: Gesamtheitliche Analyse des Bedienverhaltens von Fahrzeugfunktionen in der täglichen Nutzung. Dissertation an der Technischen Universität München (2009)
Samper, K., Kuhn, K.-P.: Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durch ein vorausschauendes Assistenzsystem. In: VDI (Hrsg.) Der Fahrer im 21. Jahrhundert VDI-Berichte, Bd. 1613, S. 79–94. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2001)
Sato, H., Haraguchi, J., Osawa, I.: Experimental Analysis of Steering Response Characteristics and Steering Feeling. Japan SAE Review **44**(3), 52–58 (1990)
Schallamach, A.: Mechanik der Reifenabnutzung. ATZ **63**(2), 56 (1961)
Schmid, M., Maier, T.: Ergonomie versus Ästhetik? Die funktionale und formale Integration im Fahrzeugcockpit. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft **2**(3), 129–139 (2012). Ergonomia Verlag Stuttgar
Schmidtke, H., Rühmann, H.: Zentralverschlußhebel und Zentralverschlußräder. In: BWB (Hrsg.) Handbuch der Ergonomie. Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, München (1989). Abschnitt C-11.1.2 und C-11.1.3
Schneid, M.: Entwicklung und Erprobung eines kontaktanalogen Head-up-Displays im Fahrzeug. Dissertation an der Technischen Universität München (2009)
Schweigert, M.: Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben. Dissertation an der Technischen Universität München (2003)
Siegel, L., Bundorf, R.T.: Variable Stability Auto tests Behavior of Vehicles before they are built. SAE Journal 06–01, 88–91 (1966)
Spies, R.: Entwicklung und Evaluierung eines Touchpadbedienkonzeptes mit adaptiv haptisch veränderlicher Oberfläche zur Menübedienung im Fahrzeug. Dissertation an der Technischen Universität München (2013)
Spies, R., Blattner, A., Horna, G., Bubb, H., Hamberger, W.: Entwicklung einer aufgabenorientierten Menüstruktur zur Infotainmentbedienung während der Fahrt. In: Lichtenstein, A., Stößel, C., Clemens, C. (Hrsg.) Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 22, Bd. 29, S. 411–416. VDI-Verl., Düsseldorf (2009)
Spies, R., Horna, G., Bubb, H., Bengler, K., Hamberger, W.: Haptisches Touchpad – Zentrales Infotainmentbedienteil mit adaptiv haptisch veränderlicher Oberfläche. Neuer Arbeits- und Lebenswelten 56. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. GfA Press, Dortmund (2010)
Thoma, S.: Mensch-Maschine-Interaktionskonzepte für Fahrerassistenzsysteme im Kreuzungsbereich. Dissertation an der Technischen Universität München (2010)
Treisman, A., Gelade, G.: A feature integration theory of attention. Cognitive Psychology **12**, 97–136 (1980)
Vaas, R.: Zeit und Gehirn. Online-Lexikon der Neurowissenschaft (2005). http://www.wissenschaftonline.de/abo/lexikon/neuro/14651.http://www.wissenschaft-online.de/abo/lexikon/neuro/14651, Zugegriffen: 27.06.2005
Wang, X.G., Mick, F., Vernet, M., Fraigneau, F.: Experimental Investigation of the Relationship between the Sensation and the Force Applied to a Pedal. In: Ozok, A.F., Salvendy, G. (Hrsg.) Advances in Applied Ergonomics, S. 572–575. USA Publishing, West Lafayette, India, USA (1996)

Weber, R., Persch, H.G.: Seitenkraftfrequenzgänge von Luftreifen – Ein Beitrag zum Verhalten bei instationärem Schräglauf. ATZ **77**(2), 44 (1975)
Webhofer, G.: Implementation und Inbetriebnahme einer Regelung für ein Aktives Lenksystem. Diplomarbeit, TU München, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeuge (1991)
Weir, D., Colgate, J., Peshkin, M.: The Haptic Profile: Capturing the Feel of Switches. In: Proceedings of the 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'04) (2004)
Wolf, H.: Ergonomische Untersuchung des Lenkgefühls an Personenkraftwagen. Dissertation an der Technischen Universität München (2009)
Woodson, W.E.: Human Factors Design Handbook. Verlag McGraw-Hill, New York (1992)

6

Weiterführende Literatur

Akamatsu, M., Green, P., Bengler, K.: Automotive Technology and Human Factors Research: Past, Present, and Future. International Journal of Vehicular Technology (2013). Volume 2013 (2013), Article ID 526180, 27 pages
Aurell, J., Fröjd, N., Nordmark, S.: Correlation between Objective Handling Characteristics and Subjective Perception of Handling Quality of Heavy Vehicle Proc. of the International Symposium on Advanced Vehicle Control AVEC '00. Ann Arbor, S. 105–113 (2000)
Baker, C.A., Grether, W.F.: Visual Presentation of Information. WADC.Report No. TR 54-160
Bernstein, A., Bader, B., Bengler, K., Kuenzner, H.: Visual-Haptic Interfaces in Car Design at BMW. In: Grunwald, M. (Hrsg.) Human Haptic Perception - Basics and Applications. Birkhäuser, Berlin, Basel, Boston (2008)
Blattner, A.: Bedienkonzeptentwicklung für Fahrerinformationssysteme basierend auf einem Touchpad mit haptischer Rückmeldung. Dissertation, Technische Universität München (2014)
Dettki, F.: Methoden zur Bewertung des Geradeauslaufs von Pkw VDI-Berichte, Bd. 1133. VDI-Verlag, Düsseldorf (1997)
Haslbeck, A., Popova, S., Krause, M., Pecot, K., Mayer, J., Bengler, K.: Experimental Evaluations of Touch Interaction Considering Automotive Requirements. In: Jacko, J.A. (Hrsg.) Human-Computer Interaction. Interaction Techniques and Environments 14th International Conference, HCI International 2011, Orlando, FL, USA, July 9-14, 2011. Lecture Notes in Computer Science, Bd. 6762, S. 23–32. Springer, New York (2011). Proceedings, Part II
Ho, C., Spence, C.: The Multisensory Driver: Implications for Ergonomic Car Interface Design. Ashgate Pub Co., Aldershot (2008)
Jaksch, F.O.: The Steering Characteristics of the Volvo Concept Car VIII. ESV-Conference, Wolfsburg, Oktober 1980 (1980)
Jaksch, F.O.: Vehicle Parameter Influence on Steering Control Characteristics. International Journal of Vehicle Design 4(2), 171–194 (1983)
Lange, C.: Fähigkeiten und Defizite der „Silver-Generation". Unveröffentlichter Bericht für die Audi-AG (2008)
Lange, C., Arcati, A., Bubb, H., Bengler, K.: Haptic gear shifting indication: Naturalistic driving study for parametrization, selection of variants and to determine the potential for fuel consumption reduction. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics Miami, 17.-20. Juli 2010. (2010)
Totzke, I., Huth, V., Krüger, H.-P., Bengler, K.: Overriding the ACC by keys at the steering wheel: Positive effects on driving and drivers' acceptance. In: Human Factors for Assistance and Automation, S. 153–164. Shaker, Maastricht (2008)
Trübswetter, N., Bengler, K.: Why Should I Use ADAS? Advanced Driver Assistance Systems and the Elderly: Knowledge, Experience and Usage Barriers. In: Proceedings of the Seventh International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design (2013)

Anthropometrische Fahrzeuggestaltung

Heiner Bubb, Rainer E. Grünen, unter Mitarbeit von Wolfram Remlinger

7.1 Fahrzeugpackaging – 347
7.1.1 Zielsetzung des anthropometrischen Package – 347
7.1.2 PKW-Maßkonzeption nach SAE – 350
7.1.3 Arbeitsfelder der anthropometrischen Ergonomie – 354

7.2 Sitzen – 360
7.2.1 Berücksichtigung unterschiedlicher Anthropometrien – 360
7.2.2 Fahrer – 363
7.2.3 Rechtslenkerproblematik – 386
7.2.4 Beifahrer – 393
7.2.5 Fahrzeugfond – 393

7.3 Sicht – 396
7.3.1 Direkte Sicht – 396
7.3.2 Indirekte Sicht – 408
7.3.3 Sicht auf Bedien- und Anzeigekomponenten – 410
7.3.4 Reflexionen – 413

7.4 Bedien- und Anzeigekomponenten – 418
7.4.1 Bestimmung der Erreichbarkeitsflächen nach SAE – 418
7.4.2 Funktionale Greifräume – 419
7.4.3 Berücksichtigung spezieller Bedienanforderungen – 420

7.5 Raumbedarf – 423
7.5.1 Statischer und dynamischer Raumbedarf – 423
7.5.2 Ablagen – 425
7.5.3 Raumgefühl – 426

7.6 Ein- und Ausstieg – 428
7.6.1 Türkonzepte – 428
7.6.2 Bewegungsstrategien – 432

H. Bubb et al., *Automobilergonomie,* ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-8348-2297-0_7, © Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

7.6.3 Bewertungsmethoden – 439
7.6.4 Zugang zur 2. und 3. Sitzreihe – 450

7.7 Beladen – 452
7.7.1 Geometrie – 452
7.7.2 Bedienbarkeit – 454

7.8 Berücksichtigung spezifischer Nutzergruppen – 455
7.8.1 Ältere Fahrzeugnutzer – 455
7.8.2 Kinder – 462

7.9 Handwerklichkeit – 463

Literatur – 467

7.1 Fahrzeugpackaging

7.1.1 Zielsetzung des anthropometrischen Package

Die Zusammenstellung aller Fahrzeugkomponenten und Baugruppen unter Berücksichtigung ihrer Relativbewegungen und Montagefreiräume ist die klassische Disziplin des Fahrzeugpackage[1]. Ausgehend vom Fahrzeugkonzept des Aufbaus werden die Bauräume der Komponenten wie Motor, Tank und Laderaum prinzipiell angeordnet (◘ Abb. 7.1). Bei gleicher Fahrzeugarchitektur (Unterbau/Plattform) können verschiedene Fahrzeugaufbauten („*Bodystyles*“) verwendet werden (siehe auch ◘ Tab. 7.1). Aus einer viertürigen Stufenhecklimousine werden eine fünftürige Kompaktlimousine, eine Kombilimousine und ein Cabriolet abgeleitet.

Der Mensch und die Abmaße seiner Extremitäten, notwendige Bewegungsfreiräume sowie deren Erreichbarkeitsgrenzen sowie seine Sichtbedingungen stellen die ergonomische Seite im Package dar und werden mit der Fahrzeugarchitektur zu Beginn der Maßkonzeption festgelegt. Der Fahrzeuginnenraum, der prinzipiell den Fahrzeuginsassen vorbehalten ist, wird durch notwendige Baugruppen wie Sitze, Lenkrad und Pedalerie, sowie Instrumententafel, Mittelkonsole und Ablagefächer eingeschränkt. In den verbleibenden bauteilfreien Räumen müssen Fahrer und Passagiere nicht nur genügend Raum zur Unterbringung, sondern auch alle Freiräume zur Gewährleistung des Komforts finden. Dabei ist die Zielgruppe des Marktes, insbesondere die Geschlechterverteilung der Käufer eine ausschlaggebende Größe. Im Zeitalter der Globalisierung ist jedoch eine Berücksichtigung aller relevanten globalen Kunden – vom kleinen Asiaten bis zum großen Mitteleuropäer – eine Grundvoraussetzung für wirtschaftliche Fahrzeugplattformen. Hierzu ist eine Bandbreite an Anthropometrien zu definieren, die es erlaubt, auf allen relevanten Märkten eine vollständige Akkommodation aller angestrebten Kunden zu gewährleisten. Basierend auf einer Fahrzeugspezifikation, der Anzahl der Sitzplätze oder dem Fahrzeugtyp und -segment wird für jeden einzelnen Sitzplatz die Insassenakkommodation festgelegt. Hierbei wird zwischen vollwertigen und kompromittierten Sitzplätzen unterschieden (◘ Abb. 7.2).

Vollwertige Sitzplätze sind uneingeschränkt für alle Zielkunden nutzbar, während die kompromittierten Sitzplätze als Not- oder Bedarfssitze Einschränkungen hinsichtlich des Komfort und der Nutzbarkeit aufweisen. Hier können einerseits die Breite des Sitzes, der zur Verfügung gestellte Beinraum oder andererseits die Kopffreiheit über der Sitzfläche eingeschränkt und damit nur für eine eingeschränkte Kundengruppe nutzbar sein. Coupés oder Cabriolets werden oft als „*2 + 2-Sitzer*“ bezeichnet, wenn neben den zwei vollwertigen Vordersitzen in der hinteren Reihe zwei Bedarfssitze zur Verfügung stehen. Diese Bedarfssitze sind oftmals auch klapp- bzw. versenkbar und können die Anzahl der im Fahrzeug verfügbaren Sitze auf Kosten des Kofferraumvolumens erweitern. So werden Großraumlimousinen mit zwei zusätzlichen Sitzen im Kofferraumboden ausgestattet, die bei Bedarf leicht in Gebrauchsstellung zu bringen sind. Gelegentlich[2] sind die Bedarfssitze auch entgegen der Fahrtrichtung angeordnet, um die Gesamtfahrzeuglänge gering zu halten, indem durch eine Lehne-an-Lehne-Anordnung der Kopfraum der benachbarten Sitzreihen gemeinsam genutzt wird. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass das Fahren mit dem Rücken zur Fahrtrichtung auf solchen Plätzen bei den Passagieren, vor allem bei Kindern, Übelkeit auslösen kann (siehe ▶ Abschn. 3.1.3 und ◘ Abb. 3.11; Simulator-Sickness). Siebensitzige Fahrzeuge („MPV[3]“ oder „

Microvans“) basieren häufig auf fünfsitzigen Kombilimousinen, bei denen im Kofferraum zwei klappbare Bedarfssitze eingebaut sind. Neben der Betrachtung der Insassenunterbringung mit ihrem statischen Raumbedarf sind der dynamische

1 Der Begriff Package in der Automobiltechnik ist von dem des Packaging & Labelling der Verpackungsindustrie zu trennen, wo sich Packaging auf die äußere Hülle, also die Verpackung bezieht, während im Automobilbau damit die Anordnung der inneren Komponenten bezeichnet wird.

2 Beispiele für Fahrzeuge mit entgegen der Fahrtrichtung angeordneten Sitzen: Zündapp Janus 2. Sitzreihe (1957), Mercedes-Benz E-Klasse T Modell 3. Sitzreihe (BR210 1995), Loremo 2. Sitzreihe (Konzept 2006).

3 MPV: Multi Purpose Vehicle; Mehrzwecklimousine.

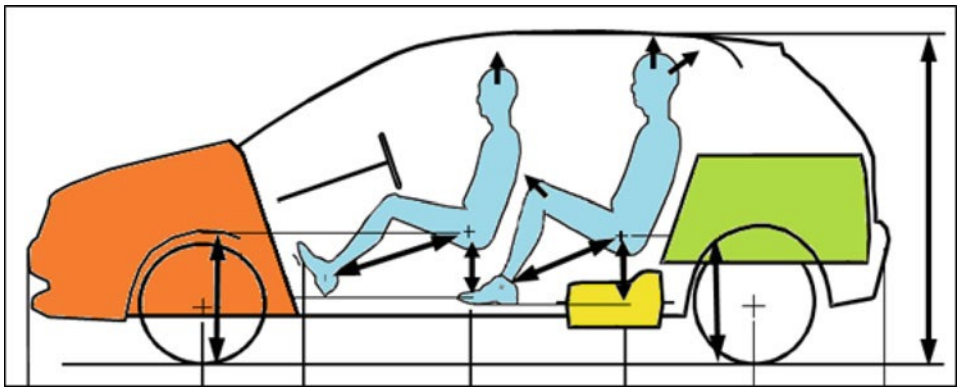


Abb. 7.1 Prinzipielles Fahrzeugpackage

7

Tab. 7.1 Fahrzeugtypen

Konzept	Türen	Sitzplätze	Heck	Dach
Coupé (Coupe)	2	2 oder 2 + 2	Stufenheck, Fließheck	fest, über Insassen
Cabriolet (Convertible)	2	2 oder 2 + 2	Stufenheck	beweglich, über Insassen
Limousine (4 door Notchback)	4	5	Stufenheck	fest, über Insassen
Limousine (5 door Hatchback)	5	5	Fließheck, Steilheck	fest, über Insassen und Gepäck
Kombi-Limousine (Stationwagon)	5	5 oder 7	Steilheck	fest, über Insassen und Gepäck
Geländewagen (Sport Utility Vehicle SUV)	5	5	Steilheck	fest, über Insassen und Gepäck
Kleinbus/Minivan (Multi Purpose Vehicle MPV)	5	7	Steilheck	fest, über Insassen und Gepäck
Pkw-Pritsche (Light Truck, Pickup)	2 oder 4	2 oder 5	Offene Ladefläche	fest, über Insassensep. Abdeckung der Ladefläche

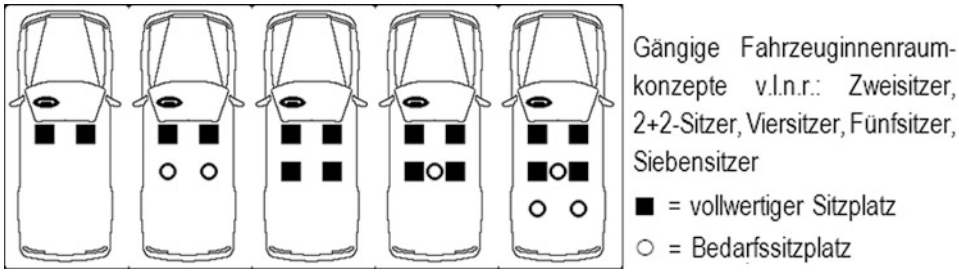


Abb. 7.2 Gängige Fahrzeuginnenraumkonzepte

Bewegungsbedarf während der Fahrt, sowie die quasistatischen[4] Ein- und Ausstiegsvorgänge zu berücksichtigen. Eine statische Insassenhaltung, wie sie in schematischen Darstellungen und Fahrzeugpackageplänen beziehungsweise Sitzplänen suggeriert wird, kommt in der Realität kaum vor. Die Notwendigkeit der dynamischen Fahrzeugsteuerung setzt die Bedienung des Lenkrades, der Pedale und des Schalthebels voraus. Hierzu ist es notwendig, dass sich der Fahrer zum Bedienteil hinbewegt und dieses über einen technisch bedingten Weg hinweg betätigt. So sind beim Lenken Drehbewegung am Lenkrad notwendig, bei dem es je nach Einschlagwinkel auch zum Um- oder Übergreifen der Hände am Lenkradkranz kommt. Sämtliche Ein- und Anbauten am Sitz oder der Türverkleidung und der Armaturentafel dürfen diese Bewegung nicht einengen oder behindern. Als Folge dieser Bewegung sind nicht nur die Hände, sondern vor allem die ausgestellten Ellenbogen in Bewegung. Je nach erforderlichem Kraftaufwand kann es zu wahrhaft raumgreifenden Bewegungen kommen. Als es noch keine Servounterstützung in Lastkraftwagen gab, waren dort die Fahrerkabinen rund um die mit großen Durchmessern konstruierten Lenkräder sehr geräumig, um ein ausholendes Manövrieren zu ermöglichen. Die Betätigung der Pedale erfordert neben den Freigängigkeiten der Füße mit allen Schuhgrößen und -typen natürlich auch eine Freigängigkeit des Schienbeines und der Knie zu Lenkrad, Lenksäulenverkleidung, Instrumententafel sowie der Türverkleidung. Der Schalthebel mit seinen mechanisch bedingten Schaltwegen verlangt einerseits die Bewegungsfreiheit der führenden Hand, die nicht zwischen vorderer Schalthebelstellung und Instrumententafel eingeklemmt werden darf. Andererseits sollen weder Sitz noch die Armablage der Mittelkonsole ein Zurückziehen des Hebels in die hinteren Schaltstellungen behindern. Nicht nur zur Bedienung, sondern auch zur Orientierung sind Körperteilbewegungen unerlässlich. So ist der Kopf immer dann in Bewegung, wenn die erforderliche Blickabwendung über die Augenbewegung hinausgeht, bei der Sicht in den Seitenspiegel oder dem Schulterblick zum umgebenden Verkehr. Auch die pendelnde Kopfbewegung bei dynamischer Kurvenfahrt oder beim Manövrieren des Fahrzeuges in unübersichtlichen Verkehrssituationen erfordert entsprechende Freiräume, vor allem im Bereich der Dachinnenhimmelverkleidung, der Dachhaltegriffe und der Sonnenblenden. Komplexe Bewegungsvorgänge, wie das Ein- und Aussteigen aus dem Fahrzeug (siehe ► Abschn. 7.6) sind von vielen unabhängigen Parametern[5] abhängig und erfordern situationsbedingt unterschiedliche Freiräume und Anordnungen. So ist beispielsweise zum Einsteigen in ein Fahrzeug eine weit öffnende Tür von Vorteil, da sie den Zutritt weniger behindert. Hat der Fahrer auf dem Sitz Platz genommen kann die gleiche Tür durch den großen Öffnungswinkel aus sitzender Haltung heraus unerreichbar sein, mit der Folge, dass sie nicht geschlossen werden kann. Wie in diesem Beispiel gibt es vielerlei solcher Zielkonflikte, deren Abwägung nur bei Kenntnis der ergonomischen Konsequenzen vor dem technischen Kontext gelingen kann. Dies ist die Aufgabe und Herausforderung an die Ergonomie im Fahrzeugpackaging.

Bei alledem steht der Fahrerarbeitsplatz für die Gestaltung an erster Stelle. Auch wenn Zukunftsvisionen ein autonomes Fahren propagieren und selbsttätiges Einparken bereits heute eine verfügbare Sonderausstattung einiger Serienfahrzeuge ist, bleibt der Fahrerplatz erste Priorität im Fahrzeug. Hier sind alle Bedien- und Stellteile zum Führen des Fahrzeuges zentral angeordnet und auch viele Nebenfunktionen liegen in der direkten oder indirekten Erreichbarkeit des Fahrers. Eine hohe Priorisierung des Fahrerplatzes ist auch aus Gründen

4 Mit statischen Vorgängen werden vor allem Haltungen bezeichnet, die sich im Gegensatz zu dynamischen Bewegungen weder zeitlich noch örtlich wesentlich ändern. Der Begriff der quasistatischen Vorgänge ist aus der Thermodynamik entliehen und bezeichnet eigentlich dynamische Vorgänge, die jedoch anhand diskreter statischer Situationen simuliert oder betrachtet werden. Oftmals ist die Zerlegung eines schnellen oder komplexen Bewegungsvorgangs eine praktikable Lösung, um Einzelaspekte eines Gesamtzusammenhangs zu betrachten und zu beschreiben.

5 Parameter des Ein-/Ausstieges sind Körpergröße der Person, die Fahrzeuggeometrie (insbesondere die Größe der Einstiegsöffnung), die Einstiegssituation (z. B. Einengung durch benachbarte Fahrzeuge), aber auch verhaltensabhängige Gewohnheiten und unbewusste Bewegungsstrategien.

Tab. 7.2 Bedeutung der Sitzplätze für die Kaufentscheidung

Sitzplatz	Coupé bzw. Sportwagen	Limousine	Kombilimousine	Van/Minibus
Fahrerplatz	70 %	60 %	50 %	50 %
Beifahrerplatz	20 %	15 %	15 %	15 %
Gepäckraum	5 %	10 %	20 %	10 %
Zweite Sitzreihe außen	5 %	10 %	10 %	10 %
Zweite Sitzreihe mittig	0 %	5 %	5 %	5 %
Dritte Sitzreihe außen	0 %	0 %	0 %	10 %

Abb. 7.3 Fahrzeugkoordinatensystem nach SAE J182 (aus Bothe 2010)

der Vermarktung geboten, da die Kaufentscheidung zwar primär durch das Erscheinungsbild des Exterieurs geprägt wird, aber sekundär bereits von der Anmutung und Funktionalität des Interieurs auf dem Fahrerplatz getroffen wird. Je nach Einsatzzweck verschieben sich die weiteren Prioritäten zugunsten der zweiten oder dritten Sitzreihe oder zum Laderaum (Tab. 7.2).

7.1.2 PKW-Maßkonzeption nach SAE

Bis 1973 waren Fahrzeugabmessungen nicht vereinheitlicht. Im September 1973 wurde in der von dem „Human Factors Engineering Committee" erarbeiten Norm SAE[6] J1100 erstmals genormte Fahrzeugabmessungen aufgeführt. Diese Norm bzw. die sich daran orientierende DIN 70020-1 stellt bis heute eine wesentliche Grundlage für die Pkw-Maßkonzeption dar. In der SAE J 1100 wird bezugnehmend auf SAE J182 folgendes Koordinatensystem definiert: die x-Achse verläuft in Fahrzeuglängsrichtung, die y-Achse senkrecht dazu in Fahrzeugquerrichtung nach rechts und die z-Achse in vertikaler Richtung nach oben. Der Koordinatenursprung befindet sich in Fahrzeugmitte nahe an der Vorderachse (Abb. 7.3). Zur Beschreibung der in SAE J1100 definierten Abmessungen werden Ebenen benutzt, die jeweils orthogonal zu diesen Achsen verlaufen.

Abweichungen von dieser Norm ergeben sich dadurch, dass der Koordinatenursprung der US-amerikanischen Hersteller bevorzugt an der Fahrzeugfront gelegt wird. An der Koordinatendefinition nach SAE J1100 orientieren sich hauptsächlich die geometrischen Konstruktionen der Fahrzeugbauteile. Dagegen werden für die funktionalen Berechnungen der Fahrzeugbewegungen im Rahmen von Computersimulationen und auch für elektronische Steuergeräte im Fahrzeug Koor-

6 Der SAE (Society of Automotiv Engineers) gibt ähnlich dem VDI (Verein Deutscher Ingenieure) Richtlinien heraus. Als „Stand der Technik" spielen sie – wie die VDI-Richtlinien und die DIN-Normen – für die Zulassung von Fahrzeugen eine wichtige Rolle.

dinatensysteme gewählt, in denen die x-Achse in Fahrtrichtung und die y-Achse nach links weist. Der Koordinatenursprung wird dazu möglichst nah zum Fahrzeugschwerpunkt angeordnet. Die Verwendung dieser unterschiedlichen Koordinatensysteme führt bei jeder Fahrzeugentwicklung erneut zu erforderlichen Umrechnungen und Transformationsbedarf.

Eine Vielzahl von Gesetzestexten, Richtlinien und anderen Normen beziehen sich auf die Fahrzeugabmessungen nach SAE J1100. Unter anderem werden die so definierten Fahrzeugabmessungen von Fahrzeugherstellern genutzt, um die sog. GCIE-Austauschlisten (Global Car Manufacturers Information Exchange Group- früher ECIE, European Car Manufacturers Information Exchange Group) und Pkw-Package-Pläne zu erstellen, wodurch Abmessungen unterschiedlicher Fahrzeughersteller direkt miteinander verglichen werden können. Damit soll der enorme Aufwand reduziert werden, den früher jeder Fahrzeughersteller betrieb, um durch Nachmessen die besonderen Auslegungsaspekte eines Konkurrenzproduktes zu erfahren. Die Fahrzeugabmessungen werden durch eine Buchstaben-Zahlen-Kombination kodiert. Distanzen parallel zur x-Achse werden mit „L“ (length = Länge), zur y-Achse mit W (width = Breite), und zur z-Achse mit H (height = Höhe) bezeichnet. Zahlenwerte zwischen 1 und 99 definieren Interior- Abmessungen und Zahlenwerte zwischen 100–199 Exterior-Abmessungen (Müller 2010). Alle Winkel werden mit dem Präfix „A“ (angle) und Volumina mit „V“ (volume) charakterisiert (SAE J110 und SAE Handbook).

Ziel des Human Factors Engineering Committees war unter anderem, ein Normenwerk zu schaffen, durch das eine menschengerechte Gestaltung von Fahrzeugen sicherstellt. Ausgangspunkt dafür war die 1962 erstmals in SAE J826 veröffentlichte Körperumrissschablone (siehe ▶ Abschn. 5.2.1, ◘ Abb. 5.10). Eine Vielzahl weiterer SAE Normen, die sich darauf beziehen, wurden in den nachfolgenden Jahren vorgestellt. Diese Normen sind heute Standard der Automobilentwicklung, zumal eine Zulassung eines Fahrzeugs auf dem US-amerikanischen Markt nur bei deren Beachtung erfolgen kann. Sie werden in regelmäßigen Abständen im Rahmen der jährlichen Neuauflage des SAE Normenkatalogs überarbeitet und modifiziert. Eine Variation dieser Definition der Fahrzeugabmessungen wird ebenso regelmäßig von der GCIE definiert. In dieser Arbeitsgruppe sind die auslegenden Maßkonzept-Ingenieure der größten Automobilhersteller vertreten. Aus diesem Grund ist diese Normvariante besonders praxisnah und gut anwendbar definiert.

Von essenzieller Bedeutung für die menschengerechte Gestaltung des Fahrerarbeitsplatzes ist dessen Position in dem Fahrzeugsitz. Aus Sicht eines Konstrukteurs stellt dabei der Sitz wegen seiner Polsterung und der damit verbundenen ungenauen Position des Fahrers darin ein Problem dar. Deshalb wurde in SAE J1100 der Sitzreferenzpunkt (**SgRP** – Seating Reference Point) definiert. Er kennzeichnet in Relation zu „harten“ Bestandteilen des Sitzes (z. B. Sitzschiene) den Punkt, in dem der Hüftpunkt (H-Punkt) einer definierten Person[7] zu liegen kommt. Messtechnisch wird er durch die H-Punktmessmaschine nach SAE J826 gefunden[8]. Es handelt sich dabei um einen Prüfkörper, der die Gesäßform eines großen Mannes (95. Perzentil) nachahmt, der zudem mit mechanischen Modellen von Oberschenkel, Unterschenkel und Fuß (jeweils 95. Perzentil U.S.-Mann) ausgestattet ist und der mit dem Gewicht eines 50 Perzentil-U.S.-Manns (76 kg) belastet wird (◘ Abb. 7.4). Dieser Prüfkörper wird nach einer ganz bestimmten Vorschrift in den Sitz eingebracht, der für die spätere Konstruktion des Fahrzeugs vorgesehen ist. In vielen Fällen wird in einer frühen Phase der Konstruktion der SgRP bzw. das H-Punkt-Verstellfeld vorab festgelegt. Es ist dann Aufgabe des Sitzherstellers, den Sitz so zu konstruieren, dass dessen H-Punkt-Verstellfeld mit der Vorgabe in der Konstruktion übereinstimmt. Die grundlegende Ausarbeitung dieser Normen erfolgte in den späten 1950er Jahren, so dass sich

7 Von der SAE zugrunde gelegt wird eine Prozedur, die das 95. Perzentil einer männlichen Population mit einer 95 % Beinlänge und 95 % Schuhlänge annimmt (siehe SAE J826, SAE J1100, SAE J1516 und SAE J1517).

8 Als Hüftpunkt wird dabei der Drehpunkt des Oberschenkels im Torso der H-Punktmessmaschine definiert. Es ist darauf hinzuweisen, dass der mit der H-Punktmessmaschine gemessene Hüft-Punkt nicht mit dem einer realen Person übereinstimmt, da diese in Abhängigkeit von individuell anthropometrische Bedingungen und Bevorzugungen davon deutlich abweichende Haltungen einnimmt (es wurden Unterschiede im Bereich von 60 mm gemessen!).

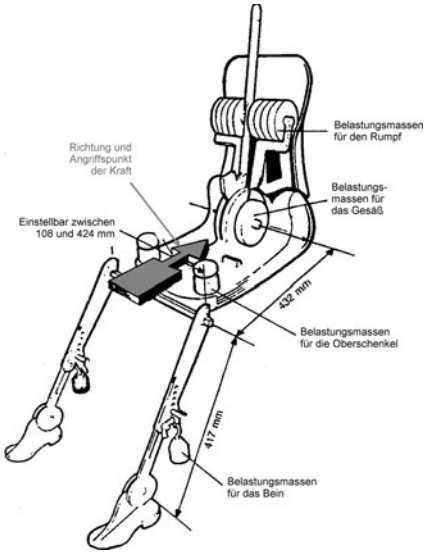


Abb. 7.4 H-Punkt-Messmaschine nach SAE J826

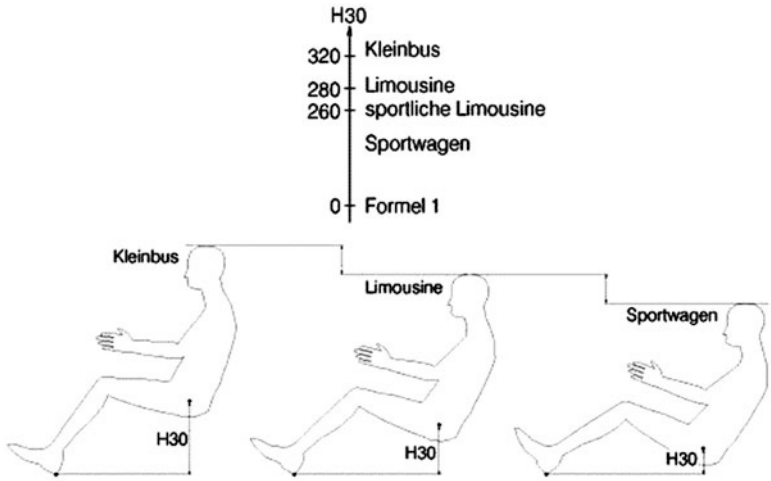


Abb. 7.5 Variationsbereich des H30-Maßes, welches wesentlich den Charakter eines Fahrzeugs beeinflusst (aus Vogt 2003)

die darin verwendeten Körpermaße teilweise noch immer auf amerikanische Erhebungen aus dieser Zeit beziehen.

Der SgRP ist der zentrale Bezugspunkt für die anthropometrische Auslegung eines Fahrzeugs nach SAE. Dieser fahrzeugbezogene SgRP, oft auch als Sitzbezugspunkt oder R-Punkt bezeichnet – definiert dessen (theoretische) Lage für einen 95-Perzentil-Mann. Sein vertikaler Abstand von der Bodenebene des Fahrzeugs (genauer der Höhe des Fersenpunktes, Accelerator Heel Point, AHP) ist das H30-Maß. Es bestimmt durch seinen Einfluss auf die Sitzhaltung des Fahrers essenziell den Charakter eines Fahrzeuges. Es kann von 140 mm für einen niedrigen Sportwagen bis zu 400 mm bei einem VAN/Minibus reichen (siehe Abb. 7.5; für wettbewerbliche Rennwagen sind sogar negative H30- Maße üblich). Aufgrund der gegebenen Abmessungen von Oberschenkel und Unterschenkel der H-Punktmessmaschine ergibt sich daraus die Trajektorie des 95-Perzentil H-Punktes (Abb. 7.6). Daraus folgen weitere geometrische Abhängigkeiten: Die Distanz X_{95} zwischen dem 95-Perzentil H-Punkt und dem Pedalreferenzpunkt PRP (genauer definiert als Fußballenpunkt, ball of foot, BOF; der Abstand des Fußballenpunkts BOF zum Fersenpunkt AHP ist in SAE J1517 mit 203 mm und in SAE J4004 mit 200 mm angegeben) errechnet sich nach:

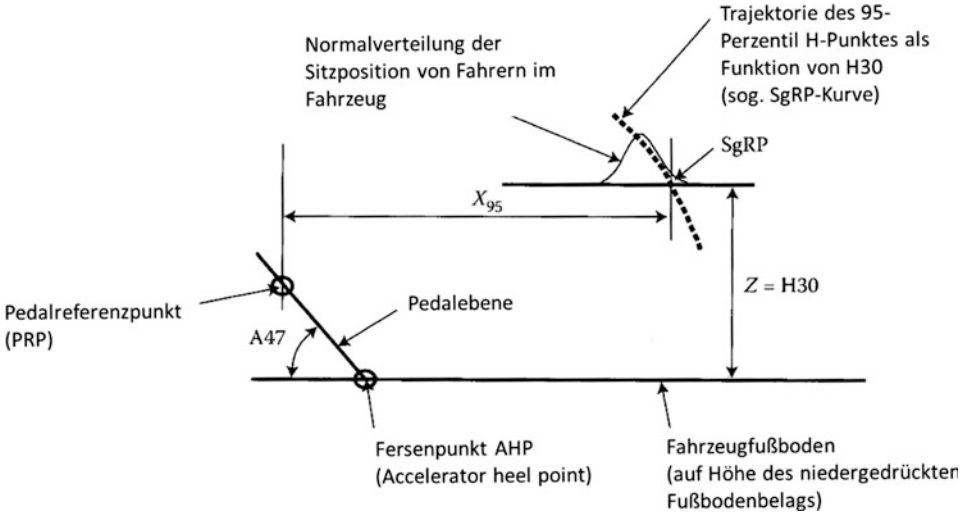


Abb. 7.6 95-Perzentil H-Punkt-Lage nach SAE (Darstellung nach Bhise 2012)

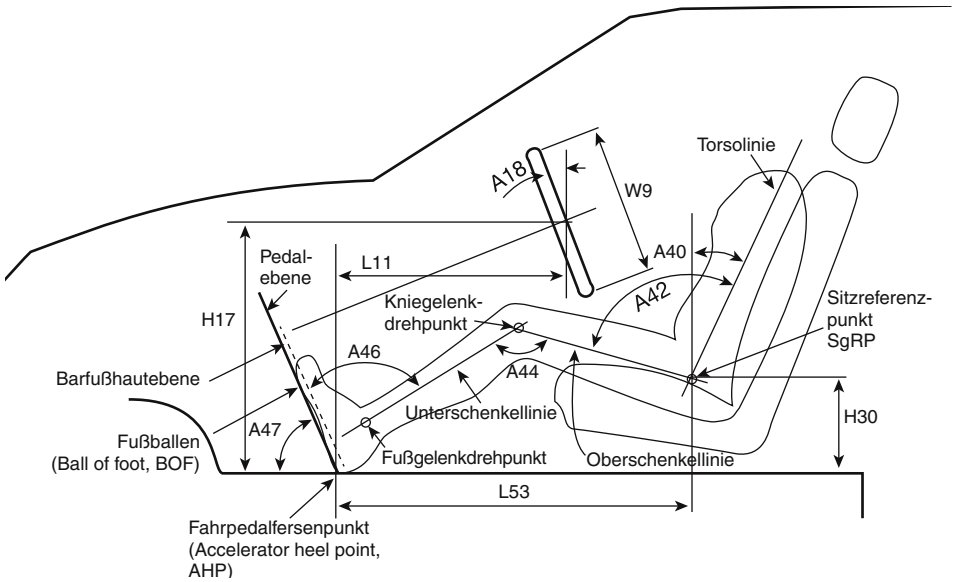


Abb. 7.7 Fahrzeug Abmessungen und Bezugspunkte nach SAE J1100 (aus Bhise 2012)

$$X_{95} = 913{,}7 + 0{,}672316\,Z + 0{,}00195530\,Z^2 \quad (7.1)$$

Der Winkel A47 der Pedalebene gegen die Ebene des Fahrzeugbodens ist:

$$A47 = 789{,}6 - 0{,}015\,Z - 0{,}00173\,Z^2 \quad (7.2)$$

Abbildung 7.7 zeigt einige auf diesen Grundmaßen aufbauende nach SAE J1100 definierte Maße und Bezugspunkte.

Die horizontale Distanz L53 zwischen dem 95-Perzentil H-Punkt und des Fersenpunkt AHP ergibt sich zu:

$$L53 = X_{95} - 203 \cdot \cos(A47) \quad (7.3)$$

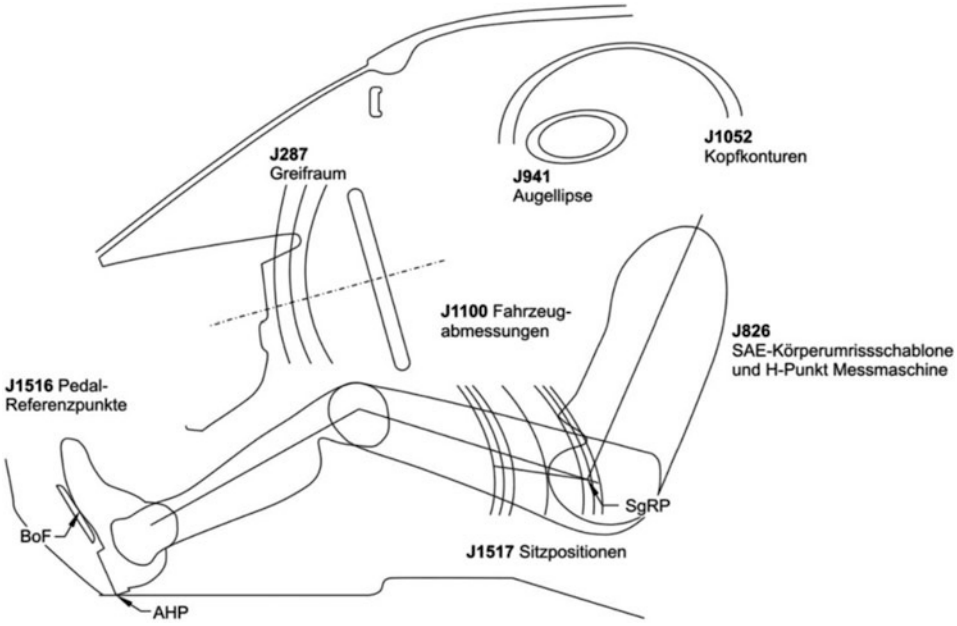


Abb. 7.8 Für die Fahrerplatz Auslegung relevanten SAE Normen (aus Müller 2010)

Der fahrzeugbezogene SgRP ist die Grundlage für die Anwendung der weiteren mit SAE J1100 und SAE J826b in Verbindung stehenden Normen. Abbildung 7.8 stellt die wichtigsten, im Rahmen einer Fahrzeugkonzeption angewandten SAE-Vorschriften zusammen.

Die Sicht aus dem Fahrzeug wird wesentlich durch die Sitzposition bestimmt. Deshalb wird in SAE J941 beschrieben, wie auf der Grundlage des SgRP Augenpunktlagen und Augenellipsen festzulegen sind (siehe ▶ Abschn. 7.3.1). SAE J1052 dient der Bestimmung der Kopfpositionen und Kopfkonturen von Fahrzeugführern und Passagieren. SAE J287 ermöglicht die Bestimmung von Greifräumen anhand des G-Faktors. Der G-Faktor beschreibt das Anteilsverhältnis von Männern zu Frauen unter Berücksichtigung der Gurtart. Auf Basis des G-Faktors können Armreichweiten aus Tabellen ausgelesen werden. In SAE J1516 werden Fersenpunkt (AHP) sowie Fußballenpunkt (BoF) als Referenzpunkt definiert. In SAE J1517 werden in Abhängigkeit von der Sitzhöhe (H30-1)[9] das Verstellfeld des SgRP-1 numerisch definiert. Diese Distanzfestlegung des SgRP von der Pedalerie ist nach den europäischen Zulassungsvorschriften nicht verbindlich. Einige Fahrzeughersteller wählen abweichende Streckungen des Fahrerbeins der Schablone. In Abhängigkeit von den Referenzpunkten und der Sitzverstellungsposition sind dann die Winkel der Pedalerie festzulegen.

9 „-1" bedeutet, dass es sich um die 1. (vordere) Sitzreihe handelt.

7.1.3 Arbeitsfelder der anthropometrischen Ergonomie

Beim Entwickeln des Fahrzeugpackaging sind mehrere Themenfelder zu berücksichtigen, die sich gegenseitig hinsichtlich des vom Nutzer empfundenen Komforts bzw. Diskomforts, der Sicherheit und der Benutzerfreundlichkeit beeinflussen. Ihre Behandlung wird teilweise durch die SAE-Vorschriften abgedeckt, welche alle von Ergonomieexperten auf der Grundlage von wissenschaftlichen Untersuchungen – zum großen Teil auf der Grundlage von zum damaligen Zeitpunkt existierenden Fahrzeugmodellen des US-Marktes – entwickelt worden sind. Allerdings ergeben sich aus den Rück-

meldungen der Kunden und den Erfahrungen der Hersteller manchmal auch Abweichungen zu diesen Vorschriften, was sich u. a. aus dem inzwischen erfolgten technischen Fortschritt erklärt. In Anlehnung an Bothe (2010) sind folgende Themenfelder zu behandeln:

1. **Sitzen**: Fahren kann prinzipiell nur im Sitzen stattfinden und da oftmals lange Strecken zurückgelegt werden, sind an Sitze und Sitzposition unter dem Aspekt der prinzipiell geringen verfügbaren Bewegungsfreiheit höchste Anforderungen zu stellen. Insbesondere ist eine korrekte und ermüdungsfreie Sitzposition des Fahrers aus Komfort- und Sicherheitsgründen von essenzieller Bedeutung. Die Fahrerhaltung wird dabei wesentlich durch die Position des Lenkrads und die der Pedale bestimmt. Durch die Sitzeinstellung soll eine Anpassung an individuelle Gegebenheiten weitgehend ermöglicht werden. Um lange Fahrten ermüdungsfrei zu bewältigen, sind entsprechende Abstützungen zu konzipieren. Die genannten Punkte gelten mit gewissen Einschränkungen auch für die anderen Passagiere des Fahrzeugs. Nachdem zur Gewährleistung der passiven Sicherheit das Anlegen und Tragen des Sicherheitsgurtes vorgeschrieben ist, muss dessen korrekte Handhabung und Verlauf unter Berücksichtigung unterschiedlicher anthropometrische Bedingungen besonders beachtet werden.
2. **Sicht**: Über 90 % der für das Fahren aufzunehmenden Information geschieht über die Sicht. Deshalb hat die Gestaltung der technischen Elemente, die die Sicht beeinträchtigen bzw. unterstützen können ebenso wie das zuvor genannte Sitzen elementare Bedeutung. Diese Gestaltung bezieht sich dabei vornehmlich auf das so genannte Greenhouse[10] (auch Glashaus), welches die Windschutzscheibe, Rück- und Seitenfenster sowie die Säulen, welche diese voneinander trennen (beginnend bei der Fahrzeugfront als A-, B- usw. Säule bezeichnet) und das Dach umfasst. Dabei kann die Sicht nicht unabhängig vom Sitzen gesehen werden. Oftmals richtet der Fahrer seine Sitzposition so ein, dass er – subjektiv – eine optimale Sicht auf die Fahrumgebung erhält. Er geht dann ggf. Kompromisse bezüglich seiner Position zu Lenkrad, Pedalen und weiteren Bedienelementen ein, die bei längerer Fahrt zu Diskomfort führen können. Dabei hat man zwischen der direkten Sicht nach vorne auf Fahrbahn, Verkehrszeichen und Signalanlagen sowie nach hinten durch das Rückfenster z. B. bei Rückwärtsfahrt und der indirekten Sicht über Innen- und Außenspiegel zu unterscheiden. Bei der Sicht auf Bedien- und Anzeigekomponenten ist die Ablesbarkeit von Text und Symbolen zu beachten. Das Kombiinstrument, Warnanzeigen und das zentrale Display in Fahrzeugmitte sind wichtige Sichtziele. Dabei ist insbesondere die Verdeckung durch das Lenkrad und Lenkstockhebel zu berücksichtigen. Bei ungünstiger Konstellation von äußeren Lichtquellen, glänzenden Oberflächen im Armaturenbereich sowie unzureichenden Abdeckungen der Instrumente kann es zu unerwünschten Reflexionen kommen, die den Fahrer irritieren bzw. ein Aufnehmen von Information verhindern können.
3. **Bedien- und Anzeigekomponenten:** Primär geht es hier um die ergonomische Gestaltung des Instrumentenfeldes, der Mittelkonsole, der Tür, des Sitzes und des Fahrzeughimmels, sowie aller Bedienelemente um das Lenkrad, Pedale, Schalthebel und Handbremse. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem Fahrer. Bei der Entwicklung eines Chauffeurfahrzeugs mit hochwertig ausgestattetem Fondbereich muss die Gestaltung auch auf diesen Bereich ausgedehnt werden. Die Kriterien sind dabei Erreichbarkeit und Bedienbarkeit. Das bedeutet, dass sowohl unterschiedliche anthropometrische Bedingungen zu berücksichtigen sind, als auch die anatomisch/biomechanischen Gegebenheiten von Bewegungsmöglichkeiten und Einschränkungen.

10 Die Bezeichnung „Greenhouse“ kommt aus dem Bereich der Gärtnerei: Glasdächer über Gewächshäusern werden im englischen so bezeichnet. Der Begriff hat sich in den Bereich der Architektur ausgedehnt, wo künstliche im Inneren eines Gebäudes angelegte Landschaften durch ein großes Glasdach von der Außenwelt abgetrennt sind.

4. **Raumgefühl**: Wie bereits angesprochen, ist die Bewegungsfreiheit in der engen Fahrzeugkabine prinzipiell eingeschränkt. Deshalb ist für den Fahrer besonderes Augenmerk auf den Schulter- und Kopfraum sowie den Bein- und Fußraum zu richten. Aufgrund der symmetrischen Ausgestaltung des Greenhouses gelten die für den Fahrer gefundenen Bedingungen auch für den Beifahrer, mit Ausnahme des sich in den Knieraum öffnenden Handschuhkasten. In Abhängigkeit vom Exterieurdesign kann speziell bei Limousinen und Coupés der Raumbedarf des Oberkörpers, insbesondere der Schulter- und Kopfraum durch den Dacheinzug und den seitlichen Einzug des Greenhouses beeinträchtigt sein. In der zweiten wie ggf. in der dritten Sitzreihe wird das Raumgefühl maßgeblich durch die Distanz des Knies zur Sitzlehne und die Möglichkeit, die Füße unter den Vordersitz zu stellen, beeinflusst. Ist die Sitzbank entgegen der Fahrtrichtung eingebaut, müssen entsprechend Bauteile wie die Heckklappe, der hintere Karosserieabschluss und Ähnliches berücksichtigt werden. Bei Fahrzeugen mit Standardantrieb ist vor allem in Fahrzeugen mit großzügig ausgelegtem Fond der Durchstieg ein wichtiges Kriterium.
5. **Ein- und Ausstieg:** Diesem Bereich kommt gerade im Hinblick auf die älter werdende Kundschaft besondere Bedeutung zu. Entscheidende Kriterien sind hierbei der verfügbare Bewegungsraum insbesondere bezüglich der Fuß-, Knie- Gesäß-, Schulter- und Kopffreiheit. Eine bedeutende Rolle spielt vor allem die Höhe und seitliche Lage des Türschwellers sowie für die Frontsitze die Position und Neigung von A- und B-Säule. Bei einem viertürigen Fahrzeug wird der Zugang zum Fond durch die Position der B-Säule im Fußbereich und ebenfalls durch die Höhe und seitliche Lage des Türschwellers sowie die Lage der durch das Dach eingeschränkten Einstiegsöffnung wesentlich beeinflusst. Dazu kommen Größe und Öffnungswinkel der Türen, wobei im Fall ungehinderten Ein- und Ausstiegs und des gleichen Vorgangs in engen Parklücken womöglich unterschiedliche Forderungen zu erfüllen sind. Ein besonderes Thema ist hier bei einem zweitürigen Fahrzeug der Zugang zu den hinteren Sitzen. Auch die Bedienelemente zur Betätigung der Türen müssen Gegenstand ergonomischer Optimierung sein.
6. **Beladen**: Der Zugang zum Kofferraum bzw. zum Laderaum eines Kombinationsfahrzeugs wird im Wesentlichen durch geometrische Eigenschaften wie die Höhe der Ladekante, des Ladebodens, dem Öffnungswinkel des Kofferraumdeckels bzw. der Heckwandtür bestimmt. Zusätzlich spielt die Bedienbarkeit eine wichtige Rolle, die sich sowohl auf die Art der verwendeten Griffe als auch auf den Bewegungsvorgang bezieht, der sich für den Nutzer beim Öffnen und Schließen ergibt.
7. **Service**: Bestimmte Serviceaufgaben sind vom Nutzer des Fahrzeugs zu erledigen. In diesem Zusammenhang steht die Position und die Handhabbarkeit des Tankdeckels (bzw. bei Elektrofahrzeugen die entsprechende Einrichtung zur Anbringung des Ladekabels) an erster Stelle. Einige Tätigkeiten sind aber auch im Bereich des Motorraums zu erledigen. Deshalb ist das Öffnen der Motorhaube auf ähnliche Weise zu behandeln wie der Zugang zum Gepäcksabteil. Im Motorinnenraum sind vom Fahrer zu nutzende Serviceobjekte aus bedientechnischer Sicht optimal anzubringen, insbesondere der Einfüllstutzen für das Scheibenwaschwasser und für das Motoröl. Auch die Überprüfung des Ölstandes im Motor mittels des Ölstabes stellt gegebenenfalls für Personen unterschiedlicher Körpergröße und Beweglichkeit ein Problem dar.

Die angesprochenen Themenfeldern stehen teilweise in großer Abhängigkeit zueinander. Um dies zu berücksichtigen, sind verschiedene Methodiken zur Pkw-Maß-Konzeption entwickelt worden. Müller (2012) gibt dazu einen auch historische Aspekte berücksichtigenden Überblick und stellt einen Ansatz zur Pkw-Maßkonzeption vor, der die ergonomischen bzw. anthropometrischen Anforderungen der Fahrzeugnutzer in den Mittelpunkt der Fahrzeugentwicklung rückt. Mit dessen Anwendung werden Fahrzeuge unter Berücksichtigung von Hauptanforderungen in neun Arbeitsschritten zentrifugal um die Fahrzeuginsassen konzipiert. Dabei bilden Fahrzeugabmessungen von zu definierenden Referenzfahrzeugen sowie ergonomische Vorgaben

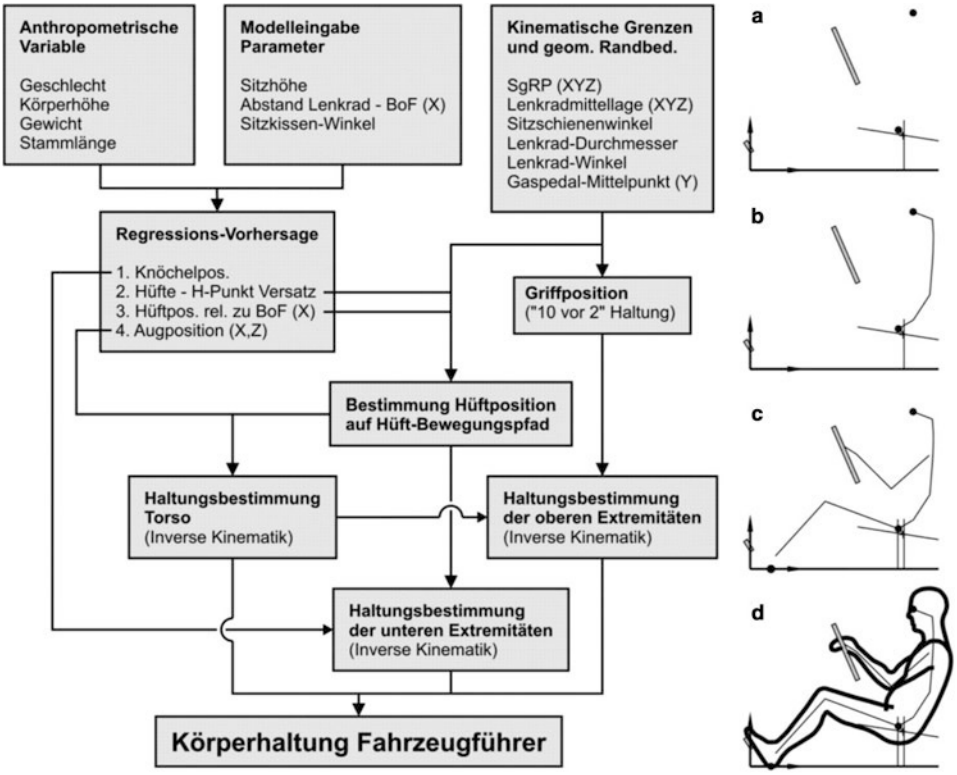


Abb. 7.9 Flussdiagramm und Arbeitsablauf des „Kaskade-Vorhersagemodells" (nach Reed et al. 2002; zitiert aus Müller 2012). **a**: Vorhersage von Hüft- und Augenposition, **b**: durch inverse Kinematik bestimmte passende Torsohaltung, **c**: durch inverse Kinematik bestimmte passende Haltung der Extremitäten, **d**: vollständige Menschmodellierung in passender Körperhaltung

einen unverbindlichen Gestaltungsrahmen. Die so generierten Pkw-Maßkonzepte sollen die Grundlage für das Interior- und Exteriordesign bilden.

Aus gegenwärtiger Sicht ist besonders die PKW-Maßkonzeption des ASPECT-Programms (Automotive Seat and Package Evaluation and Comparision Tool) zu erwähnen, dessen Forschungsergebnisse in einer Vielzahl von Veröffentlichungen dokumentiert ist. Einen ausführlichen Überblick darüber liefert Reed et al. (1999a). Auf der Grundlage des ASPECT-Programms und eigenen Versuchen wurde von Reed et al. (1999b, 2002) die Methodik des „***Kaskade-Vorhersagemodells***" zur Fahrerplatzauslegung entwickelt, die in Abb. 7.9 zusammenfassend wiedergegeben ist.

Auf der Grundlage des Kaskade-Vorhersagemodells wurde von Parkinson et al. (2006) die sog. „***Optimierungsmethode***" entwickelt. Sie verknüpft verschiedene Randbedingungen und ist vom Ansatz her speziell dafür geeignet, in Softwareanwendungen für die digitale Menschmodellierung integriert zu werden. Abbildung 7.10 gibt einen Überblick über die Module dieser Methode und deren gegenseitige Verknüpfung.

Es wurden diverse Software-Anwendungen entwickelt, die auf der Grundlage von Menschmodellen und steuernden Parametern eine automatische Ergebnisableitung ermöglichen und so besonders schnell verschiedene Konzeptvarianten miteinander zu vergleichen erlauben. Die Darlegungen dieser Softwaresysteme geschehen im Folgenden unter Nutzung der Zusammenstellung von Müller (2012). Die größte Bedeutung haben in diesem Zusammenhang die Systeme, die direkt mit den ohnedies in der Automobilentwicklung genutzten Menschmodellen verbunden sind.

Das digitale Menschmodell **RAMSIS** stellt das Modul „**Package Designer**" zur anthropometri-

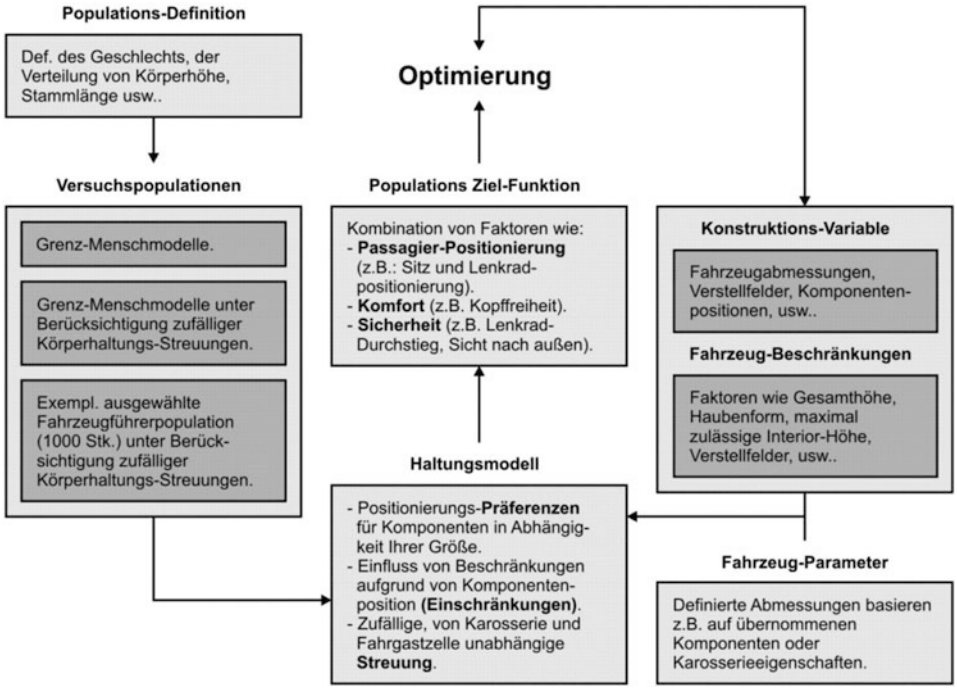


Abb. 7.10 Schematische Darstellung der Pkw-Maß-Konzeption mit der Optimierungsmethoden nach Parkinson et al. (2006; zitiert aus Müller 2012)

schen Auslegung des Fahrer Arbeitsplatzes zur Verfügung (Human Solutions 2000, 2002, 2008). Als Parameter werden dabei ein parametrisierbarer Sitz, ein parametrisierbares Lenkrad, Fersen- und Pedalpunkt genutzt. Sitzverstellung und Lenkradverstellung sind für den Anwender frei wählbar. In Abhängigkeit von Lenkradwinkel und Sitzbezugspunkt werden sodann Fahrzeughimmel, Boden und Fußablage bestimmt. Alle resultierenden Maße werden nach SAE J1100 ausgegeben. RAMSIS ermöglicht dabei auf der Grundlage von umfangreichen experimentellen Erhebungen die Haltung zu berechnen, die unter den gegebenen Bedingungen mit größter Wahrscheinlichkeit eingenommen wird. Die so berechnete Haltung wird körperteilspezifisch evaluiert. Ein Modul „Seat Belt Design" erlaubt in Abhängigkeit von der Körperhaltung eine sehr detaillierte Analyse und Gestaltung des Sicherheitsgurtverlaufs. Das neu entwickelte Modul „RAMSIS kognitiv" ermöglicht zudem eine über die üblichen Sichtberechnungen deutlich hinausgehende Analyse aller Sichtbedingungen einschließlich Blendung, HUD-Gestaltung, Einfluss von Gleitsichtbrillen u. ä. Mit dem Modul „Standards & Regulations" können die wichtigsten Bestimmungen konform zu den SAE-Vorschriften evaluiert werden.

Auch für das Menschmodell **Jack** existiert ein Programm zur Pkw-Maß-Konzeption: Die Software Anwendung „Classic Jack" kann durch das Modul „***Occupational Packaging Toolkit***" erweitert werden. Die Version „*Standard*" setzt unmittelbar die SAE-Normen um. Mittels der „*Enhanced*"-Version können Körperhaltungen der Fahrzeuginsassen nach dem Kaskade-Vorhersagemodell berechnet werden (Siemens 2010). Das Modell zur Berechnung der Körperhaltung berücksichtigt dabei die Körpergrößen sowie Fahrzeugtyp-spezifische Abmessungen. Zusätzlich kann der Komfort beurteilt werden, in dem die Körperhaltung mit qualifizierten Haltungsmodellen verglichen wird. Außerdem stellt die Software ein Werkzeug für Sichtanalysen zur Verfügung. Eine weitere Anwendung in diesem Zusammenhang stellt das „NX General Packaging" der Firma Siemens PLM (Siemens 2009) dar, welches den Anwender bei der Überprüfung einer Vielzahl von SAE-Normen und bei der Einhaltung von

Richtlinien die Fahrzeugzulassung betreffend unterstützt. Neben der Menschmodellierung auf Basis von SAE J826 besteht mit dem Menschmodell Jack zusätzlich die Möglichkeit Körperhaltungen der Fahrzeuginsassen zu modellieren und auf Grundlage von hinterlegten Datenbanken zu bewerten (Xiaoxiang 2007).

Das in der Automobilindustrie weit verbreitete CAD-System CATIA stellt das optimal implementierbare Softwaremodul „***Vehicle Occupant Accommodation***“ zur Verfügung. Es verwendet dabei das in CATIA implementierte Menschmodell „***Human Builder***“ (Dassault Systems 2009)[11]. Die Maßkonzeption erfolgt dabei durch Anwendung des oben beschriebenen Kaskade-Vorhersagemodells und die Optimierungsmethode. Die Firma Transcat stellt als Ergänzung die Software CAVA (CATIA Automotive-Extensions Vehicle Architecture) zur Verfügung. Damit werden hauptsächlich Gesetzeskonformitäten während der Fahrzeugentwicklung überprüft. Es setzt sich aus folgenden Modulen zusammen: „CAVA OVA“ (Overall Vehicle Architecture) ermöglicht in Abhängigkeit von spezifischen Anforderungen die Abmessungen der Bodengruppe zu bestimmen. Das Modul „CAVA Manikin“ wird zur Fahrzeuginnenraumauslegung genutzt, wobei die in SAE J826 definierte SAE Körperumrissschablone Anwendung findet. Das Modul „CAVA Vision“ erlaubt mit der direkten und indirekten Sicht des Fahrers im Zusammenhang stehende Anforderungen zu überprüfen. Das Modul „CAVA Safety“ ermöglicht, Aspekte der passiven Sicherheit, wie Fußgängerschutz (Gestaltung der Motorhaube und der Windschutzscheibe) und der Fahrzeuginsassen virtuell zu überprüfen. Mithilfe des Moduls „CAVA Wiper“ kann die Scheibenwischerbewegung modelliert werden und in Kombination mit dem Modul CAVA Vision der Bezug zum Sichtfeld untersucht werden.

Neben diesen mit den etablierten Menschmodellen direkt in Verbindung stehenden Systemen wurden aber auch eine Reihe von Softwareentwicklungen vorgestellt, die davon unabhängig sind.

Die Automobilzuliefererfirma **Visteon,** die im Jahr 2000 aus der Ford Motor Company ausgegliedert wurde, stellt die Software „GENPAD“ (GENeric PArametric Design) zur Verfügung, welche ergonomische Aspekte berücksichtigt und über 50 vorgefertigte Pkw-Interieur-Maßkonzeptes bereitstellt (McGuire et al. 2002). Die Software ist in das CAD-System *Pro-Engineer* implementiert, so dass die vorgefertigten Pkw-Interieur-Maßkonzepte leicht modifiziert werden können. Es findet das in Pro-Engineer verwendete 3-D-Menschmodell Anwendung. Die Software erlaubt Sichtverdeckungen, Spiegelungen, Greifräume und die Position des Gangwahlhebels zu bewerten. Durch die Vorgabe von Sicherheitszonen im Bereich des Beckens, des Kopfes und der Knie kann außerdem der passive Unfallschutz bewertet werden.

An der University of Michigan-Dearborn wurde eine Software Anwendung namens „A Parametric Model for Automotive Packaging and Ergonomic Design“ entwickelt, bei der eine Auswahl von Fahrzeug-Exterior-spezifischen Eigenschaften und Abmessungen Grundlage für die Positionierung von Passagieren im Fahrzeuginnenraum ist. Mit einem einfachen, selbstentwickelten Menschmodell können dann ergonomische Analysen, speziell den Greifraum und die Sicht betreffend durchgeführt werden (Bhise et al. 2004; Bhise und Pillai 2006).

Vom Institut für Fahrzeugtechnik der TU-Graz und der Firma Magna wurde eine umfassende Geometrieerzeugung für die Fahrzeugentwicklung vorgestellt (Hirz et al. 2008a, 2008b; Rosbacher et al. 2009). Im Wesentlichen wird beschrieben, wie mithilfe von modernen CAD-Anwendungen Fahrzeugkonzepte parametrisierbar aufgebaut werden können. Aus externen Datenbanken werden dabei geometrische Abmessungen, ergonomische Daten, sicherheitsrelevante Daten sowie die Fahrzeugzulassung gewährleistende Daten abgerufen. Grundlage für die PKW-Maßkonzeption bildet dabei die im SAE J826 definierte SAE-Körperumrissschablone und die mit ihr verbundenen Normen.

11 Zurzeit laufen Verhandlungen zwischen der Firma Dassault und Human Solutions mit dem Ziel einer weiterreichenden Zusammenarbeit und Weiterentwicklung, um RAMSIS, das über weit umfangreichere Tools für die Fahrzeugentwicklung verfügt als Human Builder und das vor allem in der Fahrzeugindustrie eine weite Verbreitung gefunden hat, in das CATIA-System zu integrieren.

7.2 Sitzen

7.2.1 Berücksichtigung unterschiedlicher Anthropometrien

Bereits in den dreißiger Jahren hat man begonnen, die individuellen anthropometrischen Bedingungen durch die Einrichtung einer Sitzverstellung zu berücksichtigen. Unter Anwendung der wissenschaftlichen Anthropometrie, welche die Körperelemente in Form von Perzentilen kategorisiert, erschien es sinnvoll, eine Spannweite von Perzentilen festzulegen, um dadurch einen gewissen Prozentsatz der Bevölkerung als mögliche Nutzer des Fahrzeugs zu berücksichtigen. Im Bereich der Ergonomie wird häufig empfohlen, dafür die Spannweite von der 5-Perzentil-Frau bis zum 95. Perzentil-Mann zu berücksichtigen. Auf diese Weise erfasst man theoretisch 95 % der Bevölkerung. 97,5 % berücksichtigt man, wenn man die Spannweite von der 2,5 % Frau bis zum 97,5 % Man ausdehnt.

Nach SAE 1517 ergibt sich dann für die Distanz zwischen dem vordersten SgRP der kleinen Frau und dem Fußballenpunkt BOP[12]:

$$X_{2,5} = 687{,}1 + 0{,}895336\,Z - 0{,}00210494\,Z^2 \tag{7.4}$$

und analog für die Distanz zwischen dem hintersten SgRP des großen Mannes und dem Fußballenpunkt BOP

$$X_{97,5} = 936{,}6 + 0{,}613879\,Z - 0{,}00186247\,Z^2 \tag{7.5}$$

der notwendige Verstellbereich, der zu berücksichtigen ist, um 97,5 % der Bevölkerung zufriedenzustellen, mit:

$$TL23 = X_{97,5} - X_{2,5} \tag{7.6}$$

12 Den in SAE veröffentlichten Formeln sind Perzentilwerte aus amerikanischen Tabellen der 70er Jahre zugrunde gelegt.

Die genannten Perzentile beziehen sich dabei auf die Körperhöhe. Nun ergeben sich aber gerade in der engen Fahrzeugkabine spezielle Probleme dadurch, dass es individuelle Proportionsunterschiede gibt, welche sich signifikant auf die Maßkonzeption auswirken. So muss beispielsweise eine langbeinige kleine Frau den Sitz etwas weiter nach oben fahren, um wegen ihres kurzen Oberkörpers noch einen hinreichend guten Blick auf die Straße zu haben. Sie kann dadurch mit dem unteren Rand des Lenkrads in Kollision geraten. Eine kurzbeinige kleine Frau muss hingegen den Sitz sehr weit nach vorne schieben, um die Pedale korrekt zu betätigen. Mit ihrem Oberkörper gerät sie dann mit dem Lenkrad in Kollision, wenn dieses nicht hinreichend in der Längsposition verschiebbar ist. Ähnliche Probleme ergeben sich für den großen kurzbeinigen bzw. langbeinigen Mann. Allein aus dieser Überlegung geht schon hervor, dass eine bloße Längsverschiebung des Sitzes nicht ausreicht, um unterschiedliche anthropometrische Bedingungen zu berücksichtigen.

Wegen der vielen Einflussgrößen, welche die Körperhaltung bestimmen, ist die Anwendung von Menschmodellen sehr hilfreich und gewinnt mit dem Einsatz von CAD-Techniken in der Konstruktion auch mehr und mehr Bedeutung (siehe die Übersicht von Software in ▶ Abschn. 7.1.3). Allerdings basieren nach wie vor viele Vorgehensweisen in der Fahrzeugentwicklung auf firmenspezifischen Erfahrungswerten und entwicklungsgeschichtlich gewachsenen Vorgehensweisen. Menschmodelle werden in der Industrie weniger zur initialen Auslegung genutzt, als zur Verifizierung von Konzepten. Wünschenswert ist deshalb die Entwicklung einer objektiv nachvollziehbaren Vorgehensweise, welche ergonomische Kriterien von Anfang an berücksichtigt, ohne praktische Einschränkungen zu vernachlässigen. Die Bedeutung innerhalb der Automobilindustrie berücksichtigend wird im Folgenden dazu auf das Menschmodell RAMSIS zurückgegriffen, wenngleich viele der hier dargestellten Anwendungen auch mit anderen Menschmodellen durchführbar sind.

Das Menschmodell RAMSIS ermöglicht eine Auswahl nach den anthropometrischen Kriterien Körperhöhe, Korpulenz und Proportion. Ohne

Tab. 7.3 Zusammenstellung von häufig verwendeten RAMSIS-Manikins im Zusammenhang mit Fahrerplatzanalysen (Kurzbezeichnungen nach Rekittke und Brückner 2010)

	Größe	Korpulenz	Proportion	Körperhöhe [mm]	Stammlänge [mm]
Mann (M)	sehr groß (T)	mittel (M)	mittel (M)	1878	974
		dick (H)	kurzbeinig (S)	1880	1010
		dünn (S)	langbeinig (L)	1896	953
	mittel (M)	mittel (M)	mittel (M)	1766	929
	sehr klein (S)	mittel (M)	mittel (M)	1651	879
Frau (F)	sehr groß (T)	mittel (M)	mittel (M)	1750	919
	mittel (M)	mittel (M)	mittel (M)	1647	876
	sehr klein (S)	mittel (M)	mittel (M)	1550	833
		dick (H)	kurzbeinig (S)	1539	856
		dünn (S)	langbeinig (L)	1549	808

Abb. 7.11 Beispiele für „RAMSIS-Familien", wie sie bei Volkswagen/Audi, BMW und Mercedes Anwendung finden

Berücksichtigung von möglichen Zwischentypen (erstellbar durch den Bodybuilder) stehen damit unmittelbar insgesamt je 45 unterschiedliche männliche und weibliche Manikins für Gestaltungsaufgaben zur Verfügung (siehe ▶ Abschn. 5.2.2). Aus dieser Kollektion stellt sich jede Autofirma eine sog. RAMSIS-Familie zusammen, die für die Überprüfung und Gestaltung herangezogen wird. Gegebenenfalls erhält diese Familie auch innerhalb eines Herstellers Modifikationen in Abhängigkeit von der Kenntnis des Marketings über die Käufereigenschaften von spezifischen Modellreihen. Abbildung 7.11 zeigt Beispiele für die Zusammensetzung dieser RAMSIS-Familie bei unterschiedlichen Fahrzeugfirmen.

Beispielhaft wird in Tab. 7.3 eine Zusammenstellung solcher RAMSIS-Manikins einschließlich der wichtigen anthropometrische Daten wiedergegeben, die teilweise auch in den folgenden Darstellungen Anwendung findet. Zur Charakterisierung der Manikins werden allerdings in den unterschiedlichen Unternehmungen verschiedene Kurz-

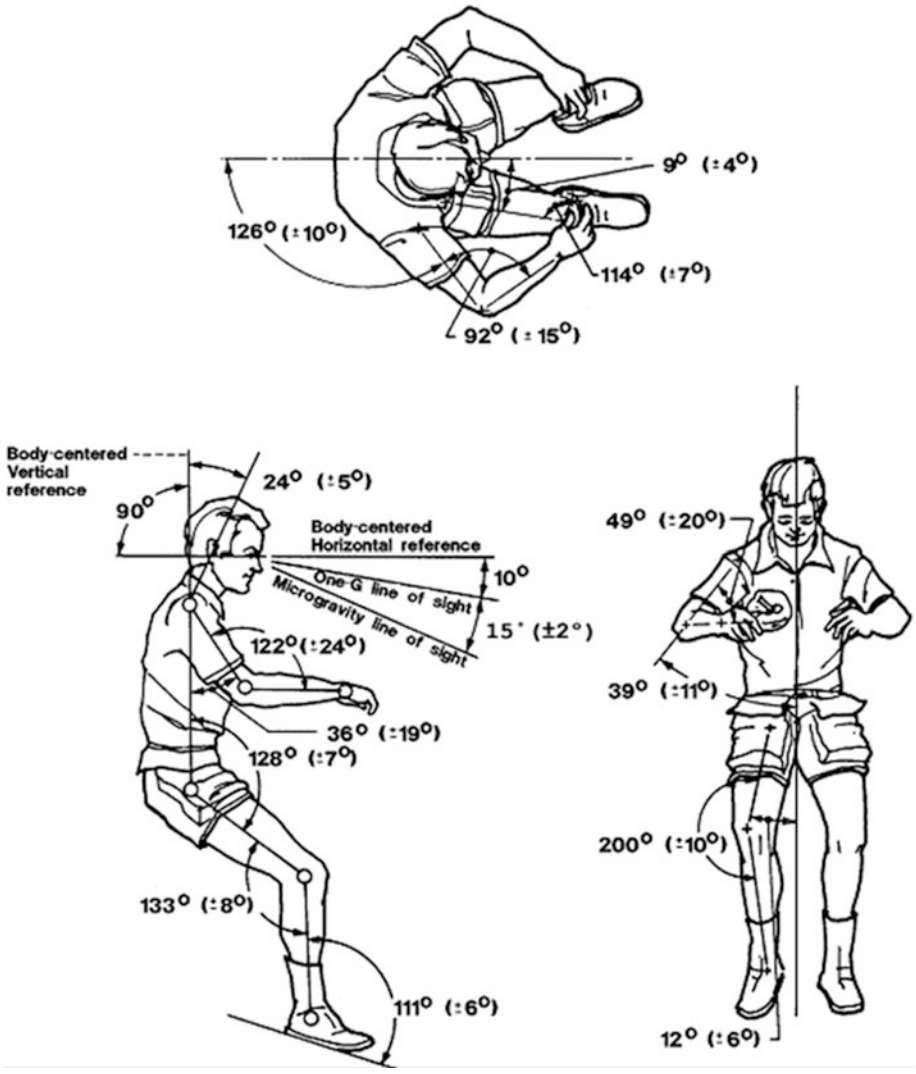


Abb. 7.12 Von der NASA angegebene an drei Astronauten beobachtete Winkel in entspannter Haltung

bezeichnungen verwendet (siehe auch Abb. 7.11). In den meisten Fällen sind von besonderem Interesse die Extremtypen (Kurzbezeichnung nach Tab. 7.3)

- Sehr großer langbeiniger Mann von mittlerer Korpulenz (MTMM),
- Sehr großer kurzbeiniger dicker Mann (MTHS),
- mittel großer Mann mittlerer Korpulenz mit mittleren Proportionen (MMMM) bzw. sehr große Frau mittlerer Korpulenz mit mittleren Proportionen (FTMM),
- sehr kleine, dicke, kurzbeinige Frau (FSHS)
- sehr kleine, dünne, langbeinige Frau (FSSL)

In ihrer Körpergröße entsprechen das Manikin „sehr großer Mann" dem 95. Perzentil, das Manikin „mittelgroßer Mann" bzw. „sehr große Frau" dem 50-Perzentil-Mann und das Manikin „sehr kleine Frau" der 5-Perzentil-Frau.

Tab. 7.4 Zusammenstellung der von verschiedenen Forschern experimentell gefundenen Komfort Winkelwerte in Seitenansicht

Untersucher	Torso	Schulter	Ellenbogen	Hüfte	Knie	Fußg.
NASA (1995)	–	36° ± 19°	122° ± 24°	128° ± 7°	133° ± 8°	–
Dirlich (2010)	–	27° ± 8°	105° ± 5°	145° ± 4°	144° ± 6°	–
Dreßel und Kain (1985)	25° ± 3°	39° ± 12°	146° ± 17°	107° ± 7°	122° ± 8°	84° ± 16°
Wallentowitz (1995)	20°–30°	28°	105°–115°	100°–105°	110°–130°	90°
RAMSIS (1990)	27°	22°	127°	99°	119°	103°
Kahlmeier und Marek (2000)	15°–25°	15°–35°	85°–110°	85°–110°	95°–120°	85°–95°
Hirao et al. (2006)	31° ± 4°	–	–	111° ± 5°	125° ± 9°	158° ± 12°
Lorenz (2011)	27° ± 4°	33° ± 10°	124° ± 18°	100° ± 6°	111° ± 7°	92° ± 8°

7.2.2 Fahrer

7.2.2.1 Sitz

Sitzhaltung

Wegen der stark eingeschränkten Bewegungsfreiheit und der damit einhergehenden oft über lange Zeit fast unveränderten Körperhaltung ist speziell für den Fahrerarbeitsplatz der Sitzposition höchste Aufmerksamkeit zu widmen. Das Problem ist dabei, dass der Mensch bezüglich seiner Körperhaltung – wenn man von individuellen Bewegungseinschränkungen einmal absieht – sehr tolerant ist und Fehlhaltungen zumindest in der ersten Wahrnehmung kaum bemerkt. In der Forschung wird in diesem Zusammenhang den sog. Komfortwinkeln besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Sachlich finden diese ihre Begründung darin, dass es für jeden Muskel eine neutrale Position gibt, bei der dieser weder kontrahiert noch extrahiert ist. Im Prinzip kann man diese Winkel experimentell nur in einer entspannten Situation im schwerelosen Zustand finden. Die von der NASA veröffentlichten Winkelwerte werden deshalb oft als Referenz dafür verwendet (Abb. 7.12). Von Dirlich (2010) wurden spezielle Unterwasserversuche mit nicht vorgebildeten Probanden vorgenommen, wobei durch eine besondere Versuchstechnik ein entspannter Zustand der Probanden herbeigeführt wurde. Es zeigen sich hier bereits deutliche Unterschiede zu den von der NASA veröffentlichten Werten. Tabelle 7.4 gibt eine Zusammenstellung von in der Literatur veröffentlichten auf experimenteller Basis gefundenen Komfortwinkelwerten. Obwohl es zwischen diesen Winkelwerten gemeinsame Schnittmengen gibt, zeigen die jeweiligen Variationsbereiche erhebliche Unterschiede. Die für RAMSIS angegebenen Werte sind dabei in der Beobachtung gefundene wahrscheinlichste Werte. Ein Optimierungsalgorithmus sorgt unter Berücksichtigung der eingegebenen Restriktionen (z. B. Hände an das Lenkrad, Füße auf Pedale und Fußabstützung, Gesäß auf den H-Punkt, näheres s. u.) und der gegenseitigen Abhängigkeit der Winkel dafür, die wahrscheinlichste Stellung zu finden. Diese Stellung wird sodann hinsichtlich des zu erwartenden Komforts bewertet, wobei hier als Prognosemodell multiple Regressionen zwischen den im Experiment beobachteten Winkelstellungen der Gelenke und den Komfortaussagen in standardisierten Fragebögen herangezogen wurden (Krist 1993). Die Untersuchung von Lorenz (2011) zeigen den entsprechenden Wertebereich, der im praktischen Versuch gefunden werden kann. Die von RAMSIS eingenommene Haltung, die durch keine Restrik-

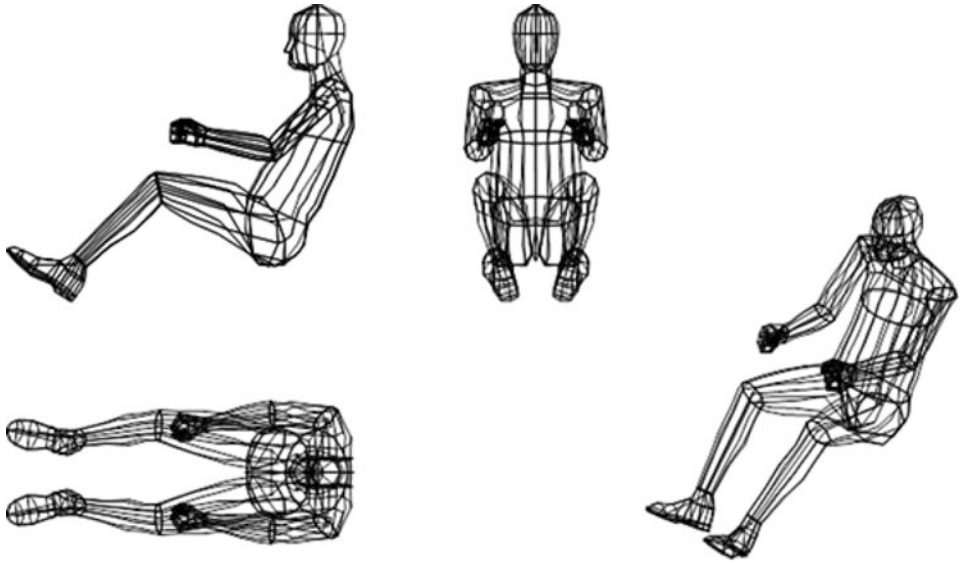


Abb. 7.13 Vier Ansichten von RAMSIS in restriktionsfreier Haltung

tionen eingeschränkt ist (Abb. 7.13), ist somit nicht unter allen Umständen die physiologisch günstigste. Es handelt sich in jedem Fall um die unter den gegebenen Restriktionen von Probanden wahrscheinlich angenommene Haltung, was auch durch Evaluationsexperimente bestätigt worden ist (Seidl 1994; Kolling 1997; Nilsson 1999). Es empfiehlt sich gegebenenfalls, die Körperhaltung mittels des RAMSIS H-30 Moduls zu berechnen, welches das ursprüngliche Sitzhaltungsmodell durch Interpolation zwischen dem Pkw- und dem Lkw-Sitzhaltungsmodul dahingehend ergänzt, dass auch korrekte Körperhaltungen bei H30 Maßen deutlich größer 260 mm möglich sind (z. B. für die Konzeption der Fahrerhaltung in VANs und SUVs).

Trotz der genannten Einschränkungen wird für die ersten folgenden Überlegungen die RAMSIS-Körperhaltung verwendet, die sich ergibt, wenn keinerlei externe Restriktionen gesetzt werden (siehe Abb. 7.13).

Verstellbereich

Durch Verstellung des Sitzes, d. h. im ersten Schritt durch Variation des H-Punktes, ist es möglich, die Erfordernisse unterschiedlicher anthropometrischer Bedingungen zu erfüllen. Um eine diesbezüglich korrekte Konstruktion mittels eines Menschmodells durchzuführen, ist es notwendig, Körperpunkte an diesem Modell festzulegen, deren Variation die notwendigen Verstellbereiche zur Anpassung an die verschiedenen Anthropometrien wiedergibt. Abbildung 7.14 zeigt am Beispiel RAMSIS die für eine erste Anwendung unbedingt notwendigen Körperpunkte.

Um zu einer von einer gegebenen Fahrzeugkonzeption unabhängigen, ergonomische Forderungen weitgehend berücksichtigenden Lösung zu kommen, ist es notwendig, einen dieser Körperpunkte zu fixieren und dann zu untersuchen, welche Variationen für die anderen Körperpunkte sich daraus bei sonst freier Haltungsoptimierung ergeben. Vogt et al. (2005) haben dies mit den in Abb. 7.14 definierten Körperpunkten durchgeführt. In Abb. 7.15 sind die Ergebnisse für die beiden am ehesten praxisrelevanten Varianten dargestellt. Die augenpunktfixierte Variante, welche übrigens für die Gestaltung von Flugzeugcockpits angewendet wird, hätte den Vorteil, dass für Fahrer beliebiger Körpergröße und -proportion immer die gleichen Sichtverhältnisse herrschen würden, welche dann für diesen Zweck optimiert werden können. Wie aus Abb. 7.15 hervorgeht, wäre dies allerdings mit einem großen Verstellbereich gerade der Pedale verbunden, was aus vielen praktischen Gründen ausscheidet. Bei der Variante fester Fer-

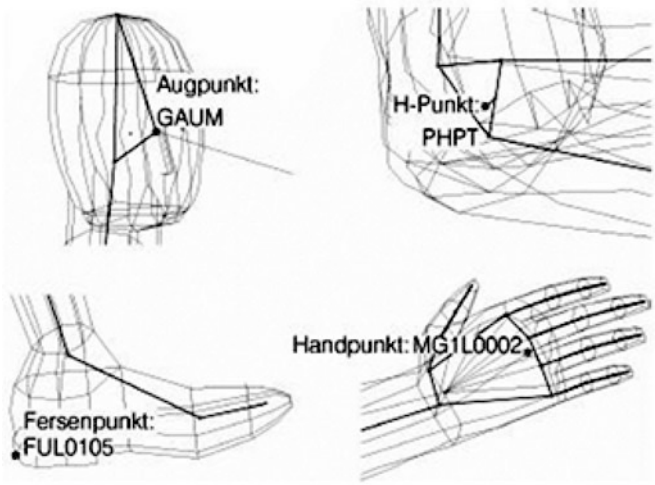


Abb. 7.14 Für die Fahrplatzauslegung unbedingt notwendige RAMSIS-Körperpunkte (aus Vogt 2003)

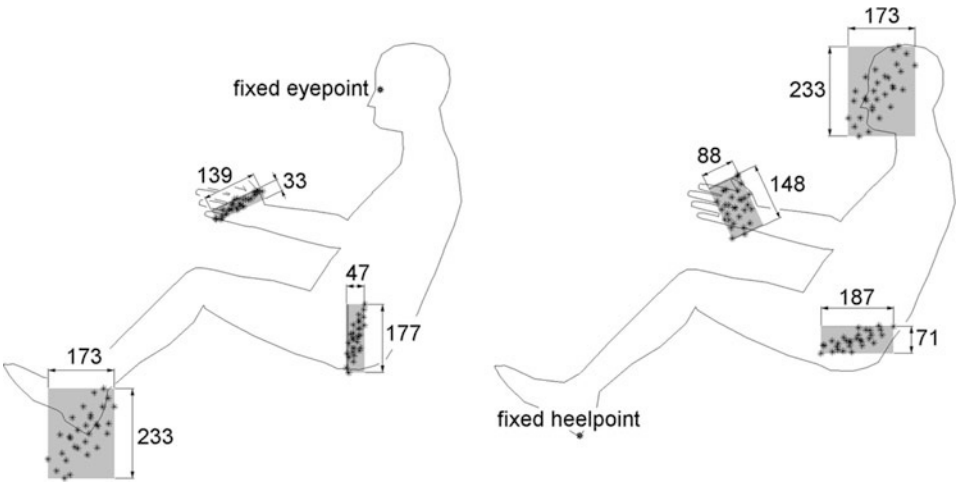


Abb. 7.15 Augenpunkt und Fersenpunktfixierte Anordnung von 30 unterschiedlichen RAMSIS-Manikin ohne weitere Restriktionen

senpunkt, wie sie bei heutigen Fahrzeugen üblich ist, ergibt sich eine auf den ersten Blick kuriose und der Praxis scheinbar zuwiderlaufende Erkenntnis: In optimaler Haltung sitzen kleine Personen tiefer (und natürlich weiter vorne) und große höher (und natürlich weiter hinten, siehe Abb. 7.15 rechts). Die Praxis sieht genau die umgekehrte Strategie vor, da der Augenpunkt kleiner Personen gegenüber größerer Personen angehoben werden muss, damit ihre Blicklinie oberhalb von Lenkrad und Motorhaube liegt. Letztlich bedeutet das zuletzt dargestellte Ergebnis nichts anderes, als dass zur Aufrechterhaltung gleicher Bedingungen – zumindest theoretisch – kleine Personen kleinere Autos und größere Personen größere Autos benötigten. Die von äußeren Randbedingungen vollkommen freie Einstellung bei den Versuchen von Lorenz (2013) zeigt auch, dass Personen die Maße des Fahrerplatzes quasi nach der eigenen Körpergröße einstellen, d. h. die Abmessungen des Fahrerplatzes wachsen linear mit den jeweiligen anthropometrische Maßen.

In der Praxis ist eine derartige, nur ergonomische Forderungen erfüllende Lösung nicht durchführbar. Dies ergibt sich schon allein aus dem Grund, dass, wie angesprochen, das Kaufverhalten

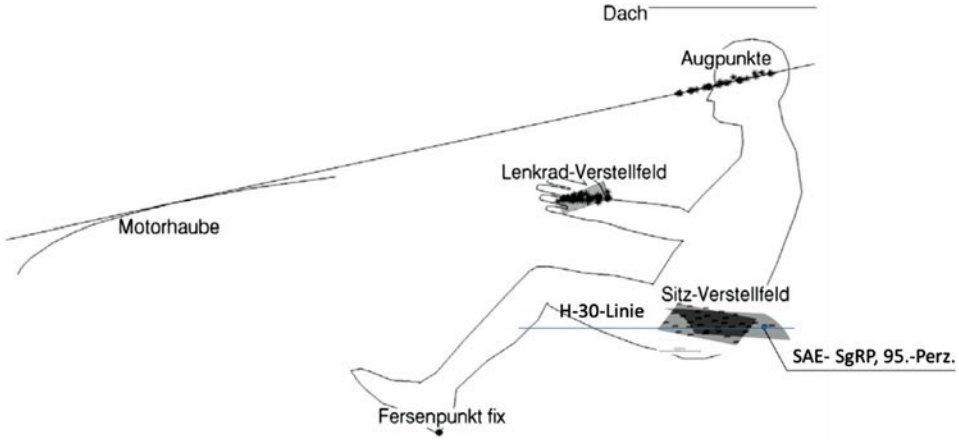


Abb. 7.16 Augenpunkt optimierte Haltung sowie notwendige Verstellfelder

der Kundschaft im Wesentlichen durch die Attraktivität des Exterieurs beeinflusst wird. Im Extremfall muss sogar dafür gesorgt werden, dass das Kundenkollektiv – irgendwie – in das attraktive Außendesign hineinpasst. Tatsächlich ergeben sich aber im Allgemeinen passable Kompromisse, die in gegenseitiger Absprache zwischen Design und Ergonomie – und natürlich auch der Vertreter diverser weiterer technischen Forderungen (z. B. aus dem Bereich der passiven Sicherheit) getroffen werden. Um solche Kompromisse zu realisieren, werden in der Software von RAMSIS so genannte Restriktionen gesetzt, die die Berechnung der Haltung beeinflussen. Verschiedene Arbeiten haben sich damit auseinandergesetzt, welche Restriktionen gesetzt werden müssen. So fand Kolling (1997), dass insbesondere von großen Personen zum Dach ein Mindestabstand von 50 mm gehalten wird, wobei gegebenenfalls durch Einstellung der Rückenlehne diese subjektive Forderung erfüllt wird. Es werden für alle Berechnungen folgende Restriktionen gesetzt:

- Fersenpunkte rechts und links auf die Fersenlinie; der rechte Fuß hält das Fahrpedal zu 1/3 durchgedrückt.
- H-Punkt in Sitzmittelebene
- Becken seitlich fixieren gegen Kippen und Verdrehen
- Kopfspitze unterhalb der Dachebene mit 50 mm Kopffreiheit
- Blickrichtung in der Neutralhaltung fixieren.

Der SgRP wird durch den in der RAMSIS-Software realisierten SAE-Mann gefunden, dessen Anthropometrie der H-Punkt-Messmaschine nachgebildet ist. Für diesen SAE-Mann wird zusätzlich zu den obigen Restriktionen der H-Punkt auf eine Ebene in H30-Höhe gelegt. Im nächsten Schritt wird für das Manikin „sehr großen Mann, mittlere Korpulenz, kurzbeinig" (MTMS) mit den angegebenen Restriktionen die Haltung berechnet, wodurch sich die höchste Augenpunktlage ergibt. Von diesem Augenpunkt wird nun eine Tangente über die Motorhaube gelegt (Dach, Motorhaube ebenso wie die bereits erwähnte H30-Linie sind über das Exterieurdesign festgelegte Größen), wodurch unter den gegebenen Bedingungen die optimale Sicht auf die Straße definiert ist. Für alle anderen Manikins mit ihren unterschiedlichen Anthropometrien wird diese Linie als weitere Restriktionen für den Augenpunkt definiert. Das Ergebnis zeigt Abb. 7.16.

Gegenüber tatsächlich realisierten Lösungen zeigen sich zwei Auffälligkeiten:

- das notwendige Verstellfeld für das Lenkrad in Längsrichtung ist weit größer als normalerweise realisiert. Zudem ist festzuhalten, dass die häufig realisierte Lenkradverstellung, die darin besteht, das Lenkrad um eine zur y-Achse ausgerichteten Linie zu verschwenken, bei weitem nicht ausreicht, um Personen unterschiedlicher Körpergröße und Proportionen zufriedenzustellen.
- Die Ausrichtung des notwendigen Sitzverstellfeldes ist zu den realisierten Lösungen

Abb. 7.17 die Fahrerhaltung beeinflussenden Sichtbedingungen (Lorenz 2013)

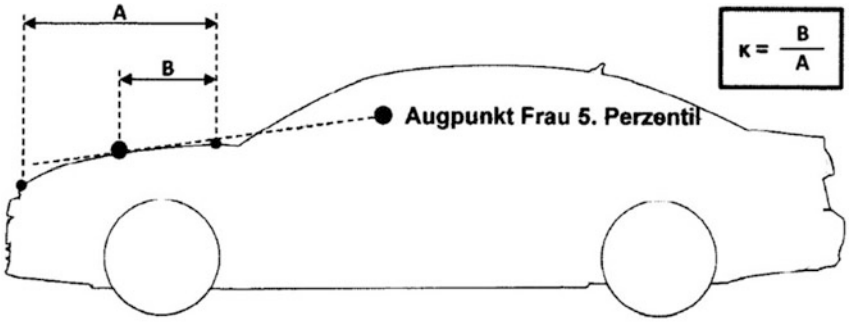


Abb. 7.18 Definition des Haubenfaktors κ (Die angegebenen Maße sind vom Windlaufpunkt gemessen; nach Lorenz 2013)

genau umgekehrt. Dies mag darauf zurückzuführen sein, dass die technische Realisierung einer Sitzhöhenverstellung mit einer parallelogrammartigen Mechanik die umgekehrte Lösung bevorzugt.

In der bisherigen Abhandlung sind nur wenige Vorgaben gemacht, nämlich Fersenpunkt, Höhe der H-30-Linie, Dachhöhe und Position der Motorhaube. In der Praxis erfolgt die Sitzeinstellung auf der Grundlage weiterer Restriktionen, die teilweise auch durch die vorhandene technische Realisierung geben sind. Lorenz (2013) hat sowohl durch Probandenbefragung als auch in seiner experimentellen Beobachtung herausgefunden, dass über alle Körpergrößen hinweg die Erreichbarkeit der Pedalerie das führende Kriterium für die Ausrichtung der Sitzhaltung ist. Darüber hinaus übernimmt für klein gewachsene Testpersonen die Qualität der Sichtbedingungen eine bedeutende Rolle. Mit zunehmender Körpergröße nimmt die Relevanz der Sicht nach außen jedoch wieder ab, wohingegen der Stellenwert des Raumbedarfs steigt. Im Einzelnen zeigen sich folgende Ergebnisse: Die Lage des Windlaufpunktes (siehe auch Abb. 7.17) hat bei kleinen und mittleren Personen ein erkennbares Gewicht für die Sitzeinstellung, nicht jedoch bei großen Personen. Die Fahrbahnsicht hat bei kleinen Personen hohes Gewicht, das mit zunehmender Körpergröße abnimmt. Hingegen bekommt die Dachrahmenlage erst bei großen Personen für die Sitzeinstellung ein gewisses Gewicht. Die Brüstungshöhe wird von keiner der Personengruppen als Einfluss auf die Sitzeinstellung wahrgenommen, wobei allerdings subjektiv eine niedrigere gewünscht wird, als sie ein Mittelklassewagen, wie der Audi A6, anbietet. Auch unterschiedliche Fahrbahnsichtwinkel haben keinen Einfluss auf die Sitzhaltung. Alle Personen

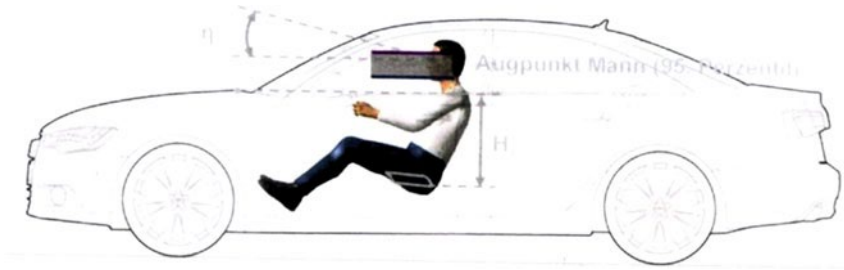


Abb. 7.19 Bereich, in dem es nicht zu sichtbedingten Haltungsänderungen kommt

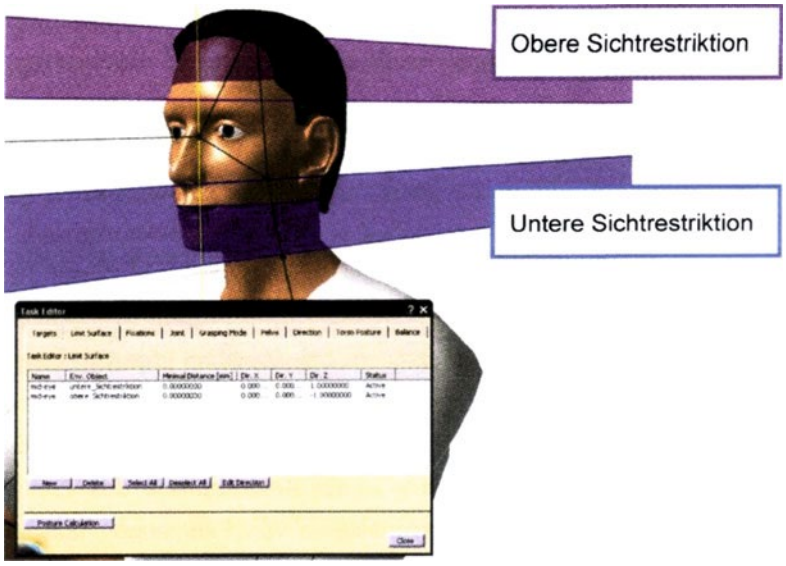


Abb. 7.20 In RAMSIS implementierte Sichtgrenzflächen nach Lorenz (2013)

wählen jedoch, wenn es möglich ist, die Sitzposition so, dass sie auf die Motorhaube blicken können, um so die Fahrzeugdimensionen besser abschätzen zu können. Als Maßzahl dafür wurde von Lorenz (2013) ein spezieller Haubensicht-Faktor κ definiert (Abb. 7.18).

Für die Gestaltung der Fahrzeugdimensionen unter Berücksichtigung der Sichtbedingungen ergeben sich nach diesen Untersuchungen folgende Empfehlungen, welche bei Nichtbeachten deutlichen Einfluss auf das Einnehmen einer ungünstigen Sitzhaltung haben:

- Vertikale Distanz Windlaufpunkt H_W – H-Punkt: $H_W < 500$ mm
- Vertikale Distanz Brüstungshöhe H_B – H-Punkt: $H_B < 500$ mm
- Fahrbahnsichtwinkel in Bezug auf die Augenposition der 5-Perz.-Frau: > 8°
- Ampelwinkel in Bezug auf die Augenposition des 95.Perz.-Mann > 13°
- Haubensichtfaktor $\kappa \geq 0{,}5$

Da für die Wahl der Sitzposition nach den Ergebnissen dieser Arbeit der Windlaufpunkt und die Dachrahmenlage die dominierenden Einflussparameter sind, wird eine obere und untere Grenzebene abgeleitet, die für die Positionierung des RAMSIS-Manikins herangezogen wird, um die wahrscheinlichste Sitzposition unter Berücksichtigung der Sichtbedingungen im CAD zu berechnen (Abb. 7.19). Diese Grenzebenen stellen zusätzliche Restriktionen zu den oben erwähnten, bisher schon verwendeten dar. Ihre Berechnung kann in die RAMSIS-Software integriert werden (Abb. 7.20).

Für die Anpassung des RAMSIS-Manikin an eine gegebene Fahrzeuggeometrie ergibt sich noch ein weiteres Problem: bei der individuellen

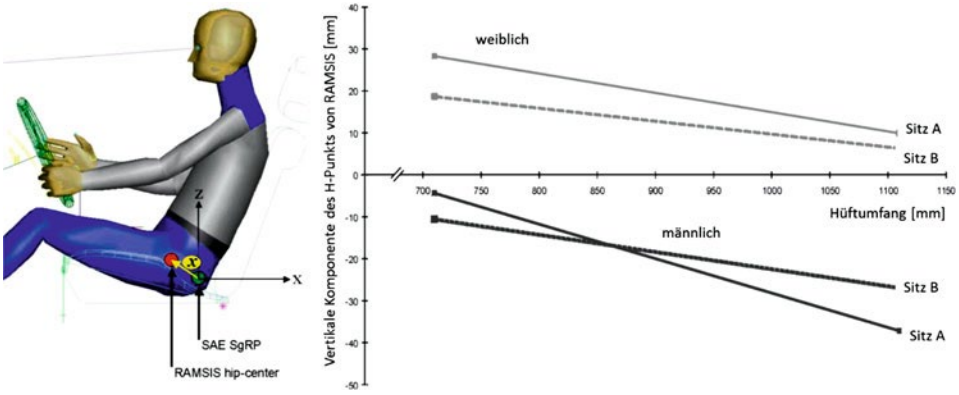


Abb. 7.21 Offset zwischen RAMSIS-Hüftdrehpunkt und dem SAE-SgRP

Anpassung des RAMSIS-Manikin an einen Probanden (beispielsweise durch Anwendung der PCMAN-Methode oder des von der RAMSIS-Software angebotenen Bodybuilders) erhält man eine wesentlich realistischere Position des Hüftdrehpunkts in dem Sitz als durch die SAE-H-Punkt-Messmaschine. Es ergibt sich also ein Offset zwischen dem individuellen Hüftdrehpunkt und dem sitzfesten SgRP. Nachdem die Polstereigenschaften jedes Sitzes in komplexer Weise unterschiedlich sind, muss dieses Offset für jeden Sitztyp mit einer entsprechenden Anzahl von Probanden neu gemessen werden. Das Ergebnis vieler derartiger Messungen kann folgendermaßen zusammengefasst werden: Die z-Komponente des Offsets hat den größten Einfluss auf die RAMSIS-Sitzposition. Sie hängt wesentlich vom Geschlecht, dem Hüftumfang des Probanden sowie natürlich von Eigenschaften des Sitzes ab. Personen mit größerem Umfang, die im Allgemeinen auch schwerer sind, sinken dabei offensichtlich weniger in den Sitz ein als schmale schlanke. Sie schwimmen quasi auf der Sitzkontur auf (Abb. 7.21). Wenn man also aus der Positionierung verschiedener RAMSIS-Typen den Sitzverstellbereich festlegen will, so ist dieses Offset zusätzlich zu berücksichtigen. Bothe (2010) bezeichnet deshalb den vom RAMSIS-Hüftzentrum zum SgRP weisenden Punkt „Positionierpunkt PHPT".

Er legt zusätzlich zu den genannten Restriktionen weitere fest, welche die Haltung des RAMSIS-Manikin in Anhängigkeit von einem gegebenen Fahrzeugkonzept steuern, um zu einer realistischen Prognose der Haltung unterschiedlicher Fahrertypen zu kommen. Dazu gehört, dass Flächen wie der Innenboden oder die Fahrpedaloberfläche von Fersenpunkt bzw. Sohlenpunkt berührt werden müssen. Innenraumbegrenzungen wie Dachhimmel, Instrumententafel oder Tunnelverkleidungen dürfen nicht durchdrungen werden. Der oben beschriebene Positionierpunkt muss sich in der Fläche des gegebenen Sitzverstellfeldes befinden. Definierte Hautpunkte der Handinnenfläche haben eine Kontaktbeziehung zu den resultierenden Flächen der möglichen Lenkradpositionen (siehe auch ▶ Abschn. 7.2.2.2).

Abbildung 7.22 zeigt die Fahrerhaltung verschiedener RAMSIS-Mannikin in einem gegebenen Mittelklassekonzept (Daimler W212), die nach dieser Methode errechnet worden sind. Obwohl hier keine Extremtypen als Beispiel herangezogen worden sind, zeigen sich einige auch in der Praxis beobachteten Auffälligkeiten (Bothe 2010):

- Die kleine Frau (FSMM) sitzt sehr aufrecht und weit vorne im Fahrzeug, weil sie vordringlich mit den Füßen die feststehende Pedalanlage erreichen muss. Um gleichzeitig eine ausreichende Sicht über Lenkrad und Instrumententafel zu erlangen, muss sie eine aufrechte Sitzposition bevorzugen.
- Der mittelgroße Mann mit kurzem Oberkörper und langen Beinen (MMML) zeigt eine typische Verhaltensweise, indem er eine entspannte Sitzposition der guten Sicht aus dem Fahrzeug vorzieht. Er nutzt den unteren Bereich des Sitzverstellfeldes.

Abb. 7.22 Fahrerhaltung verschiedener Auslegungsmanikins in einem gegebenen Mittelklassewagen (aus Bothe 2010)

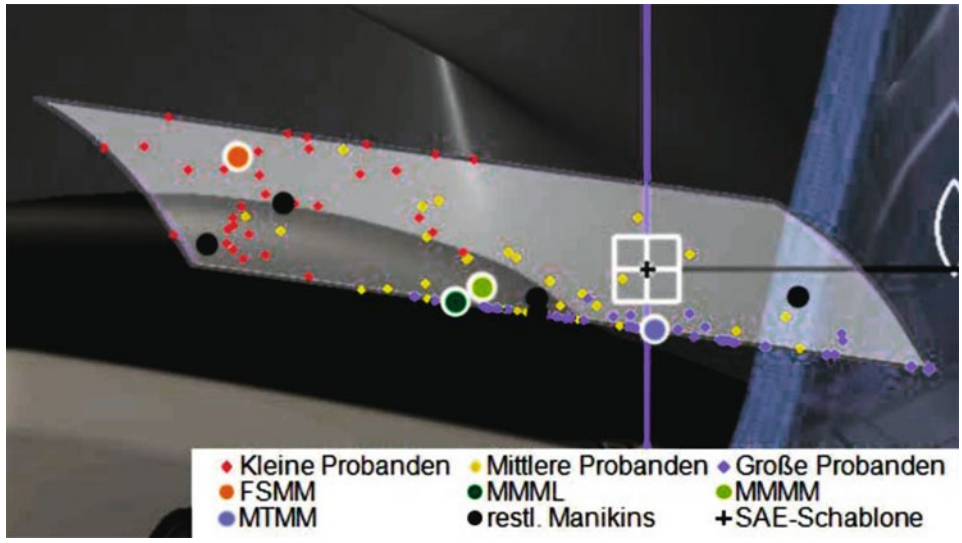


Abb. 7.23 Lage der Hüftpunkte von Probanden und der Positionierpunkt PHPT für die Manikins aus der verwendeten RAMSIS-Familie (aus Bothe 2010)

- Der mittelgroße Mann mittlerer Statur (MMMM) kann das volle Variationsfeld der Einstellmöglichkeiten nutzen. Er findet eine aufrechte und entspannte Sitzhaltung. Sein Augenpunkt ist im Vergleich zu dem langbeinigen mittleren Mann deutlich höher.
- Der große Mann mittlerer Statur (MTMM) kann wegen der begrenzten Kopffreiheit keine aufrechte Sitzhaltung einnehmen, sondern muss die Lehne nach hinten stellen. Daraus resultiert eine flache Sitzhaltung mit durchgestreckten Armen. Seine Augenpunkte sind sehr weit hinten positioniert.

Die gefundenen Augenpunkte bei Verwendung aller Manikins der RAMSIS-Familie sind Grundlage für die Konzeption der Sicht (weiteres siehe ▶ Abschn. 7.3). Aus der Positionierung der verschiedenen Manikins lässt sich auch der Nutzungsbereich des Sitzverstellfeldes analysieren. ◘ Abbildung 7.23 zeigt das entsprechende Ergebnis für die bei Bothe (2010) verwendete RAMSIS-Familie sowie Probandenpositionen.

Das Verstellfeld wird demnach von den kleinen Probanden im vorderen Bereich vollständig genutzt. Die mittleren und großen Probanden nutzen von dem Verstellfeld im hinteren Bereich bevorzugt nur die untere Ablaufebene (siehe auch Lorenz 2013). Wie auch in anderen Untersuchungen beobachtet, wird durch die RAMSIS-Manikins die vorhandene Sitzverstellung nicht im gleichen Ausmaß ausgenutzt wie von realen Probanden[13].

Abstützung

Die errechneten Sitzhaltungen müssen durch eine entsprechende Sitzkonstruktion unterstützt werden. Der Gestaltung dieses Sitzes kommt sowohl hinsichtlich der Minimierung des Diskomforts als auch hinsichtlich einer gesunden und ermüdungsfreien Körperhaltung große Bedeutung zu. Zugleich wird aus dem zuvor Diskutierten ersichtlich, dass der Sitz immer nur in Verbindung mit der jeweiligen Sitzhaltung, welche durch die jeweiligen Randbedingungen mitbestimmt wird, gestaltet bzw. beurteilt werden kann. Insbesondere soll durch die Sitzgestaltung das Entstehen von Rückenschmerzen, wie es bei langem, quasi unbewegtem Sitzen auftritt, verhindert werden. Die Ursache für das Entstehen von Rückenschmerzen kann, kurz gefasst, durch folgende Punkte zusammengefasst werden:

- Mangelversorgung der Bandscheiben auf Grund zu geringer Bewegung der Wirbelsäule: Dieser Ursache kann eigentlich nur durch Bewegung entgegengewirkt werden, wobei Fremdbewegung (also auch Massage) wegen der fehlenden Aktivierung der daran beteiligten Muskulatur nur eine geringe Wirkung hat. Wirkungsvolle Eigenbewegung ist jedoch nur durch Fahrtunterbrechung und entsprechende Gymnastikübungen möglich.
- Kriechen der Bänder auf Grund von Hyperflexion: Dieser Effekt tritt vornehmlich auf, wenn eine extrem ungünstige Körperhaltung eingenommen wird, also beispielsweise extrem kleine Körperwinkeln oder eine besonders stark kyphotischen (C-förmige) Haltung der Wirbelsäule.
- Statische Haltearbeit der Muskulatur: Zur Aufrechterhaltung einer Körperhaltung ist immer ein gewisser Muskelaufwand notwendig. Normalerweise liegt dieser beim Sitzen deutlich unterhalb der Ermüdungsgrenze von 15 % der maximalen Kraft des jeweiligen Muskelpaketes. Aber auch lang andauernde submaximale geringe Kräfte verbunden mit fehlender Bewegung können zu Verspannungen führen, die wohl die Hauptursache für als Rückenschmerzen gespürte Muskelschmerzen sind.
- Verkümmerte Rückenmuskulatur: wenn es aufgrund krankheitsbedingter Umstände oder geringer Muskelbeanspruchung im Lebensbereich außerhalb des Fahrzeugs zu einem übermäßigen Abbau der Rückenmuskulatur kommt, spielt der zuvor genannte Aspekt eine verstärkte Rolle.
- Whole-Body-Vibrations: langjährige vorwiegend vertikale Einwirkung von Ganzkörper-Schwingungen im Sitzen können zu bandscheibenbedingter Erkrankung der Lendenwirbelsäule führen, wobei die Dauer

13 Der Unterschied zu den Ergebnissen in Abb. 7.16 ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass hier von einem gegebenen Fahrzeugkonzept ausgegangen worden ist, während dort nur mit Einschränkungen weniger Restriktionen quasi auf der tabula rasa ein Fahrerhaltungskonzept entwickelt worden ist.

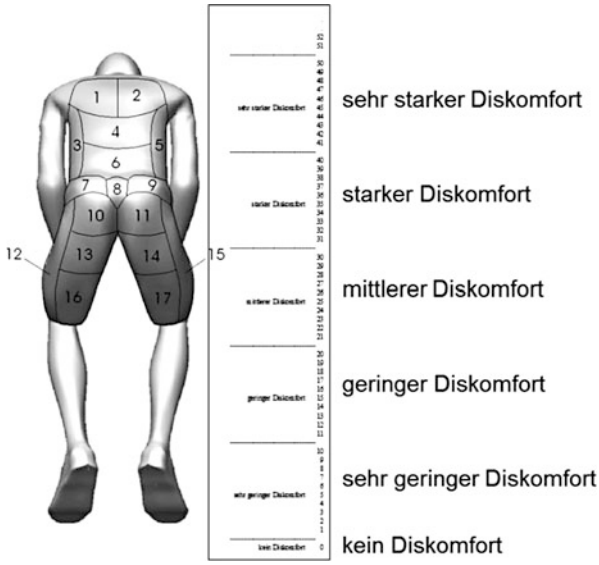


Abb. 7.24 Körperregionen und CP 50 Skala nach Hartung (2005) und Mergl (2005)

der Exposition einen deutlicheren Einfluss zu haben scheint als die Höhe der Exposition, was auf einen kumulativen Effekt hindeutet (Nordin 2003). Aufgrund von Untersuchungen von Bitter (2005) kann aber geschlossen werden, dass dieser Effekt weniger durch eine besonders gute Dämpfung der Sitzpolstereigenschaften vermieden wird als durch das Federungssystem des gesamten Fahrzeugs.

Ein häufig verwendetes Kriterium zur Beurteilung der Sitzqualität ist die Druckverteilung in der Sitz- und Lehnenfläche, denn Druck auf Hautareale mit wenig Fett und Muskeln bewirkt dort höhere Drücke (z. B. speziell unter den sog. Sitzbeinhöckern). Die Folge ist eine Verminderung der Blutzirkulation und damit der Versorgung des Gewebes mit Nährstoffen sowie eine Verlangsamung der Nervenleitgeschwindigkeit. Bereits Drücke von 20–33 mmHg (2,6–4,3 kPa) können zu diesem Effekt führen. Bei ungünstiger Körperhaltung kann es durch Scherkräfte dazu noch zu tangentialen Verschiebungen der Hautschichten kommen, welche ebenfalls eine Kompression der Blutgefäße und damit eine Unterversorgung des entsprechenden Gewebes verursacht. Weil sie messtechnisch praktisch kaum erfassbar sind, werden Scherkräfte heute als eine verkannte Ursache für das Entstehen von Diskomfort beim Sitzen angesehen.

Die Aufgabe der Polsterung ist es, hohe Drücke in der Berührfläche zwischen Körper und Sitz zu reduzieren und dabei zugleich unterschiedliche Körperformen aufzufangen. Eine einfache physikalische Überlegung zeigt, dass eine genaue Anpassung der Sitzkontur an die des Sitzenden zu einem vollkommenen Ausgleich der Drücke führt, allerdings nur, wenn keinerlei Bewegung des Sitzenden erfolgt[14]. Franz et al. (2011) haben diese Idee für einen Leichtbausitz aufgegriffen, indem sie eine geschickte Mittelung unterschiedlicher Gesäß- und Rückenkonturen vorgenommen haben. Wie im Folgenden noch gezeigt wird, würde allerdings ein vollkommen weicher Sitz, der praktisch kein örtlich verteiltes Sitzdruckprofil erzeugt, bei lang andauerndem Sitzen zu erheblichem Diskomfort führen. Auch bei dem erwähnten Leichtbausitz wurde eine Konturierung so vorgenommen, dass ein weitgehend optimales Sitzdruckprofil entstand. Es geht also um die Frage: was ist die optimale Sitzdruckverteilung? Dazu wurden von Hartung (2005) und Mergl (2005) umfangreiche Untersuchungen u. a. mit einem speziell konzipierten variablen Forschungsstuhl durchgeführt, die zu einem Sitzdruckprofil führten, dass minimalen Diskom-

14 Für Rennfahrzeugen werden nahezu polsterlose Sitzschalen verwendet, die exakt an das individuelle Körperprofil des Rennfahrers angepasst sind.

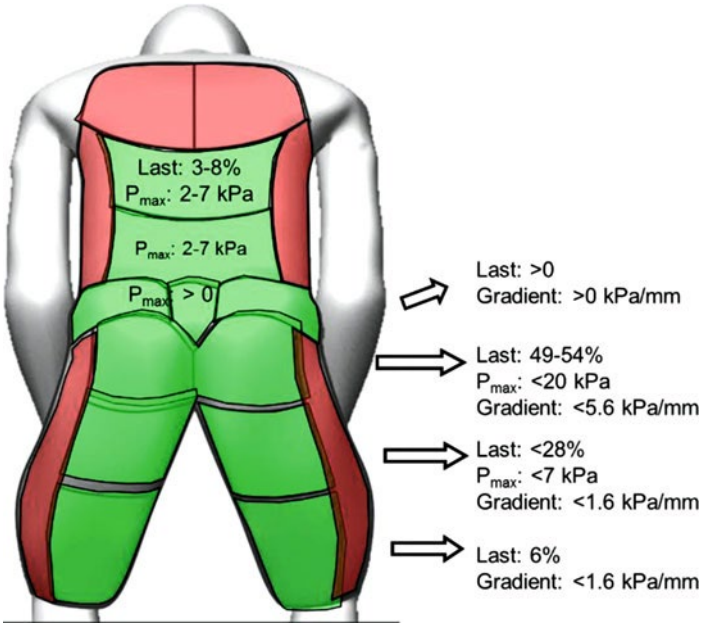


Abb. 7.25 Last, maximaler Druck und Gradient des Druckanstieges welcher nach den Untersuchungen von Hartung (2005) und Mergl (2005) zu einem minimalen Diskomfort führt

fort hervorruft. Das Ziel der Versuche war einen Zusammenhang zwischen physikalisch messbaren Größen und subjektivem Empfinden zu finden. Zu diesem Zweck wurde die Berührfläche des Körpers mit dem Sitz in Segmente eingeteilt, bezüglich derer die Probanden bei den Versuchen auf einer modifizierten sog. CP-50-Skala ihr subjektives Diskomfortempfinden äußerten (Abb. 7.24).

Nach den erwähnten Untersuchungen gibt es drei Parameter in der Druckverteilung, die einen unmittelbaren Einfluss auf den Diskomfort haben. Es sind dies:

- die prozentuale Lastverteilung (= Kraft auf die betreffenden Körperpartie/Körpergewicht)
- der maximale Druck
- der Gradient des Druckanstiegs

In den Versuchen konnten für die meisten der in Abb. 7.24 genannten Körperbereiche Zahlenwerte gefunden werden, die einen minimalen Diskomfort sicherstellen. Diese Werte gelten nur individuell. Bei einem gegebenen Sitz erfahren aber Personen verschiedener Anthropometrie unterschiedliche Sitzdrücke. Außerdem verändert sich schon bei leichter Variation der Körperhaltung die Druckverteilung erheblich. Es gibt also keinen idealen Sitz, sondern nur eine ideale Kombination zwischen einem Sitz und einem Individuum[15]. Das bedeutet: der Sitz muss an die individuellen Bedingungen der Person angepasst werden.

Die in Abb. 7.25 wiedergegebenen Werte wurden in zahlreichen Versuchen evaluiert (Mergl 2005; Zenk 2008; Lorenz 2011). Mit einem 42 jährigen Probanden (Gewicht 83 kg, ~ 50th Perzentil Mann), der sich freiwillig für einen Versuchstag flexible Drucksensoren in die Bandscheibe zwischen den Wirbelelementen L4-L5 und L5-S1 einoperieren ließ, konnte im realen Fahrversuch gezeigt werden, dass bei einer Einstellung des Sitzes, welche die Werte der Abb. 7.25 hervorrief, ein extrem niedriger Bandscheibendruck von 0,5 bar erzeugt wurde. Wenn bei dieser Person die Last unter dem vorderen Bereich des Oberschenkels von 6 auf 10,6 % erhöht wurde, stieg der Bandscheibendruck auf 0,95 bar. Bei einer extremen Entlastung unter den Oberschenkel auf 0,4 % Last erhöhte sich der Bandscheibendruck sogar auf 1,5 bar (Zenk et al. 2007). Erstaunliches Ergebnis all dieser Versuche ist, dass Rückenschmerzen eher durch eine ungünstige Druckverteilung im Bereich des Gesäßes erzeugt werden als durch die im Rückenbereich. In den

15 In Analogie dazu würde niemand erwarten, dass es einen Schuh gibt, der für alle passt!

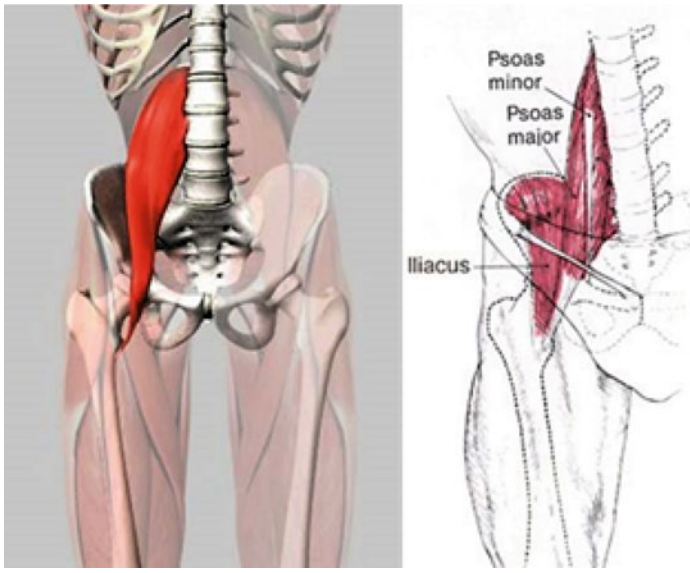


Abb. 7.26 Musculus iliopsoas (Psoas minor, Psoas major, Illiacus, nach Weineck 2001)

Versuchen von Hartung (2005) und Mergl (2005) konnten zudem nur schwache Korrelationen zwischen Druckverteilung im Rückenbereich und subjektiven Diskomfort gefunden werden. Das erklärt sich aus der Tatsache, dass bei einer Sitzhaltung, wie sie üblicherweise von Fahrern eingenommen wird, nur max. 15 % des Körpergewichts von der Rückenlehne aufgenommen wird. Beim Sitzen hat der Fahrer bezüglich des Rückens auch viel mehr Bewegungsfreiheit als im Bereich des Gesäßes. Diesen dominanten Einfluss der Druckverteilung im Gesäß auf den empfundenen Diskomfort im Rücken erklärte Mergl mit der Muskelgruppe des Musculus iliopsoas (Psoas minor, Psoas major, Illiacus), die vom Oberschenkelknochen in den Wirbelsäulenbereich zieht (Abb. 7.26). Eine ungünstige Druckverteilung versucht man offensichtlich durch leichte weit submaximale Muskelanspannung zu kompensieren, was aber bei längerer nicht durch Bewegung kompensierbarer Anspannung zu Rückenschmerzen führt. Eine Lordosenstütze im Lehnenbereich kann offensichtlich einen ähnlichen Effekt erzeugen. Indem dem Abkippen des Beckens vorgebeugt wird, kann eine kyphotische Haltung weitgehend verhindert werden. Diese ist nach Wilke (2004) zwar selbst nicht ungünstig. Wenn die entsprechende Unterstützung fehlt, kommt es aber auch zu der oben erwähnten submaximalen, auf Dauer schmerzverursachenden Muskelanstrengung.

Die Anpassung an unterschiedliche anthropometrische Bedingungen, durch welche individuell die oben erwähnten Optimalwerte erreicht werden, kann nur durch eine veränderbare Sitzflächenlänge und durch eine einstellbare Sitzflächenneigung erzielt werden. Gerade die Sitzflächenlänge stellt dabei ein Problem dar, denn sie muss den Bereich von der kurzbeinigen kleinen Frau bis zum langbeinigen großen Mann abdecken (ca. 430–520 mm). Insgesamt zeigen diese Ergebnisse aber auch, welch enormen Einfluss die äußeren Bedingungen auf den Aufwand haben, den der Fahrer für das Aufrechterhalten seiner Körperhaltung aufzubringen hat. Deshalb wäre es wünschenswert, schon in der Konzept- und Entwicklungsphase eines neuen Fahrzeugs über diese Zusammenhänge modellgeleitete Kenntnis zu haben. Seit 2013 findet ein Vorhaben mit dieser Zielrichtung am Lehrstuhl für Ergonomie der TU-München unter dem Namen UDASim (Umfassende Diskomfortbewertung für Autoinsassen durch Simulation) statt, bei dem die digitalen Menschmodelle CASIMIR, RAMSIS und ANYBODY durch den Austausch von Informationen bezüglich Haltung, Anthropometrie, Sitzposition und Kraft kombiniert werden sollen.

Sowohl die Versuche mit der freiwilligen Versuchsperson als auch die Evaluierungsversuche von Zenk (2008) und Lorenz (2011) haben gezeigt, dass die Fahrer nicht in der Lage sind, die optimale Sitz-

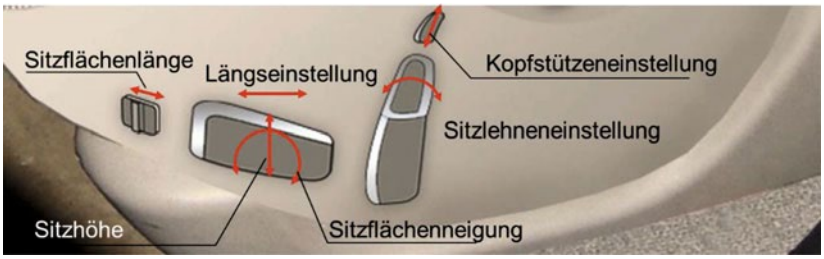


Abb. 7.27 Seitlich am Sitz angebrachte Verstelleinheit, die ohne Veränderung der Fahrerhaltung erreichbar, wegen der nur haptischen Rückmeldung aber für manche Fahrer schwer verständlich ist

einstellung aufgrund des unmittelbaren subjektiven Diskomfortempfindens vorzunehmen. Lorenz zeigte sogar, dass Probanden die von ihnen selbst bevorzugte Sitzeinstellung später ablehnten, wenn sie ihnen ohne dieses Wissen als eine aufgrund von angeblich „wissenschaftlichen" Ergebnissen empfohlene angeboten worden ist. Zenk (2008) entwickelte deshalb eine automatische Sitzeinstellung, bei der die Sitzdruckverteilung im Gesäßbereich gemessen wurde und dazu genutzt wurde, den Sitz optimal zu positionieren. Er konnte durch Langstreckenversuche (Fahrzeit >3 Stunden) zeigen, dass selbst bei Probanden, die diese automatische Einstellung zunächst ablehnten, die Diskomfortnotation mit zunehmender Versuchszeit zu einem sehr niedrigen Niveau abnahm. Lorenz (2011) entwickelte neben der automatischen Einstellung ein im Fahrerinformationsdisplay ablaufendes Tutorial, dass in strukturierter Form den Fahrer darauf hinweist, worauf er bei jedem der Einstellungsschritte zu achten hat. Die dadurch erreichten Einstellungen kamen den geforderten Optimaleinstellungen nahe. Die Einstellung muss dabei unbedingt aus der Haltung heraus geschehen, die auch beim Fahren eingenommen wird. Dies setzt Anforderungen an den Ort der Bedieneinheit (Beispiel ◘ Abb. 7.27). Wegen der vielfältigen Einstellmöglichkeiten eines Sitzes ist auf die ergonomische Gestaltung der Bedienung der Sitzeinstellung besonderer Wert zu legen. In diesem Zusammenhang wird speziell auf ▶ Abschn. 6.2.2.3 und ◘ Abb. 6.27 verwiesen.

Die Fahrer wählen den Lehnenverstellwinkel einerseits in Abhängigkeit von Fahrzeugparametern, andererseits unterliegt diese Wahl aber auch sehr stark den persönlichen Vorlieben und Gewohnheiten der Fahrzeugnutzer. Zudem ist die Aussagekraft der Lehnenneigung bezüglich der tatsächlich eingenommenen Torsohaltung wegen der großen Variation der individuellen Rückenkonturen stark eingeschränkt. Selbst bei großflächigem Kontakt des menschlichen Rückens mit der Oberfläche der Sitzlehne weicht der Torsowinkel oft erheblich von dem der Lehnenneigung ab. Je höher der Sitz im Fahrzeug angeordnet ist (Maß H30) desto steiler wird die Sitzlehne eingestellt. Ebenfalls hat die Anordnung der Kopfstütze Einfluss auf die gewählte Lehnenneigung (Kolich 2010). Ist der Insasse aufgrund seiner Körpergröße gezwungen, den Sitz sehr nah an die Instrumententafel heranzustellen, um die Pedale erreichen und bedienen zu können, verringert sich zwangsläufig der Abstand zwischen Lenkradkranz und Sitzlehnenwange ebenfalls (s. u.). Bei dieser Konstellation kann es zu einer eingeschränkten Bewegungsfreiheit des Fahrers kommen, die die Bedienung von Lenkrad und Gangwählhebel problematisch macht. Abhilfe verschafft dem Fahrer hier eine Verschiebung des Sitzes nach hinten, was aber zu Einbußen des Auflagesitzkomforts führt oder die thematisierte stärkere Neigung der Lehne. Eine gewisse Anzahl der Fahrzeugnutzer bevorzugt eine sehr flache Sitzlehnenstellung, die lediglich im Gesäßbereich Kontakt und Unterstützung bietet. Wie bereits angesprochen, muss das subjektive Gefühl für Wohlbefinden keineswegs mit objektiven, auch auf das Individuum angepassten Forderungen übereinstimmen. Die statistische Verteilung der bevorzugten Lehneneinstellung zeigt eine annähernd normalverteilte Häufung um den Mittelwert, der je nach Fahrzeugkonzept mehr oder weniger vom Design-Torsowinkel von 25° abweicht (◘ Abb. 7.28). Weitaus weniger als die Hälfte der untersuchten Personen nutzt diesen Winkel, wobei eine Bandbreite um fast 10° jeweils nach oben und nach unten variiert.

Die bisherigen Ausführungen befassen sich nicht mit dem Seitenhalt, den ein Sitz beim Autofahren gewährleisten soll. Nicht veröffentlichte

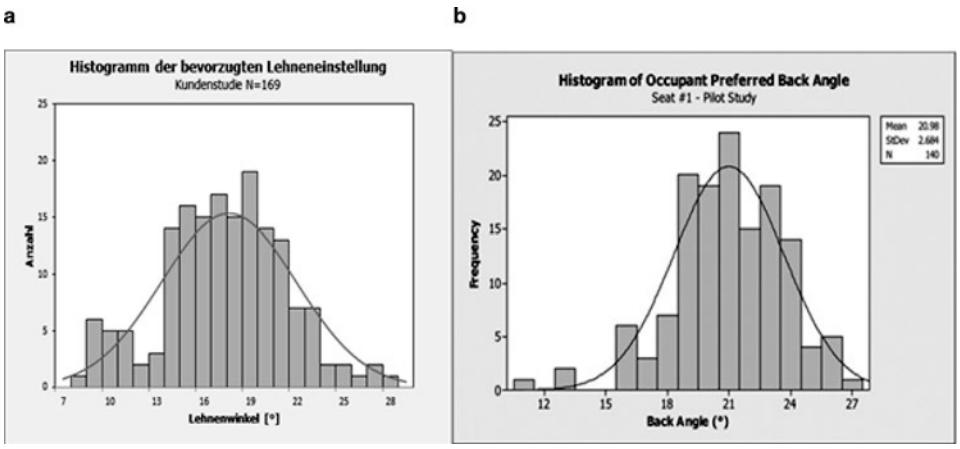


Abb. 7.28 Beobachte Lehenwinkel bei zwei unterschiedlichen Fahrzeugen: **a** Adam Opel AG, **b** Ford Motor Comp. (nach Kolich 2010)

Untersuchungen des Lehrstuhls für Ergonomie (TU-München) weisen einerseits darauf hin, dass eine weitgehende Anpassung an die individuellen anthropometrischen Bedingungen notwendig ist und dass andererseits diese Anpassung auch von den Fahrbedingungen abhängt. So wird beispielsweise bei einer engagierten Autofahrt auf kurviger Strecke ein relativ strenger Seitenhalt erwartet, während auf einer entspannten Autobahnfahrt dieses Seitenhalt reduziert sein sollte, um geringfügige Ausgleichsbewegungen zu ermöglichen. Aus ergonomischer Sicht ergibt sich somit die Frage, ob es sinnvoll wäre, eine durch das Navigationssystem gesteuerte Anpassung vorzunehmen. Zumindest sollte eine während der Fahrt vom Fahrer einfach zu bedienende Veränderung der Seitenabstützung vorgesehen werden.

7.2.2.2 Pedale

Abstand der Pedale

Ebenso wie durch die Notwendigkeit, das Verkehrsgeschehen durch die Windschutzscheibe hinreichend beobachten zu können, wird die Fahrerhaltung wesentlich durch die Gestaltung der Pedalanordnungen beeinflusst. Erfolgt die Haltungsberechnung von RAMSIS auf der Basis des Fersenpunktes, so ist zu klären, in welcher Position das Fahrpedal in Relation zu diesen Fersenpunkt steht. Kolling (1997) fand in praktischen Fahrversuchen, dass der durchschnittliche Aufstandspunkt bei Frauen x = 10 mm vor und y = 50 mm links vom rechten Rand des Fahrpedals liegt. Bei Männern sind die entsprechenden Koordinaten x = 40 mm und y = 90 mm. Gegebenenfalls ist noch der erhöhte bzw. abgeschrägte Absatz des Schuhs zu berücksichtigen.

Durch die Sitzlängseinstellung ist der Fahrer zwar in der Lage, die richtige Lage zum Fersenpunkt des Fahrpedals bzw. der Abstellfläche für den linken Fuß einzunehmen, der Abstand zwischen den Pedalen ist aber durch die Fahrzeugkonzeption fest vorgegeben. Verschiedene Autoren haben sich mit der Frage der Pedalpositionierung auseinandergesetzt. Besonders zu erwähnen ist hier die Untersuchung von Bäumler (1992), der in einem Fahrzeugsimulatorexperiment statt realer Pedale eine Kraftmessplatte verwendete und durch das Simulationsprogramm die Probanden veranlasste, zwischen dem selbst gewählten Fahrpedalort und einem spontan aus der Situation heraus gewählten Bremspedalort links davon zu wechseln. Er fand in Übereinstimmung mit den Autoren Brackett et al. (1989) und Dreßel und Kain (1985), dass der optimale Ort des Bremspedals ca. 38 mm und der des Fahrpedals ca. 161 mm rechts von der Sitzmitte sein sollte. Der freie Abstand zwischen dem Pedalen sollte dabei ca. 60–61 mm betragen (Abb. 7.29 links). Generell wird die gesamte von den Probanden bevorzugte Pedalanordnung in Abhängigkeit von der Fußraumeinschränkung durch das links gelagerte Radhaus nach rechts oder durch den rechts gelagerten Getriebetunnel nach links verschoben. Der genannte

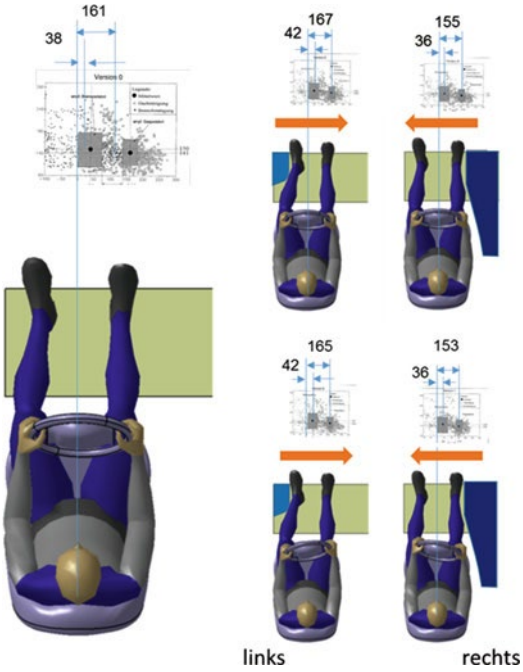


Abb. 7.29 Illustration der Ergebnisse aus der Untersuchung von Bäumler (1992)

Effekt wird noch zusätzlich verstärkt, wenn auch das Lenkrad entsprechend aus der Sitzmitte verschoben und sich zusätzlich noch gegenüber der Sitzausrichtung entsprechend verdreht ist (siehe Abb. 7.29 rechts; siehe hierzu auch die Abhandlung in ▶ Abschn. 7.2.3).

Generell wird sowohl von Brackett et al. (1989) als auch von Bäumler (1992) festgestellt, dass eine außermittig angebrachte Anordnung des Lenkrades eine Verdrehung des Oberkörpers zur Folge hat, welche durch leichte Muskelanspannungen kompensiert werden muss, die dann in ähnlicher Weise wie eine ungünstige Fahrerhaltung im Längsschnitt auf die Dauer zu Rückenschmerzen führen kann. Es ist also nach Möglichkeit eine absolut symmetrische Sitzposition anzustreben.[16]

Von dieser Idealausrichtung wird sehr häufig abgewichen, um technischen Randbedingungen hinreichend Rechnung zu tragen. Die Anordnung der Pedale wird oft in Richtung Fahrzeugmitte verschoben, um die Freigängigkeiten zum Radhaus zu gewährleisten. Insbesondere in Rechtslenkerfahrzeugen ist diese Verfahrensweise häufig anzutreffen und teilweise unumgänglich, da nicht die unbewegte Fußablage, wie im Linkslenker hier positioniert ist, sondern das Fahrpedal mit seinem Betätigungsweg und den notwendigen Freigängigkeiten des Fußes. Eine moderate (< 40 mm) Verschiebung der Pedalerie in Richtung der Fahrzeugmitte ist in der Regel unauffällig, jedoch im Langstreckenverkehr mit Komforteinschränkungen verbunden (s. o.). Eine Verschiebung der Pedaleriemitte in Richtung des Radhauses wird sehr stark vom Fahrer wahrgenommen, da er aus der sogenannten Pfeilung (hin zur Mitte der befahrenen Fahrspur) herausgedreht wird.

Auch die Lenksäule wird oftmals leicht (ca. 10 bis 40 mm) aus der Idealstellung zur Fahrzeugmitte hin verschoben, um der Ungleichförmigkeit der kardanischen Lenksäule und dem Einlaufpunkt im Lenkgetriebe Rechnung zu tragen. Auch hier sind größere Werte durch die auftretende Parallaxe auffallend und komforteinschränkend und eine nach außen versetzte Anordnung wird vom Fahrer als irritierend wahrgenommen. Eine außermittige Anordnung des Lenkrades ist visuell an der Lage des Instrumentes wahrnehmbar. Deshalb

16 Leider wird heute aufgrund der modularen Fahrzeugkonzepte häufig gegen diese Regel verstoßen. Wegen der mittelfristig hohen Flexibilität und Unempfindlichkeit des menschlichen Körpers werden Abweichungen bei Designbeurteilungen und Fahrversuchen zunächst nicht bemerkt.

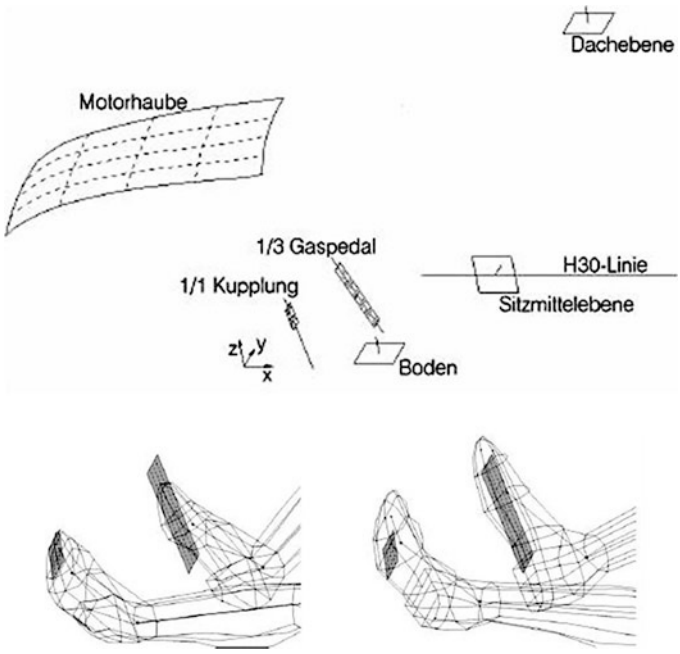


Abb. 7.30 Geometrische Randbedingungen für die Berechnung des RAMSIS-Haltungsmodells unter Einbeziehung der Betätigung des Kupplungspedals (*oben*) sowie Fußstellungen auf den Pedalen (aus Vogt 2003)

muss – bei einer versetzten Lage des Lenkrades – das Instrumentencombi diesem Versatz in gleicher Richtung und tendenziell größerem Betrag folgen. Die Abstimmung ist recht aufwändig, da sie von verschiedenen Augenpunkten und deren Abständen (ca. 600 mm–1000 mm) zur Anzeigeebene gleichermaßen abgesichert werden muss (siehe ► Abschn. 7.3.3).

Sowohl die Untersuchungen von Brackett et al. (1989) als auch von Bäumler (1992) wurden mit einer ebenen Fläche durchgeführt, die das Pedalniveau repräsentierte. Damit ist keine Aussage über eine womöglich notwendige Differenzierung in der Pedalhöhe bezüglich Brems- und Fahrpedals gemacht. Dieser sog. Pedalsprung ist Gegenstand verschiedener Diskussionen. Aus Gründen eines schnellen Umsetzens zwischen Fahr- und Bremspedal wäre es empfehlenswert, keinen Niveauunterschied zwischen diesen Pedalen vorzusehen. Ein spürbarer Pedalsprung hätte aber den Vorteil, dass dem Fahrer besser bewusst wird, ob er das Fahr- oder Bremspedal betätigt. Dieser Aspekt spielt vor allem in Verbindung mit dem Phänomen der sog. „Unexpected Acceleration" (eigentlich „unintendent acceleration") eine wichtige Rolle, bei dem der Fahrer, vermeintlich auf dem Bremspedal stehend, das Fahrpedal voll durchdrückt. Es wird deshalb ein Pedalsprung zwischen 20 und 30 mm empfohlen. Unabhängig von dieser geometrischen Bedingung hat Kolling (1998) zwei unterschiedliche Umsetzungsstrategien vom Fahrpedal auf das Bremspedal beobachtet. Bei leichten Bremsmanövern wird der Fuß um den Hackenaufstandspunkt nur gedreht, ohne vom Boden abzuheben (dies gilt vor allem für große Personen). Bei einem stärkeren Bremsen wird in jedem Fall die Hacke vor das Bremspedal umgesetzt. Bei der Zurückbewegung zum Fahrpedal verweilen große Personen ca. 3–10 Sekunden mit der Hacke in Bremsposition, obwohl sie schon wieder Gas geben. Für genauere Layout-Analysen sind diese Aspekte noch zusätzlich zu beachten.

Erreichbarkeit des Kupplungspedals

Durch das Kupplungspedal ergeben sich für die Haltungsberechnung und damit für das Layout der Sitzlängsverstellung weitere Restriktionen. Zunächst ist es dafür notwendig, von der technischen Seite her Angaben über die Position des Kupplungspedals im durchgetretenen Zustand zu erlangen (■ Abb. 7.30 oben). In der Anwendungspraxis hat es sich herausgestellt, dass man realistische Haltungen nur erhält, wenn man für Männer und Frauen unterschiedli-

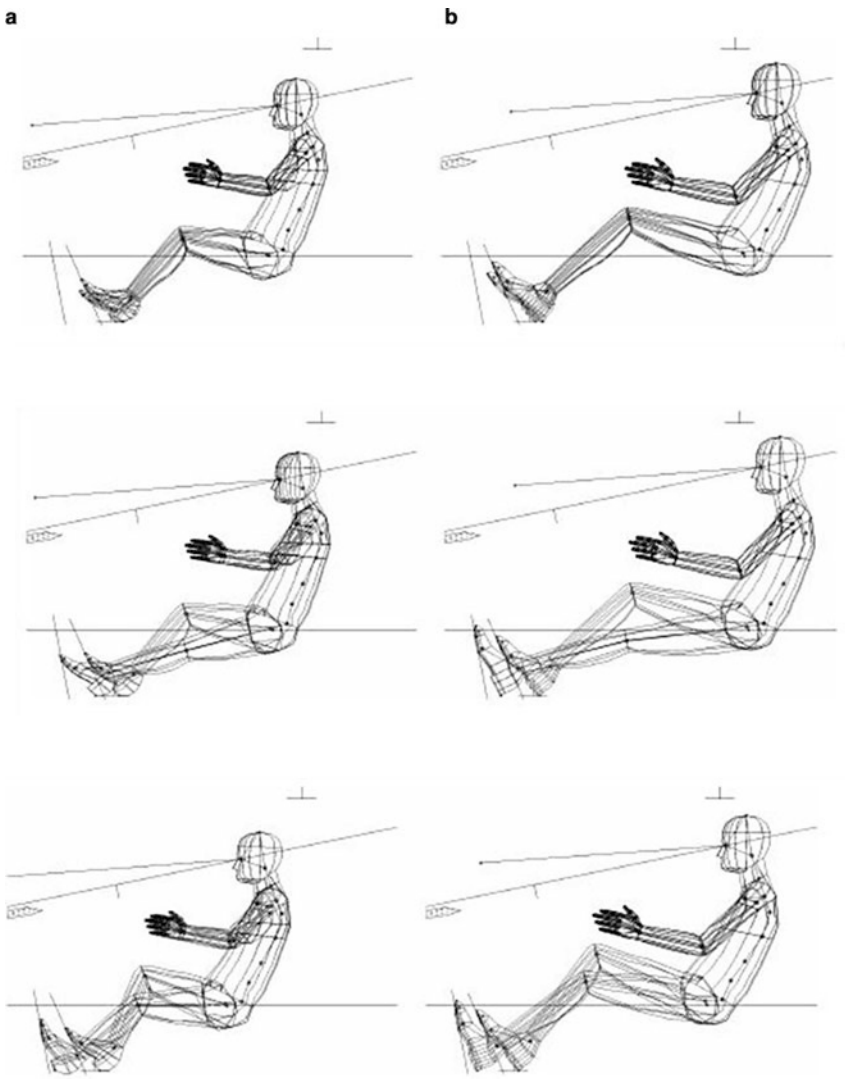


Abb. 7.31 Berechnungen der wahrscheinlichen Körperhaltung für die kurzbeinige kleine Frau (FSMS, **a**) und den langbeinigen großen Mann (MTML, **b**)

che Berührungspunkte an den Fußsohlen annimmt (Vogt 2003; Abb. 7.30 unten).

Im Folgenden werden zunächst nur die Extremtypen „kleine kurzbeinige Frau" und „großer langbeiniger Mann" berücksichtigt. In Abb. 7.31 ist die Haltung für den Fall berechnet, dass die Füße jeweils auf dem Fahrpedal (1/3 durchgedrückt) bzw. auf der linken Fußablage stehen (das ist die Grundlage für die Haltungsberechnungen, die zu dem Ergebnis der Abb. 7.16 führten). In der zweiten Reihe ist dargestellt, wie weit der linke Fuß durchgedrückt werden muss, damit unter dieser Bedingung das Kupplungspedal getreten werden kann. Es ergeben sich dabei unrealistisch große Winkel. In der unteren Reihe ist wiedergegeben, welche Haltung sich ergibt, wenn RAMSIS die wahrscheinlichste Haltung dafür einnimmt, dass einerseits das Gaspedal betätigt wird und andererseits die Kupplung voll durchgedrückt wird. In diesem Fall ergibt sich für den rechten Fuß eine unbequeme Haltung mit stark angewinkelten Knien. Auch dieser Fall ist unrealistisch, denn das Haltungsmodell unterstellt, dass die jeweilige Haltung über längere Zeit eingenommen wird. Die Kupplung wird aber nur kurze Zeit getätigt.

Um zu realistischen Annahmen zu kommen, wurden von Mergl et al. (2006) Untersuchungen in

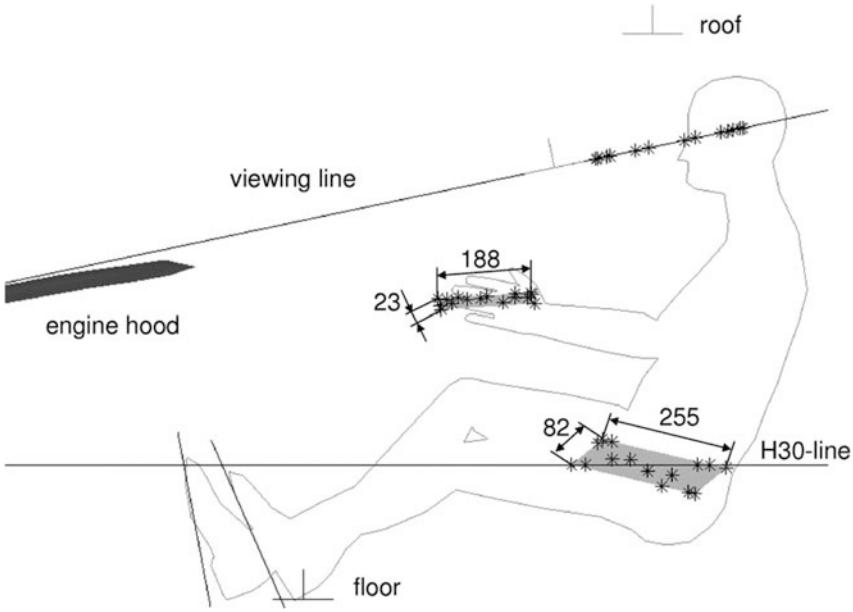


Abb. 7.32 Augenpunkt-optimierte Haltung der Abb. 7.16 unter zusätzlicher Berücksichtigung der Kupplungsbetätigung

einem Mock-Up über die bevorzugte Haltung bei der Kupplungspedalbetätigung durchgeführt und mittels eines Goniometers der jeweilige Kniewinkel gemessen. Es wurden Kniewinkel im Bereich zwischen 125° und 155° gemessen. Die Untersuchungen legen nahe, dass der bevorzugte Kniewinkel für die Kupplungsbetätigung starker individueller Variation unterworfen ist. Deshalb wird für die ergonomische Auslegung eines Fahrzeugs mit Kupplung vorgeschlagen, jedes der in Betracht gezogenen Auslegungs-Manikins jeweils in der Stellung der unteren Reihe von Abb. 7.31 und zusätzlich der Restriktion „kein Kniewinkel > 155°“ zu berechnen. Durch diese Maßnahme kann man davon ausgehen, dass man einen Einstellungsvariationsbereich erarbeitet, der jede mögliche individuelle Bevorzugung berücksichtigt. Abbildung 7.32 zeigt das Ergebnis. Der Abbildung können die notwendigen Verstellbereiche von Sitz und Lenkrad entnommen werden. Der Vergleich mit den Ergebnissen der Abb. 7.16 weist auch von der anthropometrische Seite her auf das Problem des handgeschalteten Wagens hin. Um die Betätigung des Kupplungspedals sicherzustellen, müssen dafür Kompromisse eingegangen werden, die auf Kosten einer entspannten Fahrerhaltung für die größte Zeit des Fahrprozesses gehen. Die Berücksichtigung der uneingeschränkten Kupplungsbetätigung hat außerdem einen Sicherheitseffekt für die Betätigung des Bremspedals. Bei Ausfall eines der beiden Bremskreise des Fahrzeugs weist das Bremspedal einen Leerweg auf, so dass für eine Vollbremsung der Bremspedalweg vergleichbar dem des Kupplungspedals ist. Somit ist die uneingeschränkte Betätigungsmöglichkeit in einem solchen Notfall durch die Sitzhaltung zum Kupplungspedal implizit sichergestellt. Die in Automatikfahrzeugen häufig festzustellende nach hinten verschobene Sitzposition des Fahrers schränkt die ausreichende Bremsbetätigung bei Ausfall eines Bremskreises ein.

7.2.2.3 Lenkrad

Lenkradlage

Das Lenkrad stellt für den Fahrer das wichtigste Interaktionsmedium dar und bestimmt damit in signifikanter Weise den Charakter des Fahrzeugs (siehe hierzu auch ▶ Abschn. 6.4.1). Kolling (1998) hat in Verbindung mit der Modellierung der Fahrerhaltung durch das Menschmodell RAMSIS Beobachtungen zur *Position der Hände am Lenkrad* im realen Fahrbetrieb durchgeführt. Er teilt dazu das Lenkrad in zwölf Positionen ein. Abbildung 7.33 zeigt die Zusammenfassung der Ergebnisse. Danach sind die am häufigsten verwendeten Grifforte für die rechte und linke Hand die Positionen 3 (32,6 %) und 10 (28,3 %). Ursache dafür ist unter anderem, dass

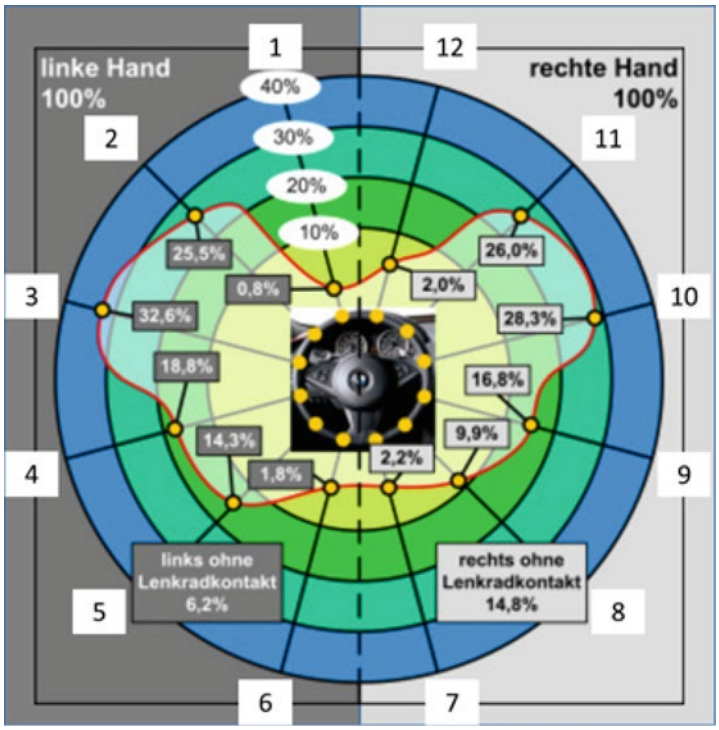


Abb. 7.33 Verteilung der Hände auf dem Lenkrad (nach Kolling 1998, modifiziert durch Wolf 2009)

die Hände mit dem Daumen im Speichenkranz eingehakt werden, um das Eigengewicht abzustützen. Weiterhin wurde beobachtet, dass kleine Frauen das Lenkrad häufig weiter oben anfassen, was wohl auf den relativ geringen Abstand von Sitz zu Lenkrad zurückzuführen ist. Wenn man eine Positionierung in einem gegebenen Fahrzeug vornehmen will, so sind diese zusätzlichen RAMSIS-typabhängigen Restriktionen zu beachten. Da während der Fahrt auch das Multifunktionslenkrad bedient wird, ist die Handstellung in Position 4 und 9 nötig. Insgesamt wurde beobachtet, dass bis zu 21 % der Gesamtfahrzeit einhändig gefahren wurde (15 % der Frauen und 26 % der Männer). Dabei befindet sich die linke Hand ca. 6,2 % der Zeit nicht am Lenkrad, die rechte Hand sogar 15 %. Kolling beobachtete eine „Regler-" und eine „Krafthand": Die „Reglerhand" ist meist an einem Umgebungspunkt abgestützt (Knie, Armablage, Brüstung) und berührt lediglich nur lose den Lenkradkranz. Eigentliche Lenkbewegungen werden über die „Krafthand" in das Lenkrad eingeleitet (bei den meisten Probanden über die rechte Hand). Viele Probanden greifen das Lenkrad prinzipiell asymmetrisch, andere wechseln häufig oder fahren konstant die ganze Strecke in einer Haltung. Kolling empfiehlt für die Haltungsberechnung am Lenkradaußenkranz in der Höhe der oberen Speiche einen Punkt zu konstruieren, der mit dem RAMSIS-Handpunkt (siehe auch Abb. 7.14) in Kontakt gebracht wird.

Der ***Lenkraddurchmesser*** besitzt bedingt durch die Kinematik des Hand-Arm-Systems erheblichen Einfluss auf die durch den Menschen übertragbaren Lenkkräfte, Lenkwinkel und das mögliche zeitliche Verhalten, wobei diese Effekte von den anthropometrische Bedingungen und der Position des Fahrers hinter dem Lenkrad abhängen. Aus den Handstellungen, die RAMSIS ohne Eingabe von Restriktionen einnimmt, kann der optimale Lenkradurchmesser erschlossen werden, indem man annimmt, dass die Hände in der Position 3 und 10 gehalten werden und den unter diesen Bedingungen einschreibenden Kreis berechnet. Der Durchmesser dieses Kreises variiert in Abhängigkeit vom verwendeten RAMSIS-Typ von 300 bis 427 mm. Als Kompromiss lässt sich daraus ein Durchmesser von 363 mm ableiten. Wolf (2009) fand in einer Übersicht gängiger Personenkraftwagen in Europa

für die Jahre 2002, 2003 und 2004 einen Mittelwert von 376,3 mm, wobei der kleinste Durchmesser 320 (Opel Speedster) und der größte 410 (Rolls-Royce Phantom) war.

Die ***Dicke des Lenkradkranzes*** hat nicht unmittelbar Einfluss auf die Handhabbarkeit. Wolf (2009) empfiehlt auch unter dem Aspekt des „Gefallens" einen Querschnitt von 20 mm.

Die ***Neigung des Lenkrades gegenüber der Horizontalebene*** sollte bedingt durch den anatomisch relativ fest vorgegebenen Optimalwinkel des Handgelenks um die z-Achse (ulnare und radiale Abduktion), auch bei Nutzung des Verstellbereichs (s. u.) nicht verändert werden. Für Fahrerpositionen in einer Limousine sollte sie 85,5° betragen.

Verstellbereich

Aus der Abb. 7.32 geht hervor, dass bei der dort vorgenommenen Fahrerplatzkonzeption für das Lenkrad ein Verstellbereich von 188 mm in Längs- und von 23 mm in Vertikalrichtung vorzusehen ist. Dieser Verstellbereich ergibt sich in etwa auch bei Fahrerplatzkonzeptionen, die nach anderen Kriterien durchgeführt werden. Wenn man nicht, wie hier, für große und kleine Personen für gleiche Sichtverhältnisse sorgt, sondern davon ausgeht, dass der Augenpunkt in etwa gleicher Höhe bleibt, so ergibt sich in vertikaler Richtung sogar noch ein größerer notwendige Verstellbereich von ca. 130 mm. Die hier empfohlenen Verstellbereiche des Lenkrades bewirken einen Ellenbogenwinkel von etwa 124° (Lorenz 2011). Wie Untersuchungen von Schmidt et al. (2014) zeigen, ist ein Winkelbereich zwischen 95° und 120° für eine schnelle und präzise Lenkradbewegung aus biomechanischer Sicht zu empfehlen. Aus ergonomischen Gründen wäre deshalb eine Kopplung zwischen Sitzverstellung und Lenkrad wünschenswert, da sie dem Fahrer von vorneherein eine günstige und auch gesunde Position vorgibt. Die Abweichungen von dieser Funktion, die durch vom Mittelmaß abweichende Proportionen und Korpulenzen gegeben sind, könnten dann durch eine in kleinem Umfang individuell einstellbare Lenkradverstellung im Bereich von ± 30 mm in x-Richtung und z-Richtung berücksichtigt werden.

Die Anpassung des Lenkrades in gegenwärtigen Autos ist im Vergleich zu dem hier wiedergegebenen Layout-Vorschlag mit RAMSIS zu klein. Insbesondere ist der Verstellbereich in der horizontalen Richtung nicht ausreichend, um eine optimale Haltung für Menschen aller Anthropometrien sicherzustellen. Gründe dafür sind u. a. die Regulierungen für das Crashverhalten. Für kleine Personen muss genug Raum zwischen Lenkrad (Airbag) und Körper vorhanden sein. Mit einem großen Verstellbereich von 188 mm kann das nicht erreicht werden. Andere Beschränkungen entstehen aus Kostengründen und sonstigen technischen Beschränkungen. Da der Toleranzbereich für guten Komfort bei Ellenbogen- (80°–158°) und Schultergelenk (9°–69°) sehr groß ist, wird von vielen Personen eine suboptimale Haltung nicht wahrgenommen (siehe hierzu auch die Bemerkungen in ▶ Abschn. 7.2.2.1). Auf alle Fälle ist festzuhalten, dass die heute – aus Kostengründen – häufig vorzufindende Lösung, das Lenkrad in einem Kreuzgelenk nur um eine feste Achse parallel zur y-Achse zu schwenken, ergonomischen Forderungen in keiner Weise entspricht.

7.2.2.4 Gurt

Durch die Gurtanlegepflicht, die heute praktisch in allen Ländern Gültigkeit hat, in denen Fahrzeuge zugelassen werden, stellt die Handhabung des Gurtes hinsichtlich des Anlegevorgangs und der durch das Tragen des angelegten Gurtes hervorgerufene Diskomforts einen wichtigen Aspekt der Interieurgestaltung dar.

Erreichbarkeit

Insbesondere von Monnier (2004) wurden umfangreiche Grundlagenuntersuchungen zum Anschnallvorgang durchgeführt. Als wesentliche Einflussfaktoren für den Anschnallvorgang fand er neben der Distanz der oberen Gurtanbringung zum H-Punkt des Fahrzeugführers in x- und z-Richtung die Fixierungsart der unteren Anbringung als relevant. Für den Anschnallvorgang selbst wurden bei seinen Untersuchungen verschiedene Bewegungsstrategien zum Ergreifen der Gurtzunge beobachtet. Von besonderer Bedeutung ist wegen ihrer Häufigkeit dabei die so genannte „Rechte-Hand-Strategie". Der Fahrzeugführer greift dabei mit der rechten Hand an die links befindliche Gurtzunge, zieht sie dann vor seinem Körper auf die rechte Seite und steckt sie schließlich in das Gurtschloss. Insbesondere, wenn die Gurtzunge gut erreichbar ist, wird diese Bewegungsstrategie

Abb. 7.34 Verschiedene Gurtanlegestrategien (Remlinger 2000)

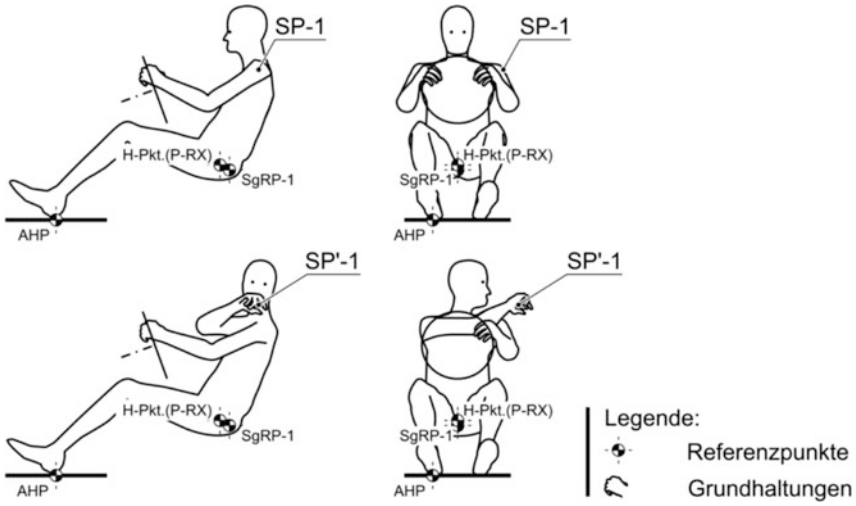


Abb. 7.35 Modellierung der Stützgeometrie für das Anschnallen (aus Müller 2012)

von 78 % der Fahrzeugführer bevorzugt. Bei ungünstiger Anbringung der Gurtzunge und insbesondere starker Korpulenz des Nutzers findet auch eine wesentlich komplexere Bewegungsstrategie statt: in dem Fall versucht der Fahrer mit der linken Hand nach links oben die Gurtzunge zu erfassen, zieht sie dann soweit nach vorne, dass er sie mit der rechten Hand ergreifen kann und bringt sie schließlich in das Gurtschloss ein (siehe auch Abb. 7.34). Bei beiden Strategien wird in vielen Fällen beobachtet, dass der Fahrer versucht, den Vorgang visuell zu überprüfen. Die Ausgangshaltung dieses Vorgangs kann mit dem RAMSIS-Menschmodell nachgebildet werden, indem ausgehend von der Fahrerhaltung eine Kontaktrestriktion für die rechte Hand zu der Gurtplatte gesetzt wird. Es ist dann mit den verschiedenen Auslegungsmanikins zu überprüfen, ob der Vorgang überhaupt durchführbar ist (Abb. 7.35).

Gurtverlauf

RAMSIS bietet ein ausgefeiltes Gurtverlaufsmodell, mit dessen Hilfe sowohl die Position der Gurtzunge in der Ausgangsstellung als auch die des Gurtschlosses modelliert werden kann. Mittels der unterschiedlichen Anthropometrien ist dann zu überprüfen, inwieweit eine Anpassung dieser beiden Punkte unter Berücksichtigung des daraus resultierenden Gurtverlaufs notwendig ist (Abb. 7.36). In den meisten Fällen ist deshalb eine Anpassung durch den oberen Gurtverankerungspunkt notwendig. Auch hier ergibt sich aus ergonomischer Sicht die Empfehlung, diesen

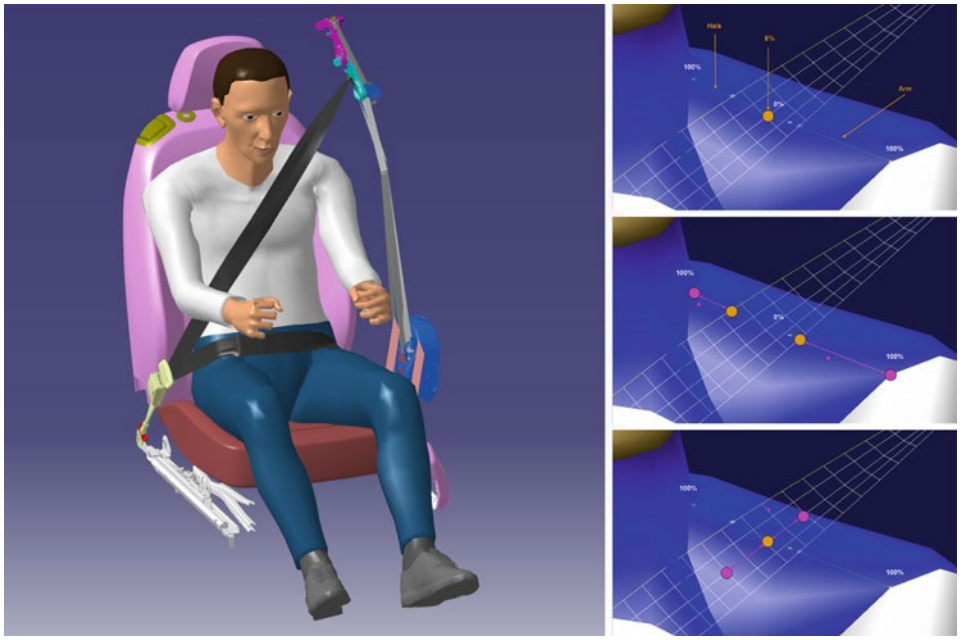


Abb. 7.36 Berechnungen des Gurtverlauf einschließlich Bewertung der Grundlage auf der Schulter (**a**), der Gurtkante (**b**) und des Gurt Ablösepunktes (**c**) Aus RAMSIS 3.8 in CATIA V5 Handbuch

Punkt in Abhängigkeit von der Sitz- und Lehnenstellung automatisch zu verändern, wobei zusätzlich eine individuelle Anpassung unumgänglich erscheint.

7.2.2.5 Armstützen

Wie bereits dargelegt, führen langandauernde, auch deutlich submaximale Muskelanstrengungen nicht nur zu Diskomfort, sondern in Verbindung mit nur geringfügig möglicher Bewegung auch zu Muskelschmerzen. Durch entsprechende Körperunterstützungen kann dem vorgebeugt werden. Insbesondere kommen hierfür Armauflagen in der Fahrzeugmitte und im Türbereich infrage. Selbst wenn keine solchen Armauflagen verfügbar sind, sucht der Fahrer Unterstützung, indem er für den linken Arm beispielsweise die Fensterbrüstung benutzt oder beim rechten Arm die Hand auf dem Getriebeschalthebel ablegt. Eine korrekte Positionierung von Armauflagen, die von Menschen unterschiedlicher Anthropometrie genutzt werden können, ist also für ein ermüdungsfreies Fahren sinnvoll.

Bothe (2012) schildert ein interessantes Verfahren, wie man unter Ausnutzung der RAMSIS-implementierten Komfortbewertung zu einem Kompromiss kommen bzw. dessen Grenzen erkennen kann. Das Verfahren wird im Folgenden am Beispiel der Armstütze im linken Türtafel kurz beschrieben. Zunächst ist zu unterscheiden, ob die Armauflage mit oder ohne Lenkradkontakt genutzt werden soll. Abbildung 7.37 zeigt am Beispiel des großen Mannes (MTMM) und der kleinen Frau (FSMM) jeweils zusätzlich zu der neutralen statischen Fahrerhaltung drei Armstützenhöhen (hier jeweils 100, 300 und 500 mm) über dem fahrzeugfesten Sitzreferenzpunkt $SgRP_1$ sowie links neben jedem Bild die von der RAMSIS-Software errechnete Diskomfortbewertung. Die Diskomfortwerte hängen auch von dem seitlichen Abstand der Armstütze ab. Im hier vorliegenden Beispiel ist ein Abstand von $\Delta y = 350$ mm von der Sitzmitte gewählt.

Abbildung 7.38 zeigt die Differenz des Diskomforts zu der neutralen Sitzhaltung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Armauflagehöhen für die drei Menschmodelle großer Mann (MTMM), mittlerer Mann (MMMM)und kleine Frau (FSMM). Wenn man eine Abweichung von nur einem Digit des Diskomforts akzeptiert (siehe auch Krist 1993), zeigt sich, dass für den großen Mann kaum Probleme bezüglich einer Armauflagenhöhe existieren, während für den mittleren Mann im gewählten Beispiel eine Min-

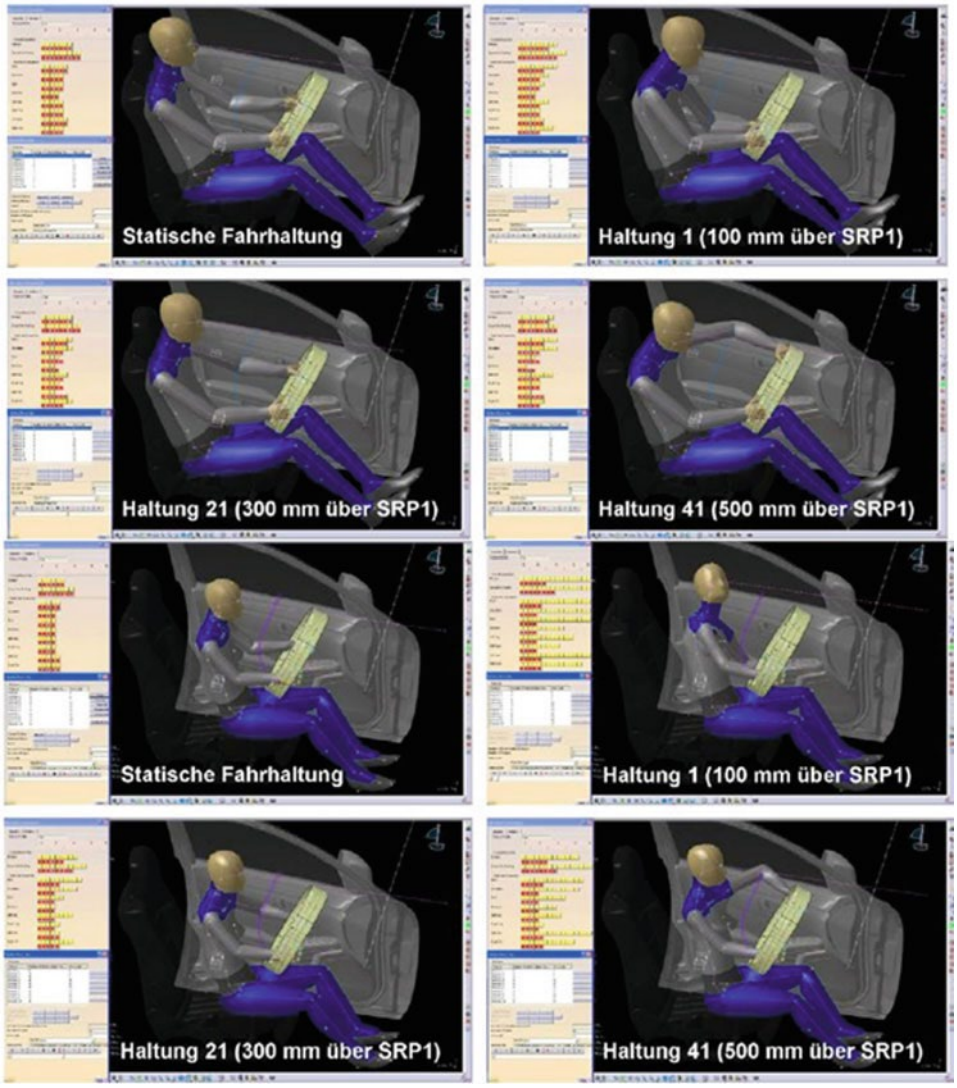


Abb. 7.37 Simulation der Nutzung der Armauflage in der Türverkleidung mit Lenkrad Kontakt. Beispiel Doppelreihe **a**: Großer Mann (MTMM), Doppelreihe **b**: kleine Frau (FSMM). Auf der linken Seite jedes Beispielbildes ist die zugehörige RAMSIS-Komfortbewertung dargestellt

destarmauflage in Höhe von 330 bis 400 mm über dem SgRP notwendig wäre. Für die kleine Frau ergeben sich eigentlich nie günstige Werte. Führt man das geschilderte Verfahren für den Fall „kein Lenkradkontakt" durch, so erhält man das Ergebnis der Abb. 7.39. Hier zeigt sich ein gemeinsamer akzeptabler Bereich von 220 bis 260 mm über dem SgRP für Personentypen zwischen dem großen und dem mittelgroßen Mann. Der Optimalbereich für die kleine Frau liegt mit 300 bis 460 mm erwartungsgemäß bei deutlich höheren Werten. Aus diesen Ergebnissen geht hervor, dass die Armauflagenhöhe individuell einstellbar sein müsste. Zu den gleichen Ergebnissen kommt man, wenn man das beschriebene Verfahren für den rechten Arm durchführt. Die Ergebnisse hängen erheblich von der Distanz Δy der Armauflage von der Sitzmitte und natürlich auch von dem jeweils gewählten H30 Maß ab. Daraus ist zu schließen, dass das hier beschriebene Verfahren für ein jeweils festliegendes Fahrzeugkonzept neu durchgeführt werden muss.

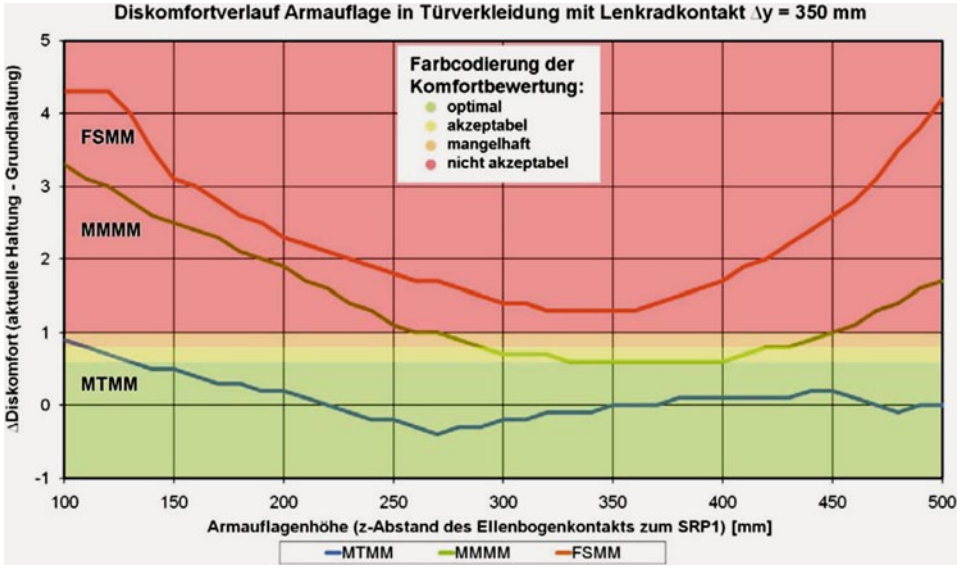


Abb. 7.38 Diskomfortverlauf für die Armauflage in der Türverkleidung bei Lenkradkontakt und einem Abstand Δy = 350 mm der Armlehne von der Sitzmitte

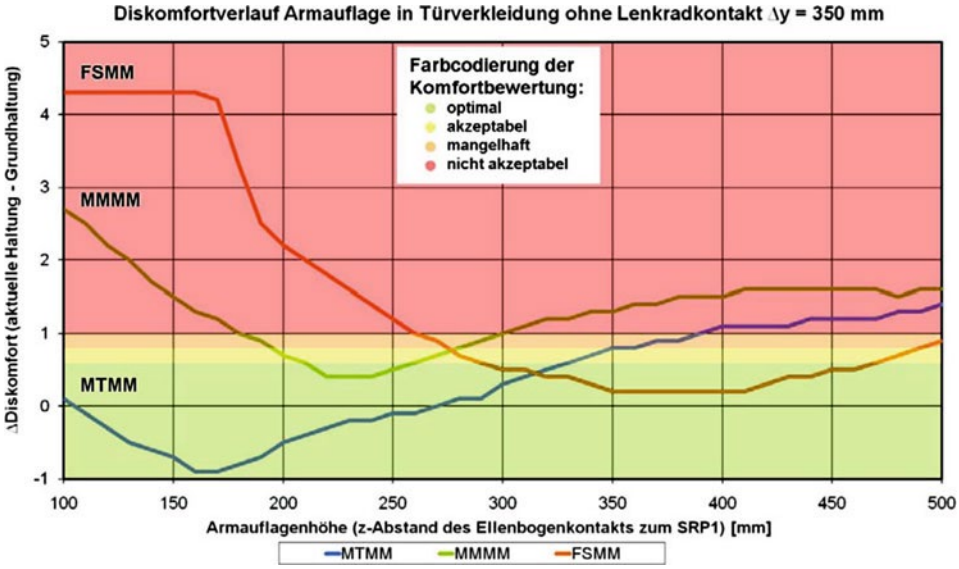


Abb. 7.39 Diskomfortverlauf für die Armauflage in der Türverkleidung ohne Lenkradkontakt und einem Abstand Δy = 350 mm der Armlehne von der Sitzmitte

7.2.3 Rechtslenkerproblematik

In allen Ländern mit automobilem Individualverkehr ist die regulär zu nutzende Straßenseite per Gesetz geregelt. So ist in 152 Ländern die rechte Straßenseite vorgeschrieben, während in 63 Ländern auf der linken Seite gefahren wird (Abb. 7.40). Gemeinsam ist diesen Ländern, dass sich die Fahrerseite auf der Innenseite der Straße, also der dem Gegenverkehr zugewandten Seite befindet. Demnach befindet sich das Lenkrad bei Fahrzeugen, die für die bevorzugte Nutzung der rechten Straßenseite konzipiert wurden,

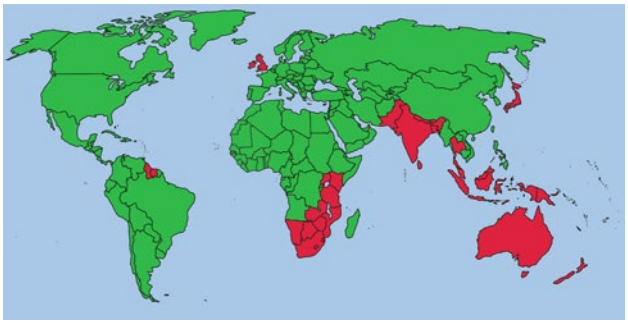


Abb. 7.40 Linkslenker- und Rechtslenkermärkte

auf der linken Fahrzeugseite und werden dementsprechend als Linkslenkerfahrzeuge (*LHD = Left Hand Drive*) bezeichnet. Analog hierzu befindet sich das Lenkrad und der Fahrerplatz bei Rechtslenkerfahrzeugen (RHD = Right Hand Drive) auf der rechten Fahrzeugseite, wenn das Fahrzeug für den Linksverkehr vorgesehen ist. Dies hat zur Folge, dass Fahrzeuge für Rechts- bzw. Linkslenkermärkte ein anderes Package der Fahrerplatz-Bedienelemente aufweisen müssen. Die meisten Fahrzeughersteller beliefern mit ihren Produkten beide Märkte und sind mit der unumgänglichen Tatsache konfrontiert einen wirtschaftlichen Kompromiss zu finden, um möglichst viele Fahrzeugkomponenten gleich zu halten und dennoch die Kompatibilität der Rechts- und Linkslenkerfahrzeuge darzustellen. So versucht man möglichst viele Teile des Rohbaus, des Fahrwerks und des Antriebsstranges wie Motoren und Getriebe unverändert für alle LHD und RHD-Versionen identisch zu halten.

Neben der Regelung des Rechts- oder Linksverkehrs verwenden einige Länder des angloamerikanischen Kulturraumes abweichend vom Internationalen Einheitensystem (SI) noch die Englische Meile (*mile*) statt der metrischen Kilometerangabe (*km, km/h, Liter/100 km*) sowie daraus abgeleitete Einheiten (*mph*: miles per hour für die Geschwindigkeit, *mpg*: mile per gallon für den Streckenverbrauch). Einige Länder mit Rechtsverkehr, vor allem in Afrika verwenden km-Angaben auch in Rechtslenkerfahrzeugen (siehe Tab. 7.5).

Die Anordnung der Komponenten ist jedoch nicht an der Fahrzeuglängsachse gespiegelt, sondern hauptsächlich von der einen Fahrzeugseite zur anderen parallel verschoben. So wird in beiden Märkten das Fahrpedal immer mit dem rechten Fuß bedient, was zur Folge hat, das in Linkslenkermärkten eine Führung des Fahrpedals am Mitteltunnel im Bereich der Heizungsanlage notwendig ist, während im Rechtslenker die Bewegung des Fahrpedals vor allem vom Radhaus beeinflusst wird (Abb. 7.41). Da die **Pedalerie** die Schnittstelle vieler Fahrzeugfunktionen (Beschleunigen, Bremsen, Kuppeln zum Gangwechsel) darstellt, verbindet sie Komponenten (Pedale) im Fahrerfußraum mit Komponenten (Hauptbremszylinder und Bremskraftverstärker) im Motorraum. Da diese Bauteile voluminös sind und das Platzangebot im Motorraum sehr begrenzt ist, können diese Aggregate nicht leicht auf die andere Seite verlegt werden. Im Falle des Bremskraftverstärkers sind mehrere Lösungen möglich, um einer Kollision mit dem Antriebsstrang (Motor, Getriebe und Nebenaggregate) zu vermeiden. Da die gespiegelte Anordnung des Motors aus wirtschaftlichen Gründen entfällt, wird in der Regel eine Anpassungskonstruktion für die Pedalanlage und der angeschlossenen Aggregate bevorzugt, zumal keine symmetrische Anordnung durch die Verschiebung möglich ist und auch die Aspekte der Fertigungsmontage sowie des Ausbaus zu Wartungszwecken beim Package berücksichtigt werden müssen. Bei ausreichendem Packageplatz im Motorraum wird die Pedalanlage so weit nach rechts[17] verschoben, wie es Radhaus und Radhüllkurve im Innenraum und Rohbaulängsträger und Dämpferdom im Motorraum zulassen. Bei dieser Anordnung entstehen im Idealfall keine Kollisionen mit Aggregaten des Antriebsstranges. Anschließend müssen alle elektrischen Leitungen, sowie ggf. Kühlwasserschläuche und Leitungen der Klimatisierungsanlage

17 Dieser Betrachtungsweise liegt die Annahme zugrunde, dass ein Fahrzeug für den Linkslenkermarkt auf eine Anordnung für einen Rechtslenkermarkt umkonstruiert werden soll. Beim umgekehrten Betrachtungsfall können unter Umständen andere Begrenzungen und Einschränkungen auftreten und auch andere Baugruppen und -teile betroffen sein.

Tab. 7.5 Liste der wichtigsten Märkte bezüglich der Verkehrsregelung und verwendeten Streckeneinheit

LHD Linkslenkermärkte Rechtsverkehr	Einheit	RHD Rechtslenkermärkte Linksverkehr	Einheit
Afghanistan, Ägypten, Albanien, Algerien, Andorra, Angola, Äquartional Guinea, Argentinien, Armenien, Aruba, Aserbaidschan, Äthiopien, Azoren, Bahrain, Belgien, Belize, Benin, Bolivien, Bosnien, Brasilien, Bulgarien, Burkina Faso, Burma, Burundi, Chile, Rep. China, VR China, Costa Rica, Curacao, Dänemark, Deutschland, Dominikanische Republik, Dschibuti, Elfenbeinküste, Ecuador, El Salvador, Eritrea, Estland, Finnland, Frankreich, Frz. Guayana, Gabun, Gambia, Georgien, Ghana, Griechenland, Guadeloupe, Guatemala, Guinea, GuineaBissau, Haiti, Honduras, Irak, Iran, Irland, Island, Israel, Italien, Jemen, Jordanien, Kambodscha, Kamerun, Kapverdische Inseln, Kasachstan, Katar, Kirgisien, Kolumbien, Komoren, Dem. Rep. Kongo, Rep. Kongo, Kroatien, Kuba, Kuweit, Laos, Lettland, Libanon, Liberia, Libyen, Liechtenstein, Litauen, Luxemburg, Marokko, Mazedonien, Madagaskar, Mali, Martinique, Mauretanien, Mexiko, Moldawien, Monaco, Mongolei, Montenegro, Myanmar, Nauru, Namibia, Nicaragua, Niederlande, Niederländische Antillen, Niger, Nigeria, Nordkorea, Norwegen, Oman, Österreich, Panama, Paraguay, Peru, Philippinen, Polen, Portugal, Puerto Rico, Réunion, Ruanda, Rumänien, Russland, Sao Tome & Príncipe, San Marino, Saudi Arabien, Schweden, Schweiz, Senegal, Serbien, Sierra Leone, Somalia, Slowakei, Slowenien, Spanien, Südkorea, Syrien, Taiwan, Tadschikistan, Togo, Tschechien, Tschad, Tunesien, Türkei, Turkmenistan, Tuvalu, Ukraine, Ungarn, Uruguay, Usbekistan, Vanuatu, Venezuela, Vereinigte Arabische Emirate, Vietnam, Wallis & Futuna, Weißrussland, Zentralafrikanische Republik [150]	km, km/h	Botswana, Guayana, Japan, Kenia, Lesotho, Malawi, Namibia, Sambia, Surinam, Swasiland, Tansania, Uganda, Zimbabwe, Zypern [14]	km, km/h
Kanada, USA [2]	km/h	Anguilla, Antigua & Barbuda, Ascension, Australien, Bahamas, Bangladesch, Barbados, Bermuda, Bhutan, Brunei, Cayman Inseln, Cook Inseln, Dominica, Falkland Inseln, Fidschi, Grenada, Hong Kong, Indien, Indonesien, Jamaika, Jungfraueninseln, Großbritannien, Kiribati, Malediven, Malta, Malaysia, Mauritius, Montserrat, Mozambique, Nepal, Neuseeland, Osttimor, Pakistan, Papua Neuguinea, Salomon Inseln, Samoa, Seychellen, Singapur, Südafrika, Sri Lanka, St. Helena, St. Kitts & Nevis, St. Lucia, St. Vincent & Grenadine, Thailand, Tokelau, Tonga, Trinidad & Tobago, Turks & Caicosinseln [49]	miles, mph

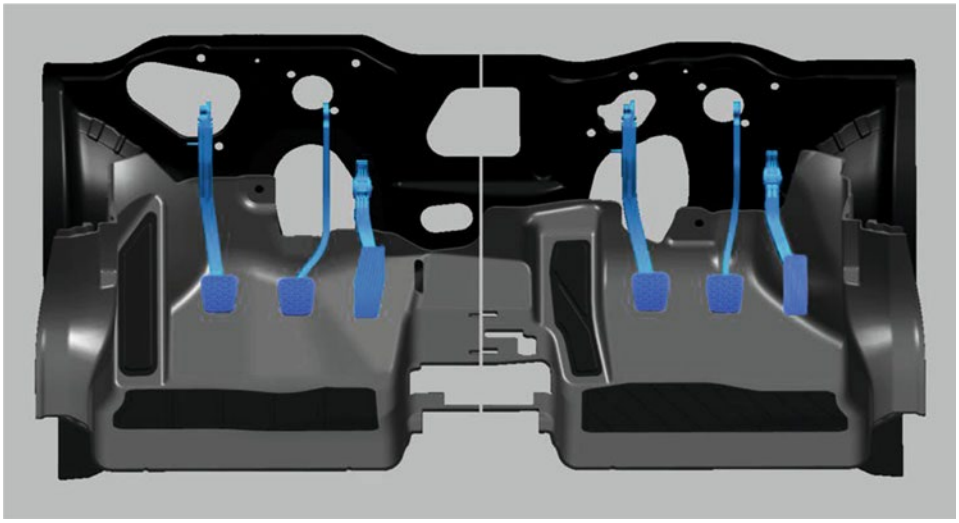


Abb. 7.41 Gegenüberstellung einer LHD- und RHD-Pedalerie [Opel Astra]

neu verlegt werden, ebenso wie die elektrischen und hydraulischen Versorgungsleitungen zur Pedalerie. Oftmals ist der Bauraum jedoch für die Basisvariante so ausgereizt, dass eine unveränderte Übernahme nicht möglich ist und die Pedalerie den Komponenten des Antriebsstranges ausweichen muss. In diesem Fall kann die gesamte Pedalanlage weiter zum Insassen hin angeordnet werden, was in erster Linie mit einer Einschränkung des Freiraumes zwischen Fahrzeugsitz und Pedalerie verbunden ist. Sollte der Zielmarkt ein Land mit kleineren Menschen als im ursprünglichen Markt sein, ist anzunehmen, dass die Beinlängen ebenfalls geringer sind und auch weniger Beinraum benötigt wird. In diesem Fall ist eine moderate Einschränkung ein akzeptabler Kompromiss. Sollte der Zielmarkt größere Personen mit längeren Extremitäten beinhalten, wäre eine solche Einschränkung nicht empfehlenswert und würde zu ungenügenden Akkommodationen führen.

In Fahrzeugen, die kostengünstig auf den Komplementärmarkt umgerüstet wurden, findet man eine Lösung, bei der der Bremskraftverstärker auf der Ursprungsseite verbleibt, die Pedalerie jedoch zur anderen Seite verschoben ist und die Übertragung der Pedalkräfte über eine Koppelstange, die von der einen Seite zur anderen verläuft, gewährleistet wird.

Neben der ungewünschten Torsionsfähigkeit der Koppelstange und den sehr massiv auszuführenden Rohbaulagerungen ist auch hier die Frage der Durchleitung von der einen zur anderen Seite zu klären, was in einem engen Package stets eine Herausforderung darstellt. Auch eine Verlagerung des gesamten Bremskraftverstärkers vom Motorraum in den Fahrzeuginnenraum ist eine technische Möglichkeit, bei dem jedoch massive Pedalhalterungen und Umlenkungsgestänge erforderlich sind. Häufig trifft man auch auf Lösungen, bei der kleinere Durchmesser der Bremskraftverstärker zum Einsatz kommen oder es wird statt einer pneumatischen eine elektrische Unterstützung verwendet. Zentraler Ansatzpunkt einer solchen Anpassung ist stets die Pedalerie mit der sicherheitsrelevanten Bremsanlage. Die Anpassung der Kupplungsaktuation und der Anbindung des Fahrpedals mittels Bowdenzugübertragung stellt verglichen mit den Aspekten der Bremsanlage einen geringeren Aufwand dar.

Die Abstände der Pedalplatten zueinander orientieren sich an der Fußbreite des Fahrers (siehe ► Abschn. 4.2.1.6). Die Breite des Fußraumes ist unabhängig von der Verwendung (oder des Nichtvorhandenseins) eines Kupplungspedals oder einer Fußablagefläche so zu gestalten, dass die Mindestbewegungsfreiheit beider Füße ausreichend gewährleistet ist. So sollte der freie Abstand zwischen A-Säule und Mitteltunnelverkleidung der „Vier-Füße-Regel“ gehorchen, d. h. eine Mindestbreite von

440 mm (4 × 110 mm) bis 500 mm (4 × 125 mm) erfüllen.

Eine Anpassung der **Lenkung** ist heutzutage bei der weit verbreiteten Verwendung von stirnwandseitig montierten Zahnstangenlenkungsgetrieben und kurzen Sicherheitslenksäulen relativ elegant zu lösen, während die langen, am Motorblock entlang laufenden Lenkstangen mit aufwändigen Umlenkhebeln der Vergangenheit angehören. Die Wischeranlage ist oftmals eine mehr oder weniger gespiegelte Anordnung, die eine vollständige Baugruppenvariante darstellt und im sogenannten Wasserkasten am unteren Scheibenquerträger untergebracht ist. Der Wasserkasten wird in der Regel bereits in der Basisvariante so konstruiert, dass er in der Lage ist sowohl die LHD- als auch die RHD-Variante aufzunehmen. Der mechanische Gangwahlhebel, wenn er auf dem Mitteltunnel angebracht ist wird ebenfalls so angeordnet, dass er sowohl für die LHD- als auch für die RHD-Variante gleichermaßen verwendbar ist. Bei einer fahrerorientierten Ausrichtung muss ebenfalls eine Anpassung erfolgen, die jedoch umfangreiche Bauteilvarianten wie Tunnelkonsole, Armauflage und Ablagen erzeugen kann. Insbesondere bei Automatikgetrieben ist ein Schaltschema mit der Anzeige der gewählten Schaltstufe fahrerseitig angeordnet. Die Einsehbarkeit erfordert selbst bei unveränderter Lage des Schalthebels, dass die Gangwahlanzeige für den Komplementärmarkt auf die Fahrerseite des Hebels verlegt werden muss.

Ist das Fahrzeug mit einer handbetätigten Feststellbremse versehen, wird der Hebel günstigerweise stets dem Fahrer zugeordnet, um einen Kraftverlust aufgrund der Reichweite zu minimieren. Insbesondere in rechtsgelenkten Fahrzeugen ergibt sich diese Notwendigkeit durch die Tatsache, dass der Handbremshebel mit dem linken Arm betätigt wird, der bei ca. 90 % der Bevölkerung ungeschickter und unter Umständen auch schwächer ist (siehe Bemerkungen zur Händigkeit am Ende dieses Abschnitts und in ▶ Abschn. 4.2.1.3). Ein wirtschaftlicher Kompromiss ist oftmals den Handbremshebel zentriert auf dem Mitteltunnel anzuordnen, um so Rechts- und Linkslenkervarianten des Hebels zu vermeiden, was allerdings sehr zulasten des Stauraums in der Tunnelkonsole geht. ◘ Tabelle 7.6 zeigt die notwendige Anordnung von Bedienelementen in Abhängigkeit vom Zielmarkt.

Die Anpassung von Bauteilen, die nicht unmittelbar mit der Fahrzeugführung zusammenhängen, entfällt oftmals aus wirtschaftlichen Gründen, da die Umstellung der Vormontage oder Fertigungsprozesse, ein zweiter Werkzeugsatz oder auch eine ganze Reihe von Folgeänderungen damit verbunden sind. In der Regel wird beispielsweise die Tanköffnungsklappe so angeordnet, dass sie sich auf der Fahrerseite befindet. Wird ein solch konzipiertes Fahrzeug dann für den Komplementärmarkt umgerüstet, verbleibt die Öffnung dann auf der ursprünglichen Seite, um das gesamte Unterbodenpackage unverändert lassen zu können. Hier wären ca. 40 Baugruppen einschließlich der Kraftstoffanlage mit unzähligen Teilen, sowie die gesamte seitliche Außenhaut der Karosserie und deren Langläuferwerkzeuge betroffen. Bei Fahrzeugen mit einer seitlich angeschlagenen Hecktür (*Safari door*) wird aus den gleichen Gründen auf eine kostenintensive Anpassung verzichtet, wenn auch diese Lösung einen nutzungsrelevanten Nachteil hat. Wird nämlich das Fahrzeug parallel zur Straße abgestellt, ist eine Entladung des Kofferraumes zur Bürgersteigseite nicht möglich, weil die geöffnete Hecktür den Weg versperrt (◘ Abb. 7.42). Bei asymmetrisch geteilten und umklappbaren Rücksitzbänken wird oftmals das größere Teilstück der Lehne auf der Beifahrerseite angeordnet, da dies dem Fahrer ein größeres Durchladevolumen eröffnet, während auf dem noch verbleibenden Einzelplatz eine Person Platz nehmen kann. Diese Konfiguration wird dann auch beim Wechsel in den Komplementärmarkt unverändert beibehalten, was dort zu einer eingeschränkten Nutzbarkeit im Transportfall führen kann. Auch werden die ursprünglich dem Fahrer zugewandten Bedienteile in der Instrumententafel, wie die Knöpfe und Schalter der Radio- und Heizungsbedienung nicht gespiegelt, obwohl dadurch Reichweitennachteile für den Zweitmarktkunden entstehen. An dieser Stelle ist noch einmal auf den Handbremshebel für die mechanische Feststellbremse zurückzukommen. Eine Anpassung dessen Position an Komplementär merkte kann oftmals entfallen, wenn das Fahrzeug für einen Markt entwickelt wird, auf dem die Nutzbarkeit und Erreichbarkeit der Bechermulden (*Cupholder*) von den Kunden viel höher priorisiert wird als die des Handbremshebels.

Tab. 7.6 Übersicht der Bedienelemente abhängig vom Zielmarkt (LHD und RHD)

	LHD Linkslenker	RHD Rechtslenker
Benutzte Straßenseite	Rechtsverkehr	Linksverkehr
Lenkrad	Links	Rechts
Pedalerie (Fahr-, Brems-, Kupplungspedal)	Links	Rechts
Fahrerfußablage	Linker Fußraum, schwellerseitig	Rechter Fußraum, tunnelseitig
Handbremshebel	Mittig auf Tunnelkonsole oder dem Fahrer zugewandt auf der linken Seite der Tunnelkonsole*	Mittig auf Tunnelkonsole oder dem Fahrer zugewandt auf der rechten Seite der Tunnelkonsole*
Fußbetätigte Feststellbremse	Linker Fußraum, schwellerseitig	Rechter Fußraum, tunnelseitig
Schalter für Elektrisch betätigte Feststellbremse	Mittig auf Tunnelkonsole oder dem Fahrer zugewandt auf der linken Seite der Tunnelkonsole*	Mittig auf Tunnelkonsole oder dem Fahrer zugewandt auf der rechten Seite der Tunnelkonsole*
Schalthebel (Manuelles und Automatisches Getriebe)	Mittig auf Tunnelkonsole oder dem Fahrer zugewandt auf der linken Seite der Tunnelkonsole	Mittig auf Tunnelkonsole oder dem Fahrer zugewandt auf der rechten Seite der Tunnelkonsole
Schaltschema/Ganganzeige	Dem Fahrer zugewandt auf der linken Seite des Schalthebels	Dem Fahrer zugewandt auf der rechten Seite des Schalthebels
Lenkstockhebel für Fahrtrichtungsanzeiger „Blinkerhebel“	Links vom Lenkrad	Links vom Lenkrad (UK/JAPAN) Rechts vom Lenkrad (Indien/Australien)
Lenkstockhebel für Wisch-/Waschanlage „Wischerhebel“	Rechts vom Lenkrad	Rechts vom Lenkrad (UK/JAPAN) Links vom Lenkrad (Indien/Australien)
Haubenentriegelungshebel	Linker Fußraum, schwellerseitig	Rechter Fußraum, schwellerseitig
Taste für Warnblinkanlage	Fahrzeugmittig auf der Instrumententafel oder fahrerseitig (links) in der Nähe der Fahrzeugmitte auf der Instrumententafel	Fahrzeugmittig auf der Instrumententafel oder fahrerseitig (rechts) in der Nähe der Fahrzeugmitte auf der Instrumententafel
Lautstärkeknopf bzw. Ein-/Aus-Taste des Radios	Fahrerseitig (links) in der Nähe der Fahrzeugmitte auf der Instrumententafel	Fahrerseitig (rechts) in der Nähe der Fahrzeugmitte auf der Instrumententafel
Armablage auf der Tunnelkonsole	Mittig auf Tunnelkonsole oder dem Fahrer zugewandt auf der linken Seite der Tunnelkonsole	Mittig auf Tunnelkonsole oder dem Fahrer zugewandt auf der rechten Seite der Tunnelkonsole*
Zylinderschloss für die Notentriegelung	Linke Vordertür (Fahrertür)	Rechte Vordertür (Fahrertür)
Tankklappe	Linke Fahrzeugseite (Fahrerseite)	Rechte Fahrzeugseite (Fahrerseite)
Tankklappenentriegelung	Linker Fußraum, schwellerseitig oder linke Türverkleidung	Rechter Fußraum, schwellerseitig oder rechte Türverkleidung
Hecktürenentriegelung (Griff, Schloss)	Rechte Seite der Hecktür	Linke Seite der Hecktür

*Der Handbremshebel wird auf der fahrerabgewandten Seite angeordnet, wenn Cupholder vom Markt höher priorisiert werden.

Abb. 7.42 Rechts angeschlagene Hecktür

Das ist insbesondere auf dem nordamerikanischen Markt der Fall, wo aufgrund der überwiegenden Verwendung von Automatikgetrieben mit ihrer integrierten Parksperre und der verbreiteten Gewohnheit, regelmäßig große Getränkebecher mit sich zu führen, der Handbremshebel nur in außergewöhnlich stark geneigten Hangpositionen Verwendung findet. Eine elegante Lösung aus dieser Misere scheint die Variante der elektrisch betätigten Feststellbremse, da der hierfür benötigte Schalter weitaus weniger Bauraum beansprucht und demzufolge sich leichter in eine andere Anordnung bringen lässt. Leider genießt diese Variante bei vielen Kunden auf zahlreichen Märkten nur eine eingeschränkte Akzeptanz, so dass der technische und finanzielle Mehraufwand sich nur schwer als funktionaler Mehrwert vermarkten lässt.

Einige Baugruppen müssen notwendigerweise für den Komplementärmarkt angepasst werden, da sie die Zulassungsvorschriften oder die Fahrzeugsicherheit betreffen. So sind die Scheinwerfer aufgrund des technisch üblichen asymmetrischen Abblendlichtes, die Scheibenwischeranlage wegen der zulassungsrelevanten Wischfelder und die Außenspiegel aufgrund national unterschiedlicher Vorschriften stets anzupassen. Der erforderliche Änderungsumfang beschränkt sich hier glücklicherweise nur auf eine stark begrenzte Baugruppe. Befinden sich Fensterheberschalter für alle Fahrzeugseitenscheiben in der fahrerseitigen Türverkleidung, so wird diese Anordnung symmetrisch gespiegelt, was zwar ein eigenes Bauteil und zusätzliche Werkzeugvarianten verursacht, aber in der Entwicklung durch die computergestützte Konstruktion von geringem Aufwand ist. Das betrifft auch den Hauptlichtschalter, sollte er in der Instrumententafel angeordnet sein. Gelegentlich findet man Fahrzeuge, bei denen der Haubenentriegelungshebel auf der ursprünglichen Fahrzeugseite belassen wurde und sich nun im Beifahrerfußraum befindet. Viele Kunden sind jedoch von dieser Praxis irritiert und suchen bei Notfällen vergeblich am falschen Ort. Auch wenn es einen konstruktiven und wirtschaftlichen Mehraufwand bedeutet ist hier eine Anpassung an die Erwartungshaltung des Kunden und des Wartungspersonals ratsam.

Nicht zu verwechseln mit der Rechtslenkerproblematik ist die Frage der *Händigkeit*, also die bevorzugte Nutzung einer Körperseite insbesondere der Hände zum Zweck der Bedienung oder des Schreibens. Unabhängig von der gesetzlich geregelten Fahrtrichtung ist allen Märkten gemeinsam, dass die Verteilung von Rechts- zu Linkshändern kultur- und anthropologieunabhängig gleich ist. Es wird angenommen, dass 10–15 % der Bevölkerung Linkshänder sind und dass das Kraftvermögen mit der ungeschickteren Hand etwas geringer ist als auf der bevorzugten Seite. Dies hat zur Folge, dass die Bedienung von Schalt- und Handbremshebel und den meisten Bedienelementen in der Mittelkonsole in Linkslenkermärkten mit der geschickten und kräftigeren Hand erfolgen kann, während in Rechtslenkermärkten die Fahrer diese Operationen mit der ungeübten Hand ausführen müssen. Zweifelsfrei

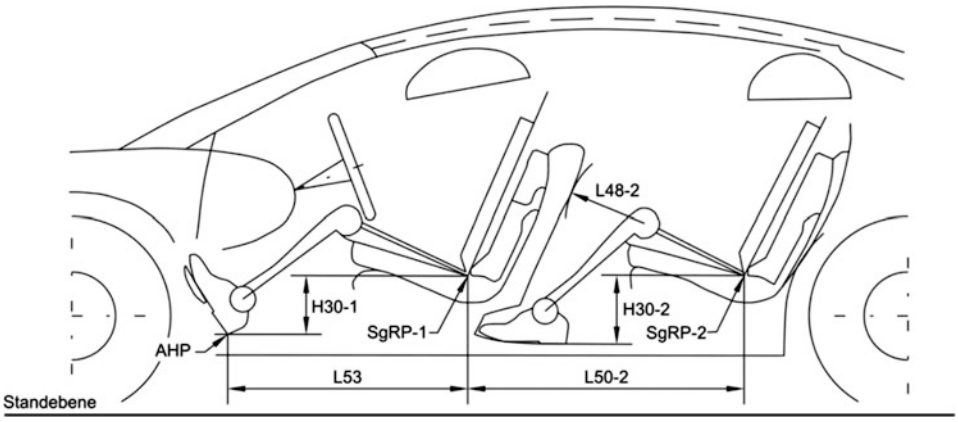


Abb. 7.43 Wichtige Packagemaße für die 2. Sitzreihe

ist hier der Effekt der Übung und Gewöhnung ausschlaggebend und es ist festzustellen, dass eine Umgewöhnung beim Wechsel in ein Fahrzeug des Komplementärmarktes die Nutzer vor größere Probleme stellt, als die Bedienung mit der „falschen" Hand.

7.2.4 Beifahrer

Die für den Fahrer im Detail aufgestellten Überlegungen gelten mit Einschränkung auch für den Beifahrer. Für die Berechnung der Haltung ist hier natürlich nicht von einem Lenkradkontakt auszugehen, sondern beispielsweise von einer Abstützung auf Armlehnen, die nach dem zuvor beschriebenen Verfahren festgelegt worden sind. Üblicherweise wird für den Beifahrer der gleiche Sitz verwendet wie für den Fahrer. Aus ergonomischer Sicht ist das nicht ganz korrekt. Im Gegensatz zum Fahrer kann der Beifahrer verschiedene Körperhaltungen einnehmen, was prinzipiell Haltungsdiskomfort vorbeugen kann. Durch die Verwendung des Fahrersitzes wird er aber in eine relativ starre Haltung gezwungen. Dies kann bei einer engagierten Kurvenfahrt durchaus von Vorteil sein. Bei einer lang andauernden Autobahnfahrt mit geringen Querbeschleunigungen ist aber ein Sitz, der mehr Bewegungsfreiheit zulässt, wünschenswert. Für den Beifahrersitz gilt also noch mehr als für den Fahrersitz, dass Seitenwangen womöglich in Abhängigkeit von Navigationsinformationen und am Fahrzeug gemessenen Beschleunigungswerten automatisch verändert werden oder zumindest vom Nutzer selbst einfach justiert werden können.

7.2.5 Fahrzeugfond

7.2.5.1 2. Sitzreihe

Auch für die zweite Sitzreihe kann ein H30-Maß definiert werden (H30-2). Wesentlich für die Beschreibung des verfügbaren Raums auf der Rückbank ist die Differenz zwischen dem entsprechenden SgRP-2-Punkt und dem SgRP-1-Punkt des Fahrersitzes (Position des 95-Perzentil SAE-Manikin). Eine weitere wichtige beschreibende Größe ist die Distanz zwischen diesem SgRP-2 und der äußeren Kontur der Rückenlehne des Vordersitzes (Knieraum). Eine wesentliche, häufig vernachlässigte Größe ist der Fußraum unter den Vordersitz, der zusammen mit dem Knieraum für den Rückpassagier die Möglichkeit festlegt, eine entspannte Haltung einzunehmen (Abb. 7.43).

Häufig wird unterstellt, dass die zweite Sitzreihe nicht wichtig sei, weil jedes Fahrzeug durchschnittlich nur mit 1,5 Fahrern besetzt sei. Wenn man einmal von zweisitzigen Sportwagen absieht, ist es gerade der Vorteil eines Fahrzeugs mit 2. Sitzreihe, gelegentlich mit mehreren Personen unterwegs zu sein. Dies ist vornehmlich auf langen Strecken der Fall. Auffällig ist dabei, dass offensichtlich gerade in Kompaktwagen die zweite Sitzreihe häufiger benutzt wird als in den dafür besser geeigneten Limousinen (siehe Abb. 7.44). Interessant ist auch die relativ hohe Nutzungszahl der 2. Sitzreihe in Cabriolets.

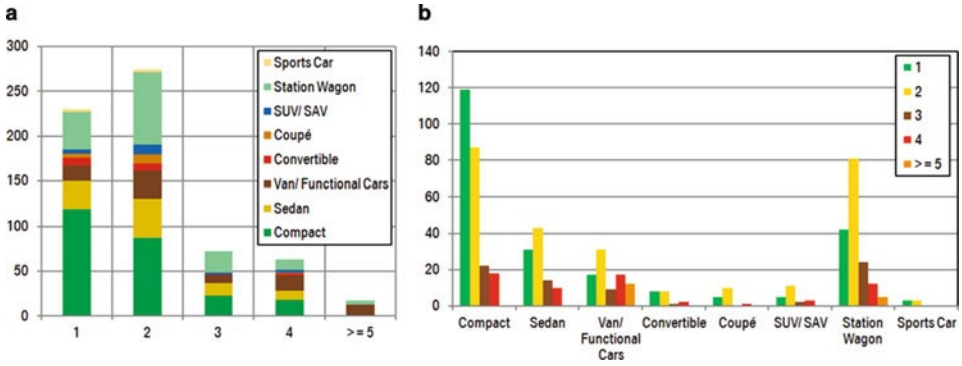


Abb. 7.44 Ergebnisse einer exemplarischen Verkehrsanalyse an einem Sonntag auf einer Strecke zwischen München und Delft (850 km). Das Diagramm **a** zeigt die Häufigkeitsverteilung der Personenzahl in verschiedenen Fahrzeugtypen, das Diagramm **b** die jeweiligen Fahrzeugtypen mit der zugehörigen Personenzahl (Kilincsoy et al. 2014)

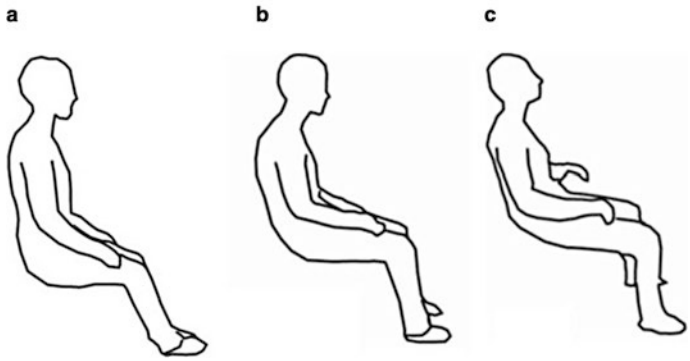


Abb. 7.45 Typische Sitzhaltungen für Rücksitzpassagiere, **a** aufrechte Haltung für verschiedene Aktivitäten, **b** Leicht entspannte Haltung, **c** Ruhehaltung

Dies sind alles Gründe, bei der Fahrzeugentwicklung und -beurteilung auch die 2. Sitzreihe mit hoher Priorität zu berücksichtigen.

Prinzipiell kann das Layout der 2. Sitzreihe mithilfe von Menschmodellen (zum Beispiel RAMSIS) in ähnlicher Weise konzipiert werden wie das des Fahrersitzes. Es ist dabei von der pessimalen Situation für den Rücksitzpassagier auszugehen, d. h. der Frontsitz ist in eine Position für den großen langbeinigen Mann zu bringen. Bezüglich des Layouts des Fahrzeugfonds haben sich bei den verschiedenen Automobilfirmen unterschiedliche Philosophien entwickelt. So kann beispielsweise in Abhängigkeit von der Modellreihe (Kompaktfahrzeug, untere Mittelklasse, Mittelklasse, Luxusklasse) festgelegt werden, bis zu welchem Perzentil unter diesen Bedingungen Raum auf dem Rücksitz vorzusehen ist. Von Vorteil kann es auch sein, den Bezugspunkt SgRP-2 ähnlich dem des Fahrersitzes verschieblich zu gestalten, wie dies bei einigen Fahrzeugkonzepten (SUV's, VAN's, Kombinationsfahrzeuge) möglich ist.

Auf dem Rücksitz werden andere Körperhaltungen eingenommen, da die durch die Fahraufgabe vorgegebene Haltung entfällt. Aus Beobachtungen über Sitzhaltungen in Eisenbahnzügen (Kamp et al. 2011) haben Kilincsoy et al. (2014) drei Sitzhaltungen extrahiert, die für Rücksitzpassagiere primär infrage kommen und die in Abb. 7.45 illustriert sind. Die Haltung links gibt eine *aufrechte Position* für kurze Fahrten wieder, die dadurch charakterisiert ist, dass der Passagier beispielsweise die Umgebung beobachtet, das Mobiltelefon nutzt, mit anderen Rücksitzpassagieren spricht oder isst. Die in der Mitte dargestellte leicht entspannte *Standardhaltung* benötigt etwas mehr Raum. Der Passagier ist wach und widmet sich beispielsweise dem Musikhören. Die rechts dargestellte *entspannte Haltung* ist für

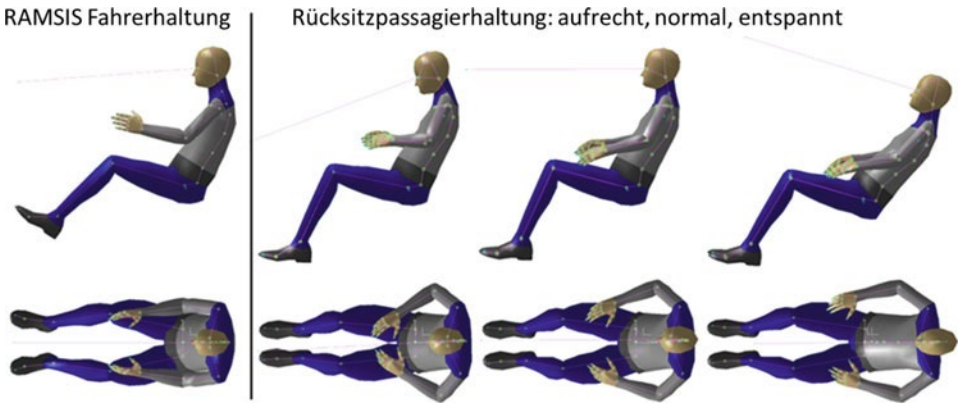


Abb. 7.46 Repräsentation in RAMSIS der von Kilincsoy et al. (2014) gefundenen Körperhaltungen im Vergleich mit der Fahrerhaltung (links)

Tab. 7.7 Mittelwert und Standardabweichung der drei typischen Rücksitzpassagierhaltungen in 2-D Projektion (Kilincsoy et al. 2014)

Haltung	Winkel						
	Kopf-Nacken	Nacken-Torso	Schulter	Ellenbogen	Hüfte	Knie	Fußgelenk
Aufrecht	177,5 ± 4,6	130,0 ± 3,5	32,4 ± 13,3	113,1 ± 11,7	105,5 ± 5,5	103,4 ± 12,5	104,9 ± 5,8
Standard	187,2 ± 3,9	139,5 ± 0,7	0,6 ± 12,6	128,5 ± 14,1	104,2 ± 7,6	99,5 ± 9,9	104,7 ± 4,6
Entspannt	185,3 ± 4,3	142,7 ± 3,5	1,0 ± 11,8	139,9 ± 11,8	118,9 ± 10,5	104,9 ± 11,9	107,9 ± 8,2

größere Autos relevant. Der Passagier unternimmt eine lange Reise, er schläft vielleicht längere Zeit oder ist auch sonst weitgehend entspannt.

Kilincsoy et al. (2014) haben in einem geeigneten Fahrzeug-Mock-Up (siehe ▶ Abschn. 10.3.1) Probanden die genannten drei Haltungen einnehmen lassen, mittels der PCMAN-Methode (siehe ▶ Abschn. 11.2.1.3) die jeweiligen Körperwinkel dreidimensional erfasst und die korrespondierenden Körperhaltungen in RAMSIS wiedergegeben (Abb. 7.46). Um einen Vergleich mit den Angaben aus Tab. 7.4 zu ermöglichen, werden in Tab. 7.7 die Projektionen der gefundenen Winkel auf die Sagittalebene einschließlich der Standardabweichung wiedergegeben. Auffällig ist der Schulterwinkel in der aufrechten Haltung, der von den anderen beiden Haltungen abweicht. Er ist auf die dort ausgeübte Tätigkeit (z. B. Mobiltelefonnutzung) zurückzuführen. Deutlich unterscheidet sich der Hüftwinkel in der entspannten Haltung von den anderen beiden Haltungen insbesondere auch von der Fahrerhaltung. Die Fußgelenkwinkel unterscheiden sich nur wenig, was darauf hinweist, bei der Konzeption der zweiten Sitzreihe insbesondere auf den Fußraum unter dem Vordersitz zu achten.

Die oben dargestellten Haltungen können genutzt werden, um den Rücksitzraum zu optimieren. Hinsichtlich Sitzgestaltung, Abstützung und Gurtverlauf gelten ähnliche Kriterien wie sie für Fahrer und Beifahrer entwickelt worden sind. Es ist dabei allerdings zu berücksichtigen, dass auf dem Rücksitz eine wesentlich größere Bewegungsfreiheit für den Passagier vorzusehen ist. Das bedingt insbesondere, Kompromisse hinsichtlich der Gurtführung einzugehen. Auf die zusätzlichen Einrichtungen in Luxusfahrzeugen (Telefon, Entertainment, individuelle Klimatisierung, Massagesitze u. ä.), in denen der Rücksitzpassagier eine besondere Rolle spielt, wird in diesem Rahmen nur hingewiesen.

Aufgrund der immer weiter fortschreitenden Vorschriften und Techniken zur passiven Sicherheit

ist ein für das Wohlbefinden des Rücksitzpassagiers wichtiges Thema mehr und mehr aus dem Blickfeld geraten. Wie bereits in ▶ Abschn. 3.1.3 dargestellt, ist ein wesentlicher Grund für das Auftreten von Kinetose („Seekrankheit") das ungewohnte Auseinanderlaufen von optischer und kinästhetischer Information. Dies tritt besonders stark dann auf, wenn der Passagier keine Möglichkeit hat, den Straßenverlauf zu verfolgen (Stichwort: „Blick zum Horizont"). Durch die die Sicht immer mehr verstellenden Kopfstützen wird aber gerade dieser Effekt erzeugt. Es ist unter diesem Aspekt zu untersuchen, inwieweit durch eine andersartige Gestaltung der Kopfstützen oder auch durch eine andere Positionierung der Rücksitzpassagiere (beispielsweise mehr zur Fahrzeugmitte hin) der Entstehung von Kinetose vorgebeugt werden kann.

7.2.5.2 3. Sitzreihe

In manchen Fahrzeugtypen ist auch eine 3. Sitzreihe vorgesehen. Im Prinzip gelten für diese Sitzreihe die gleichen Bedingungen wie die für die 2. Sitzreihe. Diese Forderungen können aber nur bei wenigen Fahrzeugen (größeren SUV's und VAN's) eingehalten werden. Bei den meisten Fahrzeugen wird diese Sitzreihe als Notsitz oder als Sitz für Kinder in jüngerem Alter konzipiert. Bei manchen Kombinationsfahrzeugen kann auch eine 3. Sitzreihe entgegen der Fahrtrichtung in den Gepäckraum montiert werden. In jedem Fall ist es Angelegenheit der Festlegung im Lastenheft, für welche Zielgruppe diese Sitze zu konzipieren sind. In allen Fällen ist es möglich, mithilfe von Menschmodellen analog zu ▶ Abschn. 7.2.5.1 eine genauere Konzeption solcher Sitze vorzunehmen. Insbesondere sind auch hier die Aspekte der Abstützung durch den Sitz und des Gurtverlaufs zu beachten.

Ein eigenes Problem der 3. Sitzreihe und in vielen Fällen auch der 2. Sitzreihe ist die Konzeption der Klappmechanismen, mit deren Hilfe die Sitze im Fahrzeugboden versenkt werden können. Manchmal ist auch vorgesehen, den Sitz als Ganzes aus dem Fahrzeug zu nehmen. Dann sind entsprechende Entriegelungsmechanismen und Haltegriffe zu konzipieren, die ergonomischen Anforderungen genüge leisten (Verständlichkeit, geringe aufzubringende Betätigungskräfte). Insbesondere können Menschmodelle Hilfestellung geben, was die Größe der dafür notwendigen Bedienelemente und die Möglichkeit, den Sitz als Ganzes zu tragen, anlangt. In entsprechenden ergonomischen Standardwerken (z. B.: Schmidtke: Handbuch der Ergonomie) oder Software Tools (z. B. EKIDES) finden sich allgemeine, aber durchaus detaillierte Hinweise dazu, die allerdings auf den entsprechenden Anwendungsfall erst adaptiert werden müssen.

7.3 Sicht

7.3.1 Direkte Sicht

7.3.1.1 Sicht nach vorne

Richtlinien und Vorschriften

Wie in ▶ Abschn. 7.2.2 dargelegt, wird die Fahrerhaltung durch die Sicht nach vorne maßgeblich beeinflusst. Es existiert eine Reihe von gesetzlichen Vorschriften verschiedener Nationen bzw. Wirtschaftsräume, um eine erforderliche Mindestqualität der Sichtbedingungen in jedem für den Straßenverkehr zugelassenen Fahrzeug sicherzustellen. Die wesentlichen Vorschriften für die direkte und indirekte Sicht in den Regionen Europa, Nordamerika und Australien wurden von Hudelmaier (2003) zusammengestellt und sind mit Aktualisierungen und Ergänzungen in ◘ Tab. 7.8 wiedergegeben. Außerdem existieren gesonderte Vorschriften für die Länder Japan, Indien und die Gemeinschaft Unabhängiger Staaten (GUS). Die meisten Vorschriften dieser Staaten orientieren sich inhaltlich und formal an den Vorschriften aus Europa und Nordamerika. Darüber hinaus existieren Normen der Ingenieurvereinigungen wie beispielsweise DIN, VDI, SAE oder JAMA, die den „Stand der Technik" beschreiben und somit Relevanz haben, jedoch nicht unbedingt rechtsverbindlichen Charakter besitzen (Remlinger 2013).

Im Folgenden werden nur die wichtigsten dieser Vorschriften kurz erläutert, da eine umfassende Darstellung den hier vorgesehenen Rahmen bei weitem sprengen würde. Es wird in diesem Zusammenhang auf die einzelnen Vorschriften verwiesen.

Praktisch spielt das Konzept der Augenellipse nach SAE J941 in der Fahrzeuggestaltung eine wesentliche Rolle. Die Lage diese Ellipse ist in Größe und Neigung ihrer Hauptachsen durch den

Tab. 7.8 Wichtige Vorschriften und Richtlinien hinsichtlich der Sicht aus einem Pkw (aktualisiert und ergänzt nach Hudelmaier 2003)

Sichtfeld	*Scheibenwischer und -wascher*	*Sicherheitsglas*	*Rückspiegel*
StVZO §35 **ISO 7397** Messung und Beurteilung **SAE J1050a** Beschreibung und Messung des Fahrersichtfeldes **77/649 EWG → 90/630 EWG** Mindestsichtfeld nach vorne Verdeckungen **FMVSS 128** Mindestsichtfeld Verdeckungen Sonnenblenden **ECE R125** Vorderes Sichtfeld **J/P/061** Sichtfeld im Nahbereich	**FMVSS 104** **SAE J903** Wischfeld **ISO 3469** Testmethoden **EWG 78/318** Wischfeld, Funktion **ADR 16**	**BS AU 178a** Spezifikation **ECE R43** **ISO 3637** Material **ISO 3538** optische Eigenschaften **ISO 3917** Testverfahren **FMVSS 205** **ADR 8**	**StVZO §56** ADR 12 ausgelaufen **ADR 14** **2003/97 EG → 2005/27 EG** Beschreibung und Messung des Fahrersichtfeldes **ECE R46** **FMVSS 111** Anordnung Sichtfeld Bedienung FMVSS 107 zurückgezogen **ISO 5740** Testverfahren Reflektionsgrad

Scheibenentfrostung	*Windschutzscheiben Luftdüsenausstattung*	*Schattenbänder*
EWG 78/317 Bereiche, Zeit **SAE J902, SAE J381** Entfrostung Beschlagentfernung **ISO 3468**, ISO/NP 3470 Testmethoden **FMVSS 103** Entfrostung Beschlagentfernung **ISO 5898** Entfrostung Heckscheibe	**ISO 3470** Testmethoden	**SAE J100**

Heckscheiben Wischer und -wascher
ISO 6255 Anforderungen

95 % Sitzreferenzpunkt SgRP bestimmt. Aus der Abb. 7.47 kann abgeleitet werden, dass es sich dabei eigentlich um einen Ellipsoidkörper handelt, der aus zwei Ellipsoiden (eines für das linke und eines für das rechte Auge) zusammengesetzt ist, die sich gegenseitig durchdringen. Die Distanz zwischen dem Sitzreferenzpunkt SgRP und dem hinteren Brennpunkt dieser Ellipse in der Seitenansicht beträgt 635 mm. Die Augenellipse ist aus ihrer Entstehungsgeschichte heraus folgendermaßen definiert: An amerikanischen Convertibles (Cabrios) des Baujahr 1963 wurde die zweidimensionale Verteilung von Augenpunktlagen jeweils in der Seitenansicht und der Aufsicht mit Probanden unterschiedlicher Körpergröße gemessen (Meldrum 1965)[18]. An diese Punkte wurden Geraden in beliebiger Richtung so angelegt, dass jeweils 95 % der Augenpunkte auf der einen und die restlichen 5 % auf der anderen Seite dieser Geraden liegen. Die Einhüllende all dieser Geraden ist eine Ellipse (im aufgezeigten Beispiel die 95 % Augenellipse; Hudelmaier 2003). Die in Abb. 7.47 eingezeichneten Tangenten an die Augenellipse schließen somit einen Bereich ein, der von 95 % der Nutzer gesehen werden kann. Im Detail gibt es viele zusätzlichen Vorschriften zur Verwendung der Augenellipse, die gemäß ihrer Definition nur Augenpunkte bei unbewegter Kopfstellung enthalten.

Viele neuere Untersuchungen ergeben, dass die tatsächlichen Augenlagen oftmals den Bereich der Augenellipse deutlich überschreiten (Abb. 7.48), was unter Umständen auch auf die bei ihrer Entstehung verfügbaren Fahrzeuge sowie auf die bei den Versuchen verwendete Probandenpopulation zurückzuführen ist. Remlinger (2013) zeigt, dass die realen Augenpunktlagen durch die RAMSIS-Extremtypen bereits in der Konzeptionsphase sehr gut vorhergesagt werden können (Abb. 7.49).

18 Die verwendeten Fahrzeuge hatten Sitze mit einem aus heutiger Sicht relativ kleinen Verstellweg zwischen 114 und 137 mm. Zudem waren sie mit einer Sitzbank mit starren Lehnenwinkeln zwischen 22,5° und 26,5° ausgerüstet. Die Sitzverstellung war gegenüber der Horizontalen mit einem Winkel zwischen 7° und 15° geneigt. Zudem hatten diese Fahrzeuge auch keine Höhenverstellung der Sitze und keine Verstellmöglichkeit für das Lenkrad.

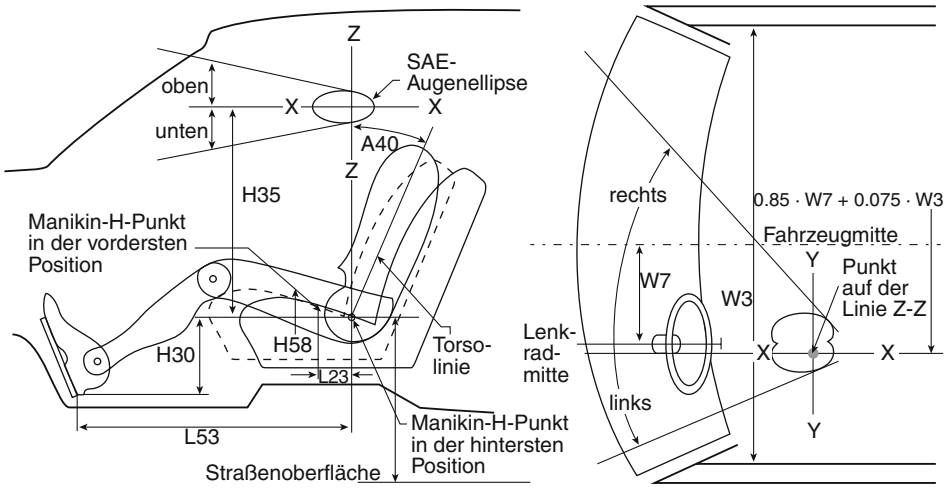


Abb. 7.47 Lage der Augenellipse bezüglich des SgRP in der Seitenansicht (**a**) und der Aufsicht (**b**; aus SAE J941)

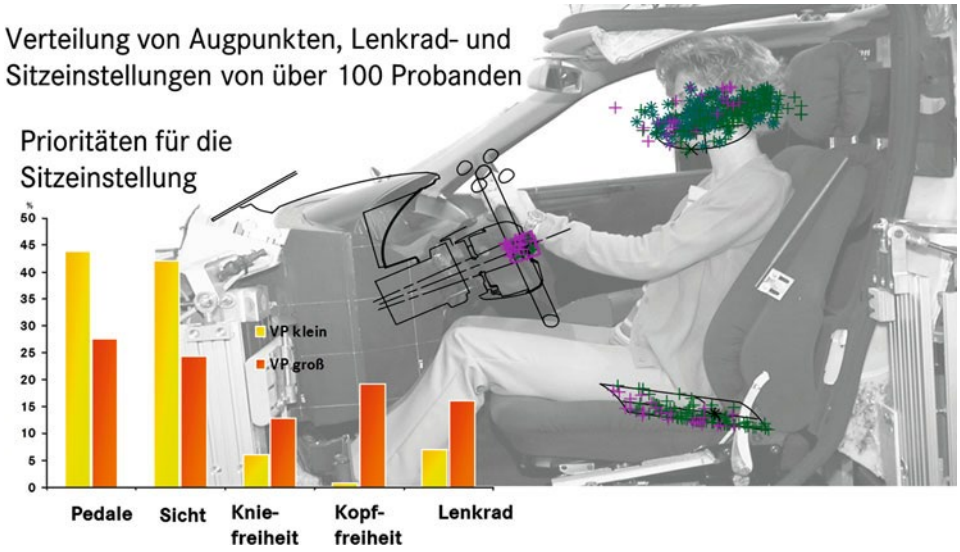


Abb. 7.48 Variation der Augenpunktelagen, der H-Punktlagen und der Lenkradstellung bei über 100 Versuchspersonen (Brückner 2011)

Für die Zulassung von Fahrzeugen in der Europäischen Union spielt die Überprüfung der binokularen Sichtverdeckungen anhand der Zulassungsvorschriften 77/649/EWG (2008) eine wichtige Rolle. Diese Vorschrift geht von dem SAE SgRP aus und verwendet ein vereinfachtes Modell des Kopfes, der durch ein Dreieck bestehend aus den beiden Augen und einem Nackendrehpunkt repräsentiert wird (näheres hierzu Remlinger 2013). In dieser Vorschrift werden zwei Augenpunkte V1 und V2 definiert, die für die Erfüllung einer Reihe von EWG-Richtlinien und der davon abhängigen Zertifizierung des Fahrzeugs von Bedeutung sind.

Die deutsche Bestimmung StVZO legt im § 35b zusätzlich die für ein Fahrzeug notwendigen Sichtbereiche nach vorne und zur Seite fest. Es wird dabei von einem als fest angenommenen Augenpunkt ausgegangen, der in einer in Sitzmitte lokalisierten Vertikalebene 130 mm vor der Vorderkante der Rückenlehne und 700 mm über dem unbelasteten Fahrersitz

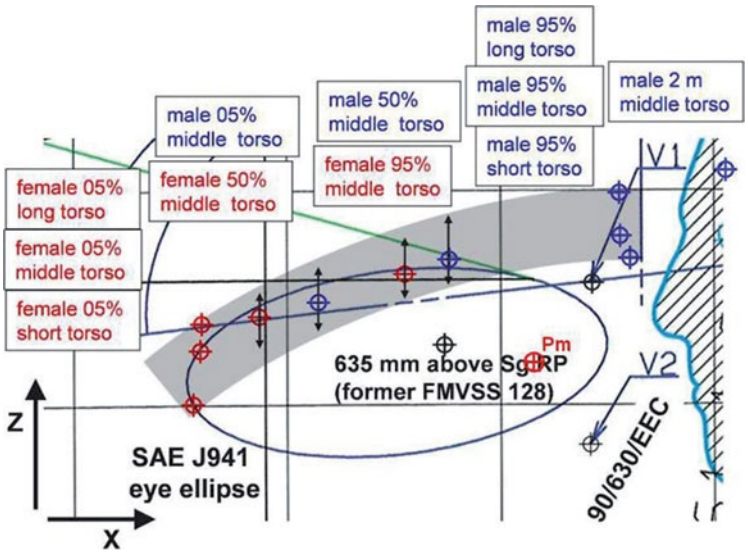


Abb. 7.49 Augenpunktlagen nach SAE-Norm im Vergleich zur RAMSIS-Simulation (aus Remlinger 2013)

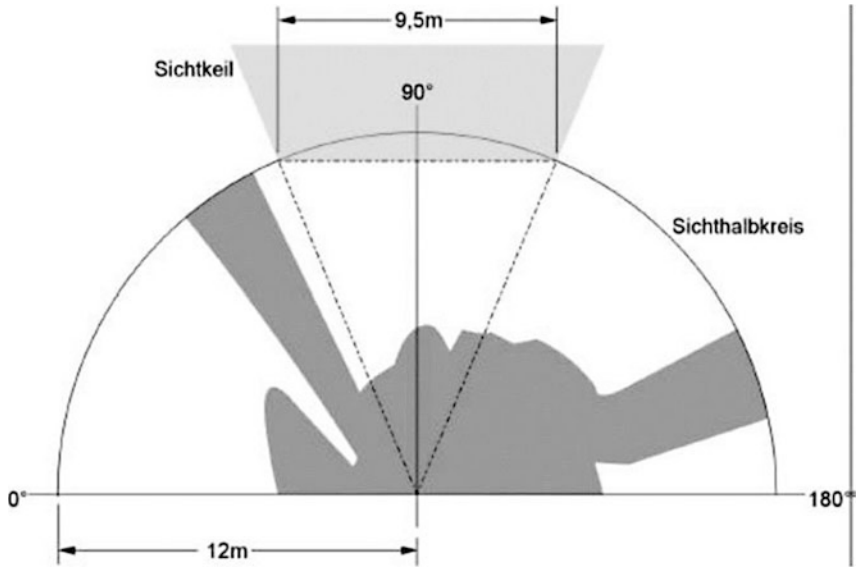


Abb. 7.50 Sichthalbkreis und Sichtkeil nach StVZO § 35b

in Mittelstellung definiert ist. Von diesem Punkt werden Sichtlinien auf die Fahrbahnebene vor dem Fahrzeug gezogen (experimentell kann dies geschehen, indem man eine punktförmige Lampe verwendet und den Schattenriss des Fahrzeugs auf der Fahrbahnebene vermisst). Speziell die Sicht nach vorne gilt als gewährleistet, wenn in einem Halbkreis von 12 m Radius ein Bereich von mindestens 9,5 m ohne Sichteinschränkung erhalten bleibt (Abb. 7.50).

Das durch die StVZO gegebene Verfahren kann auch auf das ganze Fahrzeug ausgedehnt werden. Zur Bestimmung der vom Fahrzeug durch die Karosserie verdeckten Bodenfläche werden von dem definierten Augenpunkt aus die Fensteröffnungen auf die Standebene projiziert und von der entstandenen Fläche begrenzt an definierten Grenzabständen zum Fahrzeug der Flächeninhalt bestimmt (Abb. 7.51). Die sich ergebende Bodenfläche dient als Vergleichsmaß zwischen zwei konkurrierenden Konzepten oder Wettbewerbsfahrzeugen. Diese Methode eignet sich einerseits zur Ermittlung der Projektionsfläche auf Basis eines virtuellen CAD-Models als

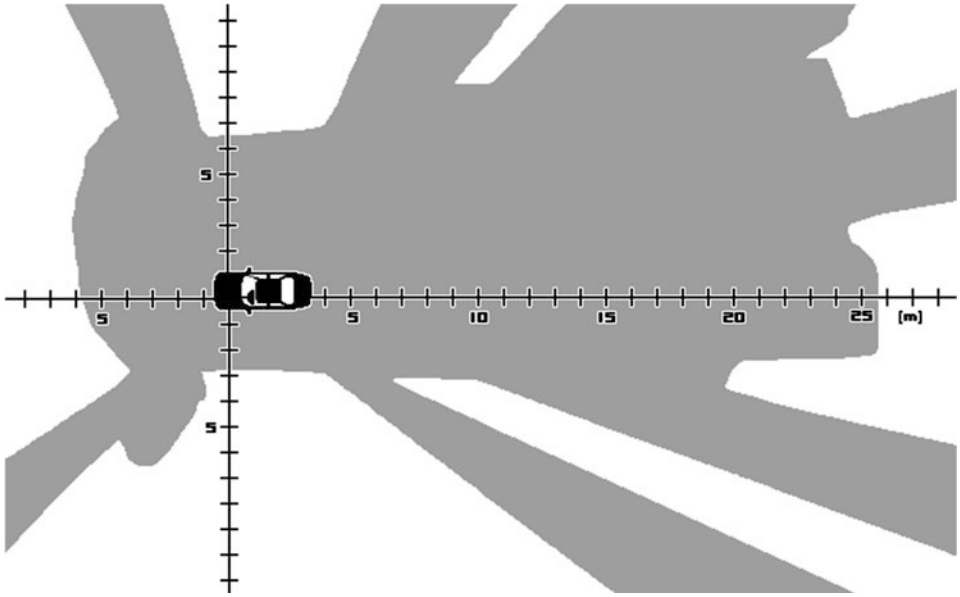


Abb. 7.51 Verdeckungsfläche auf die Standebene projiziert

auch zur physischen Evaluierung mit Fahrzeugen, bei denen keine mathematisch beschriebenen Daten vorliegen. Aus dem Augenpunkt kann die „Hell-Dunkel-Grenze" auch mit einem Laserstrahl auf die Standebene projiziert werden, oder es wird eine helle Lichtquelle in diesem Punkt angebracht und der Schattenwurf auf der Bodenfläche fotografisch oder mit Markierungslinien dokumentiert.

Mit dieser Messmethode wird auch der Zusammenhang zwischen einsehbarem Verkehrsraum und einigen Fahrzeugparametern anschaulich. Wird der Augenpunkt leicht angehoben, verringert sich die Schattenfläche, weil der Strahlenwinkel über die Türbrüstungen steiler wird und damit der Sichtpunkt näher zum Fahrzeug rückt. Ebenso verhält es sich mit einer Absenkung der Gürtellinie. Je tiefer die Brüstungslinie unter dem Augenpunkt liegt, umso besser lässt sich das Umfeld einsehen. Gleiches gilt auch für die Sicht über die Haube sowie die Sicht zum Heckbereich des Fahrzeuges. Eine Einsehbarkeit der vorderen Haubenkante fördert die Abschätzung der Fahrzeugabmessungen, sollte jedoch nicht so voluminös sein, dass die Sicht auf die vorausliegende Straße beeinträchtigt wird (siehe hierzu auch Abb. 7.18).

Mit der vorgestellten Messmethode lässt sich leicht der dem Fahrzeug am nächsten liegende Punkt bestimmen, bei dem der Fahrer aus einer definierten Augenpunktlage heraus in der Lage ist, über die Haubenkante hinweg die Straße zu sehen. Um jedoch den Streubereich der Bodensicht aus allen Augenpunktlagen heraus zu bestimmen, ist es notwendig, eine Variation über alle möglichen Fahrerpositionen vorzunehmen. Das geschieht am besten mithilfe der Auslegungsmanikins, die über ein Menschmodell definiert worden sind. Aus dieser Betrachtungsweise wird ersichtlich, dass große Fahrer, die im Sitzverstellfeld weit hinten und gleichzeitig sehr flach sitzen, unter Umständen erst sehr weit vor dem Fahrzeug erstmalig die Straße einsehen können. Gleiches gilt für Fahrer mit sehr kurzem Oberkörper bei entsprechend niedriger Sitzposition. Eine hohe Augenpunktlage, die für große wie kleine Fahrer gleichermaßen erreichbar ist, ermöglicht es hingegen, die Straße schon viel früher einsehen zu können. So ist bei nur geringer Anhebung des Augenpunktes um wenige Millimeter bereits eine Verbesserung der Straßensicht um einige Meter möglich. Die Bodensicht ist oftmals nur ein Ergebnis der gewählten Sitzeinstellung und nicht das alleinige ausschlaggebende Kriterium für die Wahl der Sitzposition; denn die Erreichbarkeit der Pedale und der Verstellbereich des Lenkrades zwingen oftmals kleine Fahrerinnen oder Fahrer in eine niedrigere Position, wodurch sich eine Beeinträchtigung der Sichtverhältnisse ergeben kann.

Abb. 7.52 Maximales Fahrerblickfeld: **a** Sicht einer kleinen Frau (FSMM), **b** Sicht eines mittelgroßen Mannes (MMMM), **c** Sicht eines mittelgroßen Mannes mit Gleitsichtbrille (aus Remlinger 2013)

Ergonomische Analysen

Das Menschmodell RAMSIS bietet speziell mit dem Programmmodul *RAMSIS-kognitiv* eine Reihe von Gestaltungs- und Analysefunktionen, die im Sichtbereich eine realitätsnahe Überprüfung auf CAD-Ebene ermöglichen, die über die in Vorschriften und Richtlinien enthaltenen Vorgaben weit hinausgeht. Hinzu kommt, dass die jeweiligen Blickfelder aus der Fahrerposition der verschiedenen RAMSIS-Manikins berechnet werden können und somit dem CAD-Nutzer ein realistischer Eindruck des Seheindrucks unterschiedlicher Personentypen vermittelt werden kann (siehe Abb. 7.52). In vielen Fällen genügt es für solche Analysen, von dem sog. Mittenauge auszugehen, um sich einen Eindruck davon zu verschaffen, was der Seheindruck des Fahrers ist. In einigen Fällen – gerade im Nahbereich – ist es sinnvoll, die Berechnung getrennt für das linke und rechte Auge durchzuführen und durch Überlagerung der beiden Bilder festzustellen, welcher Bereich binokular und welcher Bereich nur monokular gesehen wird. Für das Erkennen von Objekten genügt häufig die monokulare Sichtbarkeit. Deshalb sind für Verdeckungseffekte speziell die Bereiche kritisch, die binokular verdeckt werden.

Für viele Gestaltungsaufgaben ist es von Bedeutung, wie groß die Blickzuwendungszeiten für das Erfassen von bestimmten Objekten sind. Das wird gerade bei dem Vergleich des mittleren und rechten Bildes der Abb. 7.52 offensichtlich: während der normalsichtige mittelgroße Mann beim Blick von der Straße zu den Instrumenten nur die Augen bewegen muss, hat der alterssichtige mittelgroße Mann mit Gleitsichtbrille dafür eine Kopfbewegung durchzuführen. Remlinger hat aus Literaturdaten Bereiche gleichen Zeitaufwandes (Isochronen) zusammengestellt (Abb. 7.53). In RAMSIS sind die entsprechenden Daten in Verbindung mit der Fahrzeuggeometrie darstellbar.

Eine Visualisierung der verschiedenen Blick- und Gesichtsfelder (siehe auch Tab. 4.11) in Form eines Polardiagramms (Abb. 7.54) kann gegebenenfalls der Fahrzeuggeometrie oder auch einer zusätzlich dargestellten Verkehrssituationen überlagert werden. Verschiedene Aspekte der Alterssichtigkeit können visualisiert und in fahrzeugrelevante Darstellungen umgesetzt werden (Abb. 7.55). Insbesondere ist es möglich, Verkehrssituationen aufzubauen und damit praxisgerecht aus dem Blickwinkel unterschiedlicher Manikins Aspekte wie Verdeckungen durch die A-Säulen, Rückspiegel u. ä. abzuschätzen (Abb. 7.56).

Speziell der Einfluss der Fahrzeuggeometrie auf Sichtverdeckungen ist ein wichtiges Analyse- und Bewertungsverfahren, das über die rein geometrischen Bedingungen, die in den Vorschriften gesetzt werden, hinausgeht. Bei der Daimler AG wurden durch Scholly (2006) systematische Blickbewegungsanalysen im realen Verkehrsgeschehen durchgeführt. Um zu neutralen Erfassungen der Blickdichte der Sicht nach vorne zu kommen, wurden die Versuche mit einem Versuchsfahrzeug ohne Sichtverdeckung, dem so genannten Glaskuppelauto, durchgeführt. Ein Ergebnis der Versuche ist: Häufig deckt sich an Einmündungen und auf kurvenreichen Straßen die Sichtverdeckung durch die A-Säulen mit den notwendigen Hauptblickrichtungen (siehe Abb. 7.57). Dabei ist für den Sichtdiskomfort offensichtlich weniger die Verdeckungsbreite verantwortlich, als die Lage der A-Säule, da die Fahrer dazu neigen, den Blick innerhalb des Windschutzscheibenbereiches zu halten. Abbildung 7.58 zeigt den Verdeckungseffekt durch die A-Säule in einem modernen PKW.

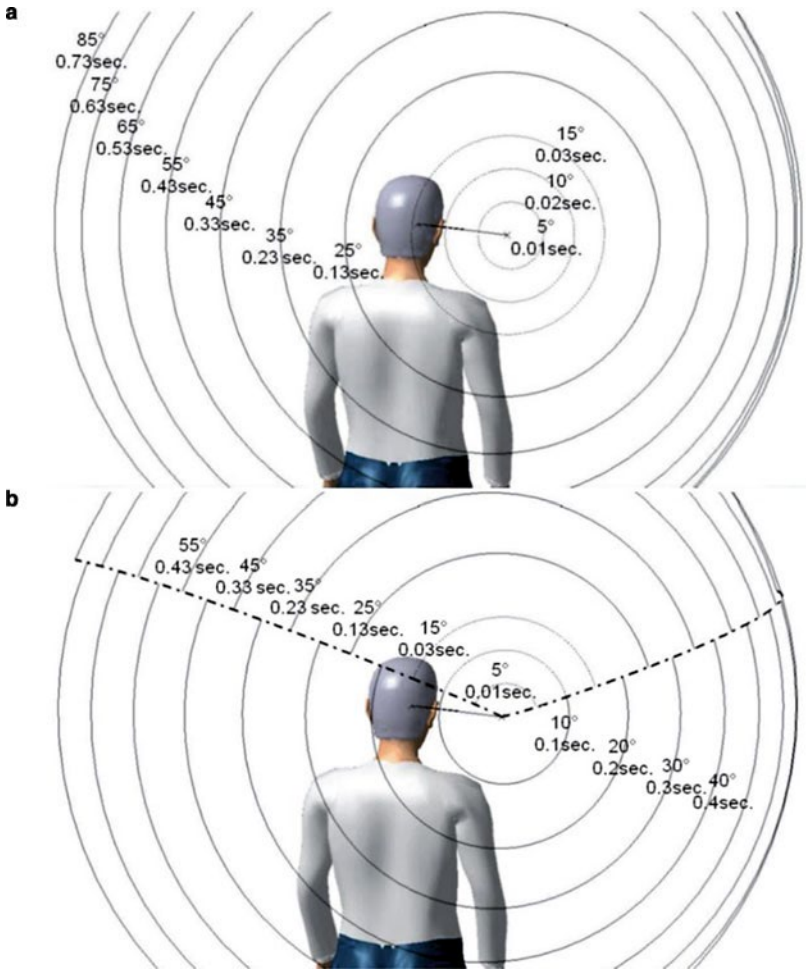


Abb. 7.53 Blickabwendungszeiten als Isochronen eines normalsichtigen (**a**) und eines Gleitsichtbrillenträgers (**b**) (aus Remlinger 2013)

Aus der Blickdichteverteilung, die durch die Eye-tracking-Versuche in dem Glaskuppelauto gefunden wurden, entwickelte Scholly ein Bewertungsverfahren, mit dessen Hilfe sich bereits auf der Grundlage von CAD-Konstruktionsdaten des Fahrzeugs gewichtete Bewertungsgrößen ableiten lassen, welche Aussagen über die Sichtverdeckung des zukünftigen Fahrzeugs machen und kennzeichnen, in welchen Bereichen der Sicht diese Verdeckungen besonders störend und beeinträchtigend wirken. Abbildung 7.59 zeigt die Abwicklung einer konischen Projektion des Greenhouse und die Bewertungszonen des Daimler-Scholly-Verfahrens für die Sicht nach vorne, berechnet aus dem Augenpunkt („Mittenauge") eines RAMSIS-Manikins. In Abhängigkeit von den verwendeten Manikins ergeben sich also unterschiedliche Projektionen. Führt man die Berechnung für das linke und das rechte Auge getrennt durch, so lassen sich die Verdeckungsbereiche bestimmen, die auch bei Nutzung beider Augen nicht eingesehen werden können, denn nur Objekte im Feld der binokularen Verdeckung bleiben unsichtbar. Die in Abb. 7.59 wiedergegebenen verschiedenen Farbzonen stehen für unterschiedlich stark gewichtete Bereiche der Sichtverdeckung. Dadurch ist eine zahlenmäßige Bilanzierung der durchsichtigen und undurchsichtigen Anteile der Sichtzonen möglich, die zu einem gewichteten Gesamtergebnis zusammengefasst wird. Remlinger (2013) merkt dazu an: „Dieses Sichtbewertungsverfahren wurde bereits innerhalb der europäischen Automobilherstellervereinigung ACEA und auch mit Vertretern des japanischen Automobilherstellerverbandes JAMA als einheitliches Verfahren

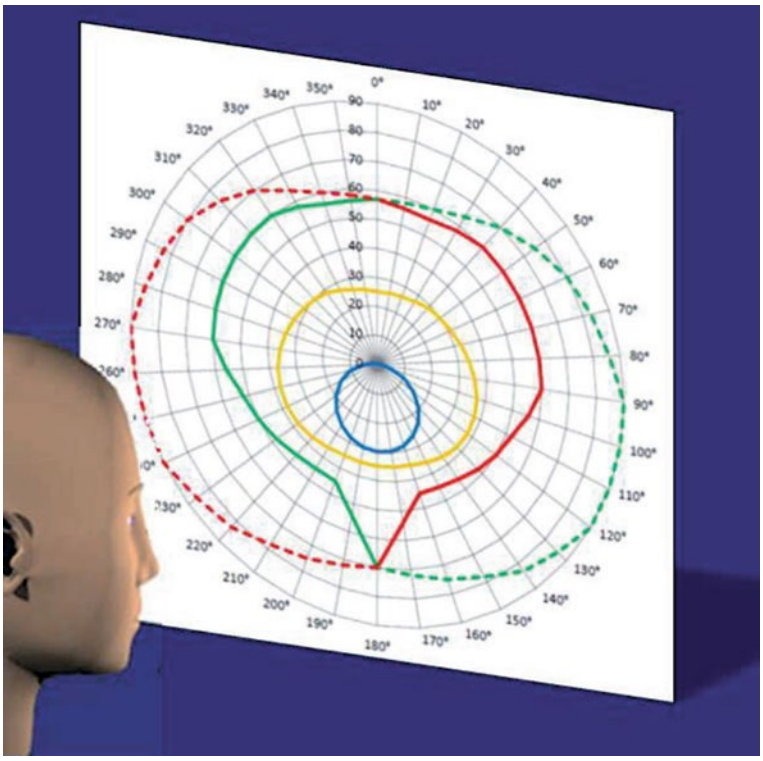


Abb. 7.54 Polardiagramm der räumlichen Sehfelder des menschlichen Gesichtsfelds monokular: linkes Auge (rot)/ rechtes Auge (grün), Gesichtsfeld binokular: durchgezogene rot-grüne Linien, Gesichtsfeld ambinokular: gestrichelte Linien (nach Schober 1970 bzw. Flügel et al. 1986), optimales (blau) und maximales (gelb) Blickfeld (nach Lange 2008) (aus Remlinger 2013)

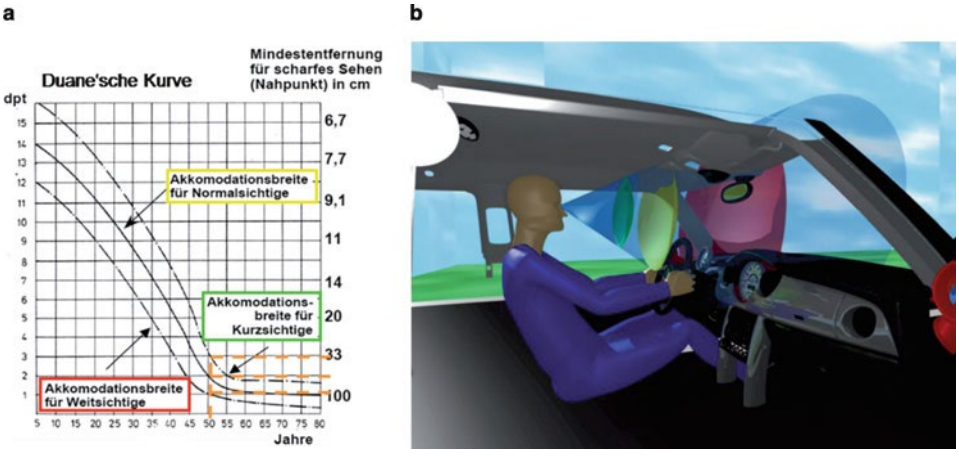


Abb. 7.55 Mindestsehentfernungen im Fahrzeug: **a** altersbedingter Akkommodationsverlust, **b** Distanzen im Fahrzeug für 50-jährigen mittelgroßen Fahrer (aus Remlinger 2013)

abgestimmt. Die Vorgehensweise harmoniert gut mit den Methoden französischer und japanischer Hersteller. Es wurde als gemeinsamer Herstellervorschlag für die Ermittlung der Sichtverhältnisse im Rahmen eines neuen Testverfahrens der unabhängigen Vereinigung Euro-NCAP für die Aktive Sicherheit von Fahrzeugen eingebracht. Diese Initiative zum Test der Aktiven Sicherheit wurde von Euro-NCAP bisher jedoch nicht umgesetzt."

Sichtverdeckungen dürfen aber nicht nur statisch beurteilt werden, sondern haben eine ganz gefährliche dynamische Komponente. Zaindl (2009)

Abb. 7.56 Parametrisch einstellbare Verkehrssituation mit Verkehrsteilnehmern und Objekten zur Sichtanalyse in Verbindung mit einer gegebenen 3-D-CAD-Geometrie (aus Remlinger 2013)

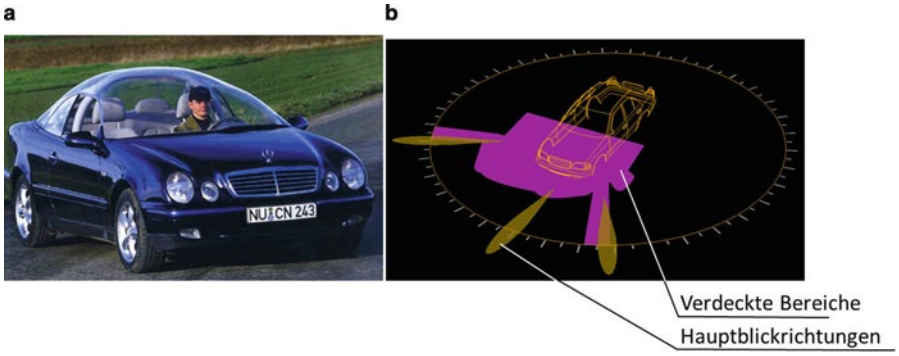


Abb. 7.57 Scholly's „Glaskuppelauto" (**a**) sowie **b** durch die A-Säule verdeckte Bereiche und Hauptblickrichtungen

Abb. 7.58 Blick aus der Fahrerposition in einem modernen Pkw in eine Einmündung

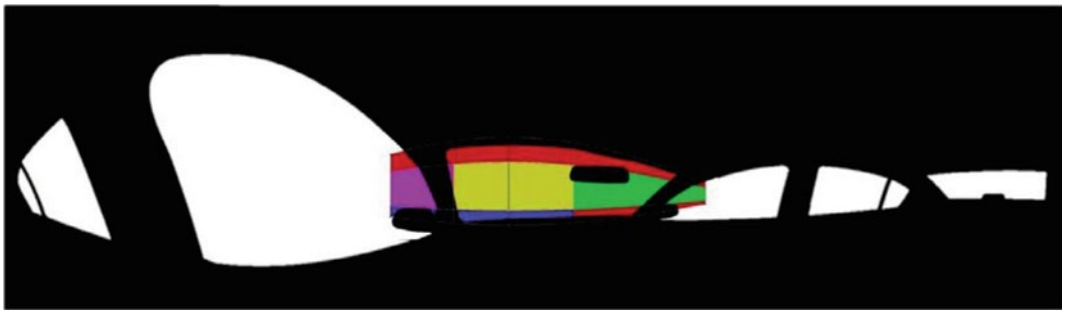


Abb. 7.59 Projektion der Sichtbereiche des Fahrers überlagert mit dem Bewertungszonen des Daimler-Scholly-Verfahren (aus Remlinger 2013)

führte Simulatorexperimente durch, bei denen durch die kontinuierliche Verfolgung der Augenposition des Fahrers die querenden Fahrzeuge so gesteuert wurden, dass sie sich im Sichtschatten der linken bzw. rechten A-Säule befanden. Diese Fahrzeuge blieben unentdeckt, selbst dann, wenn sie sich leicht versetzt zum Sichtschatten der A-Säule befanden, sich aber gegenüber diesem nicht bewegten. Dieses in der Schiffs- und Flugzeugtechnik als „stehende Peilung" bekannte Phänomen kann Ursache für viele Kreuzungsunfälle sein, wenn man bedenkt, dass das innere Bild des Fahrers von der Außenwelt nur durch einen kurzen Blick entsteht, der womöglich gerade in dem jeweiligen Augenblick nicht das querende Fahrzeug erfasst hat.

Remlinger (2013) hat die Sichtbehinderung durch die A-Säule auf der Grundlage des Vorausschauwinkels, der sich mit der im Allgemeinen vorkommenden Vorausschauzeit von 2 s bestimmen lässt, in Abhängigkeit von Querbeschleunigung und Geschwindigkeit berechnet und hierfür ein Diagramm entwickelt, das für die sicherheitsgerechte Gestaltung von Fahrkabinen von großem Wert ist (Abb. 7.60)[19]. Es zeigen sich dabei einige schwerwiegende grundsätzliche Probleme:

- die Verdeckungswahrscheinlichkeit nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit zu,
- sie ist für größere weiter hinten sitzende Personen problematischer, obwohl für kleine Personen der prozentuale Verdeckungsbereich größer ist; d. h. kleinere Fahrer haben mit größeren Verdeckungsbereichen zu kämpfen, während größere häufiger mit den dynamischen Verdeckungseffekten konfrontiert werden.
- Sportliche Fahrweise mit höheren Querbeschleunigungen – interessanterweise gerade im niedrigen Geschwindigkeitsbereich – vergrößert die Verdeckungsgefahr.

Als Konsequenz aus diesen Überlegungen stellte Remlinger die Frage, ob die heute aus modischen und aerodynamischen Gründen immer flacher werdenden und im Fahrzeug weiter vorne wurzelnden A-Säulen aus sicherheitstechnischen Gründen tragbar sind und ob nicht unter den heutigen Möglichkeiten der Glastechnik eine Rückbesinnung zu der Panoramascheibe mit steilerer und weiter hinten wurzelnden A-Säule überlegenswert wäre.

19 Die in Abb. 7.60 eingezeichneten Grenzlinien für großer Mann und kleine Frau müssten gegebenenfalls für das jeweils betrachtete Fahrzeug nach den Angaben von Remlinger eigens berechnet werden, dürften aber bei den gegenwärtigen Fahrzeugdesigns nicht wesentlich von den hier gezeigten abweichen.

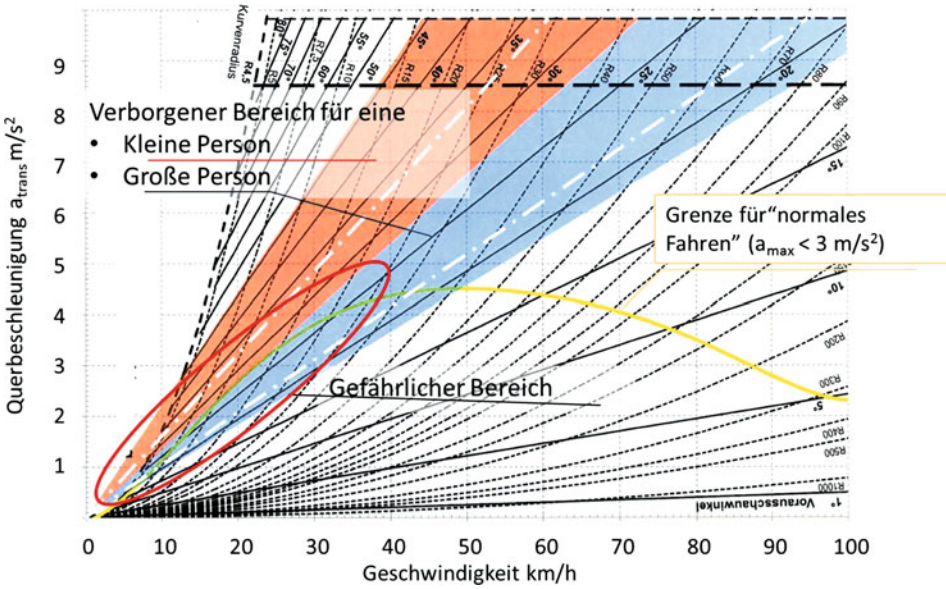


Abb. 7.60 Voraussichtwinkel von 2 s in einer Linkskurve als Funktion von Kurvenradius, Geschwindigkeit v und Querbeschleunigung a_{trans}. Unterhalb der gelben Linie befindet sich der Bereich normalen Fahrens mit $a_{trans, max} < 3$ m/s² (die eingezeichneten Grenzlinien für kleine Frau und großen Mann gelten streng genommen nur für einen 6er BMW [E64]; aus Remlinger 2013)

7.3.1.2 Sicht nach hinten

Es existieren praktisch keine Vorschriften, welche die direkte Sicht nach hinten belangen. Alle verfügbaren Normen und Gesetzesvorgaben beziehen sich nur auf die Bereiche, die durch die Rückspiegel erfasst werden müssen. Damit bestehen für den Fahrzeughersteller keine unmittelbaren Vorgaben, die sich beispielsweise auf schwierige Fahrmanöver, wie das Einfädeln in eine Straße mit sich schräg von hinten näherndem Verkehr oder das Rückwärtsfahren beziehen (Hudelmaier 2003). Diese mangelnde Vorschrift wird von dem aktuellen Fahrzeugdesign teilweise extrem ausgenutzt, wie ein Vergleich der direkten Sicht nach hinten von Fahrzeugen unterschiedlicher Designgeneration zeigt (Abb. 7.61). Auch das bereits erwähnte Schattenwurfverfahren bzw. die berechneten Sichtbereiche auf der Basis einer konischen Projektion (Abb. 7.59) und ähnliche Verfahren liefern keine hinreichende realistische Information für den Blick nach hinten. Der Hauptmangel bei allen Verfahren ist darin zu sehen, dass die gesamte Rundumsicht aus dem Fahrzeug von einem statisch festen Punkt aus betrachtet wird. In der Realität kommt es aber durch Kopf- und auch Rumpfbewegungen zu großen Verschiebungen der Augenpunktlage beispielsweise bei Blickrichtungen durch die Heckscheibe zum Rückwärtsfahren. Die in der Simulationssoftware von RAMSIS enthaltene Funktion *„move eye and head"* enthält eine auf der Basis von Probanden-Tests gewonnene Simulation menschlichen Verhaltens (Seidl 1993; Göhler 1999), welche es ermöglicht, ausgehend von der normalen Fahrerhaltung ein Blickziel vorzugeben und dadurch automatisch eine entsprechende Kopf- und Körperbewegung zu erzeugen. Hudelmaier (2003) hat in seinen Versuchen herausgefunden, dass ab einem Blickwinkel von 110° gegenüber dem Blick in Fahrtrichtung sowohl in der Realität als auch in der RAMSIS-Simulation die Rückenkontur soweit von der Sitzlehnenkontur abweicht, dass dies als Umschaltpunkt für die Anwendung eines speziellen Rückwärtsfahrthaltungsmodells dient. Er kann zeigen, dass damit sehr realistische Haltungsprognosen für diese spezielle Anwendung gewonnen werden (Abb. 7.62).

In Abb. 7.63 ist die auf der Basis der Haltungsdaten von Göhler (1999) berechnete direkte Sicht nach hinten durch die Heckscheibe eines Mercedes der E-Klasse (W212) dargestellt. Zur Beurteilung

Abb. 7.61 Blick schräg nach hinten (Mitte) und nach rückwärts (rechts) bei drei Fahrzeugen unterschiedlicher Designgenerationen. **a** BMW 326 Baujahr 1938, **b** BMW 2000 Baujahr 1968, **c** BMW 520i Baujahr 2002

Abb. 7.62 Errechnete Haltung beim Blick nachrückwärts mittels des Move-eye-and-Tools (links, aus Bothe 2010) und dem RAMSIS-Rückwärtsfahrhaltungsmodell von Hudelmaier (2003; rechts)

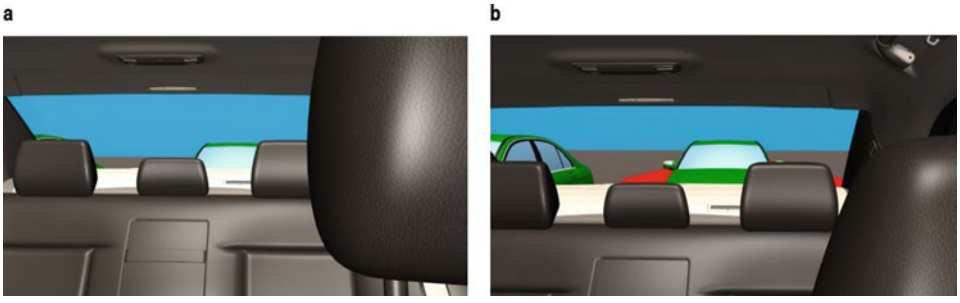


Abb. 7.63 Direkte Sicht nach hinten aus dem Mittenauge **a** der kleinen Frau (FSMM), **b** des großen Mannes (MTMM) (aus Bothe 2010)

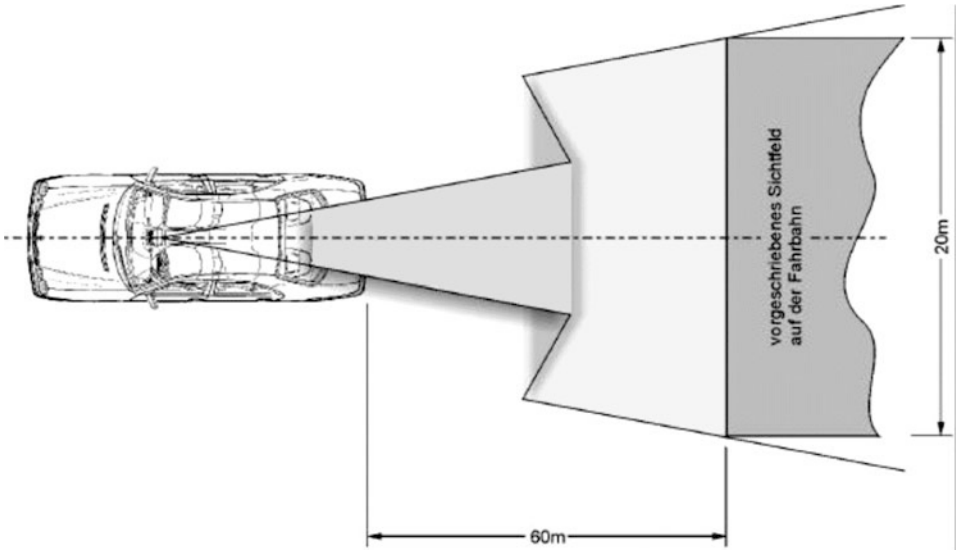


Abb. 7.64 Vorgeschriebenes Sichtfeld für inneren Rückspiegel nach EWG 71/127 bzw. ECE-R46 (nicht maßstäblich; aus Hudelmaier 2003)

sind in der Umgebung des virtuellen Fahrzeugs Referenzfahrzeuge aufgestellt (siehe auch Abb. 7.56). Es ist deutlich zu erkennen, dass bedingt durch die rechte C-Säule sowie durch die rückwärtigen Kopfstützen die Sicht für die kleine Frau deutlich schlechter ist als für den großen Mann. In ähnlicher Weise können natürlich für die verschiedenen Auslegungsmanikins auch Blicke aus dem Seitenfenstern links und rechts sowie schräg nach hinten simuliert werden, so dass schon in der Phase der CAD-Entwicklung eines Fahrzeugs Unzulänglichkeiten entdeckt und ggf. noch korrigiert werden können.

7.3.2 Indirekte Sicht

Unter der indirekten Sicht versteht man alle über Spiegel aufgenommene Information aus der Außenwelt. Durch die EWG-Richtlinie 71/127 bzw. ECE-R46 werden Gestaltungsregeln zusammengefasst, welche die über den Rückspiegel mindestens einsehbaren Fahrbereiche festlegen. In Abb. 7.64 und 7.65 ist eine Zusammenfassung dieser Vorschriften wiedergegeben. Der in Abb. 7.64 dargestellte Sichtbereich über den Innenspiegel ist jedoch nur dann zu gewährleisten, wenn die Bauart des Fahrzeugs einen innen angebrachten Spiegel als sinnvoll erscheinen lässt. Nach den Blickuntersuchungen von Hudelmaier (2003) wird der rückwärtige Verkehr während der Fahrt aber eher über den Innenspiegel als über den Außenspiegel beobachtet. Man kann dies mit der dafür notwendigen geringeren Kopfbewegung zwischen dem Blick geradeaus und dem Blick in den Innenspiegel in Relation zu den entsprechenden Blicken in die Außenspiegel erklären. Allerdings ist dabei zu berücksichtigen, dass eine auf der Grundlage der Vorschriften realisierte Sicht über den Rückspiegel keineswegs ausreichend ist, um beispielsweise Spurwechselmanöver sicher durchzuführen. Der „blinde" Bereich wäre dafür viel zu groß. Aber auch die von den Außenspiegeln noch freigelassenen toten Winkel können Anlass für gefährliche Fahrmanöver sein; deshalb wird für einen Spurwechsel der Schulterblick dringend empfohlen. Technische Abhilfe schaffen Assistenzsysteme (siehe ▶ Kap. 9).

Für die Auslegung der Rückspiegel ist es deshalb sinnvoll, ein (statisches) Verkehrsszenario zu definieren, das die nach den EWG-Vorschriften verbleibenden toten Winkel mit Fahrzeugen besetzt. Dieses Scenario wird dann über die Spiegelfunktion der RAMSIS-Software aus dem Blickwinkel der RAMSIS-Auslegungsmanikins beobachtet (Abb. 7.66).

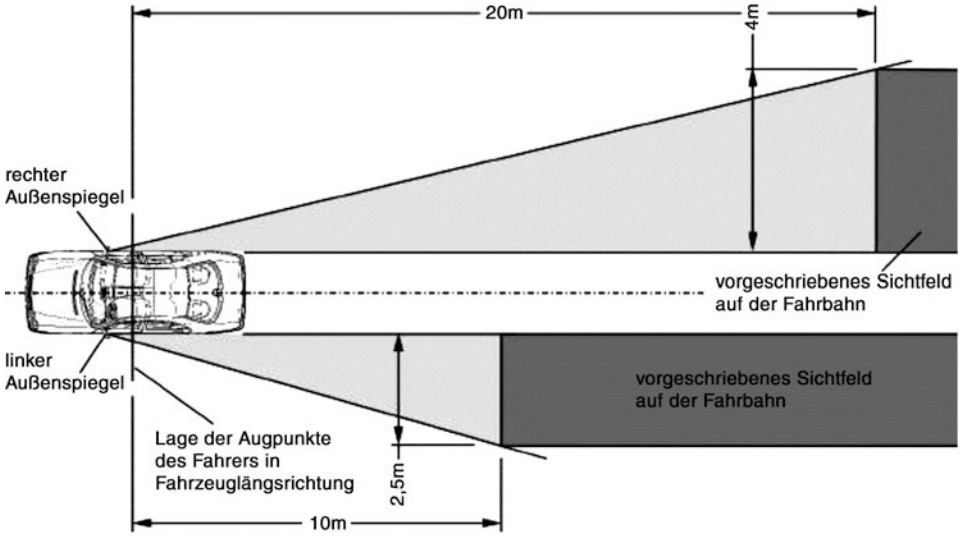


Abb. 7.65 Vorgeschriebene Sichtfelder für linken und rechten Außenspiegel nach EWG 71/127 bzw. ECE-R46 für Fahrzeuge der Klasse M1 und N1 bei einer Masse bis zu 2 t (nicht maßstäblich; aus Hudelmaier 2003); für Fahrzeuge der Klasse und bei einer Fahrzeugmasse über 2 t gelten davon leicht abweichende Vorschriften

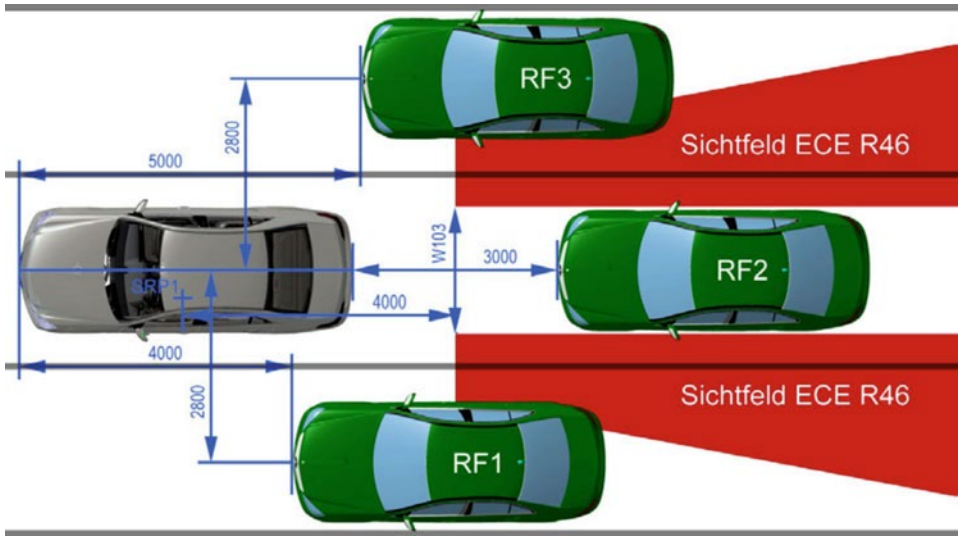


Abb. 7.66 Parametrisch eingestellte Verkehrssituation zur Beurteilung der Rückspiegelsicht (aus Bothe 2010)

Auch für diese Berechnung wird jeweils die Move-eye-and-head-Funktion verwendet, da ein Blick in den Rückspiegel immer mit einer kombinierten Augen-Kopf-Bewegung verbunden ist.

Die Berechnung erfolgt aus der aktuellen Augenpunktlage. Es entsteht dadurch zunächst eine Sichtpyramide, die einerseits die Einstellung des Spiegels erlaubt und andererseits unmittelbar erkennen lässt, wenn sich im Strahlengang die Spiegelsicht behindernde Objekte befinden (Abb. 7.67). Meist werden die Außenspiegel zur besseren Orientierung so eingestellt, dass die Kontur des eigenen Fahrzeugs am Rande noch erkennbar ist. Da die Software auch die Spiegelungen an Freiformflächen erlaubt, kann mit dieser Funktion zusätzlich untersucht werden, inwieweit

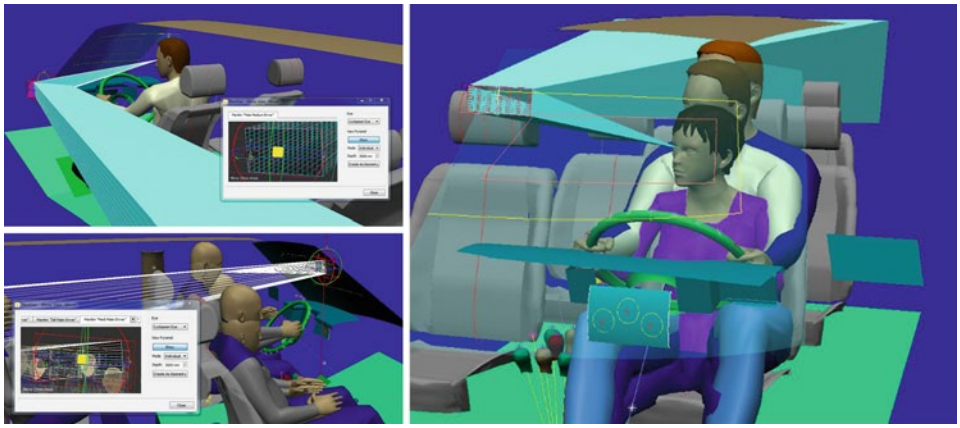


Abb. 7.67 RAMSIS-Bedienoberfläche zur Einstellung der dynamischen Spiegelpyramide (Human Solutions 2014)

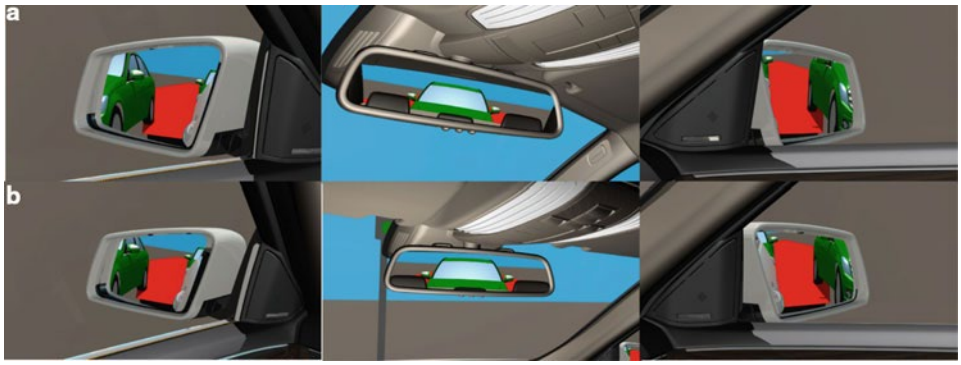


Abb. 7.68 Berechnete Spiegelsicht auf das Verkehrsscenario der Abb. 7.66 für die kleine Frau (FSMM; **a**) und den großen Mann (MTMM; **b** Mercedes E-Klasse, W 212; aus Bothe 2010)

durch asphärisch gewölbte Spiegel eine Reduzierung der toten Winkel erreicht werden kann. Aus der Position der Spiegel kann unter Verwendung der in Abb. 7.53 beschriebenen Funktion auch die Zeit abgeschätzt werden, die benötigt wird, um den Blick auf den entsprechenden Spiegel zu wenden. Zu dieser Zuwendungszeit addiert sich dann noch die Zeit, die notwendig ist, um die gesehene Information zu erfassen (im Mittel im Bereich von 0,8 Sekunden; siehe Abb. 3.55). Abbildungen 7.68 zeigt, dass in dem gewählten Beispiel die Spiegelsicht für große und kleine Personen etwa gleichwertig ist, wenngleich auch zu erkennen ist, dass die kleine Frau wegen ihrer näheren Position an den Spiegeln einen größeren Winkelbereich überblickt als der große Mann.

7.3.3 Sicht auf Bedien- und Anzeigekomponenten

Die Notwendigkeit einer Sicherstellung von uneingeschränkter Sicht auf Anzeigen ist trivial. Aber auch die Sicht auf Stellteile ist notwendig, denn jede Betätigung – von wenigen Ausnahmen abgesehen (z. B. Betätigung des Blinkerhebels, des Lenkstockhebels zum Auf- und Abblenden, des Getriebeschalthebels) – ist mit einer Blickzuwendung verbunden (Arlt und Bubb 1999). Die Berechnung der Sicht auf Bedien- und Anzeigekomponenten kann im Prinzip mit den gleichen Tools erfolgen wie die für die Gestaltung und Beurteilung der direkten und indirekten Sicht verwendeten. Eine wesentlich dabei zu beantwortende Frage ist die Verdeckung der

Abb. 7.69 Analyse des Sichtschatten des Lenkrades für die Sicht auf das Kombiinstrument. Darstellung der monokularen und binokularen Sichtgrenzen auf der Ziffernblattebene (sog. „Lenkradbanane", Remlinger 2013)

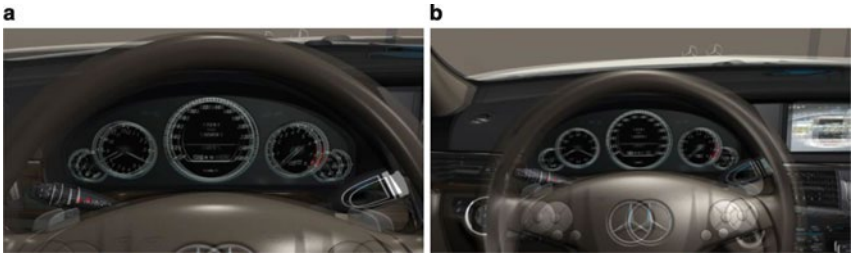


Abb. 7.70 Überlagerungen der berechneten Bilder des Blicks aus dem linken und rechten Auge auf das Instrumentenkombi für **a** kleine Frau (FSMM), **b** großer Mann (MTMM; Mercedes E-Klasse, W 212) (aus Bothe 2010)

Sicht speziell durch das Lenkrad, aber auch Lenkstockhebel, Schalthebel, befüllte Getränkehalter u. ä. Für RAMSIS-kognitiv ist dafür eine spezielle Funktion entwickelt worden. Ausgehend von dem Fahrerauge werden Sichtstrahlen auf die betreffende Geometrie gezogen. Die Strahlen, die auf ein schattengebendes Objekt treffen, werden von diesem begrenzt, alle direkt auf die Hintergrundgeometrie treffenden Sichtstrahlen werden erst dort limitiert. Die Ränder der Schattengrenzen können dann explizit hervorgehoben werden (Abb. 7.69, Remlinger 2013). Es empfiehlt sich, solche Untersuchungen prinzipiell binokular durchzuführen, also für jedes Auge getrennt. Das hat besonders Bedeutung in Verbindung mit kleinen Lenkraddurchmessern. Abbildungen 7.70 zeigt ein Beispiel. Bei der Beurteilung ist darauf zu achten, dass Anzeigen, Stellteile und Beschriftungen auf Stellteilen zumindest aus einem Auge sichtbar bleiben müssen.

Um die notwendige Größe von Sehzeichen auf Anzeigen aber auch auf der Beschriftung von Bedienelementen beurteilen zu können, bietet RAMSIS-kognitiv die Möglichkeit, über einen definierten Sehstrahl auf die angeblickte Oberfläche einen Landoltring zu projizieren. Die Größe des Landoltrings ist parametrisierbar, um damit unterschiedliche Sehbedingungen zu berücksichtigen (siehe Abb. 7.71). Durch Vergleich des Landoltrings mit den dargestellten Beschriftungen kann die Sichtbarkeit abgeschätzt werden.

Häufig wird angenommen, man könne die nachlassende Sehschärfe im Alter (korrekt: nachlassende Fähigkeit des Auges auf unterschiedliche Sehentfernungen zu akkommodieren) durch größere Sehzeichen kompensieren. Das ist grundsätzlich falsch, denn die Unfähigkeit, auf die Nähe zu akkommodieren, führt immer zu einem optisch unscharfen Bild, das allerdings unter Umständen

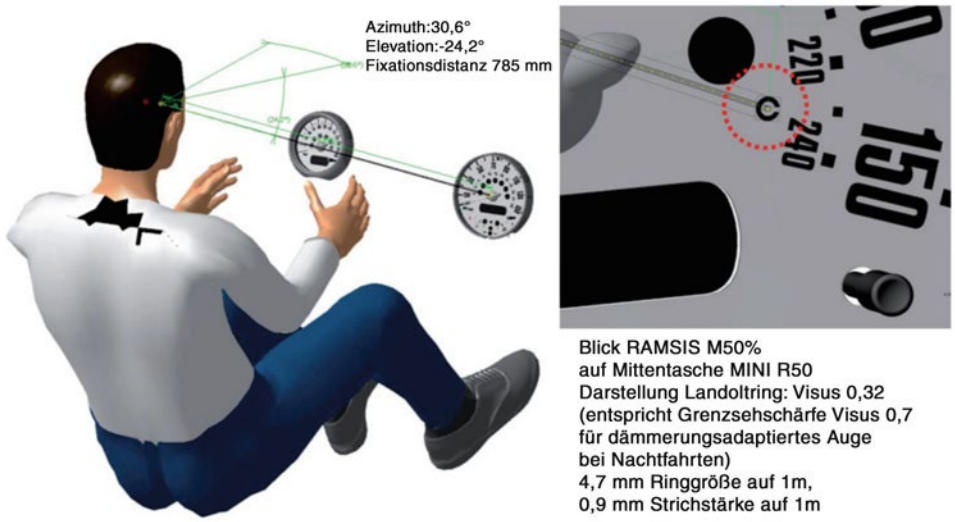


Abb. 7.71 Sehschärfeanalyse für Fahrzeuginstrumentierung und die Beschriftung von Bedienelementen (Remlinger 2013)

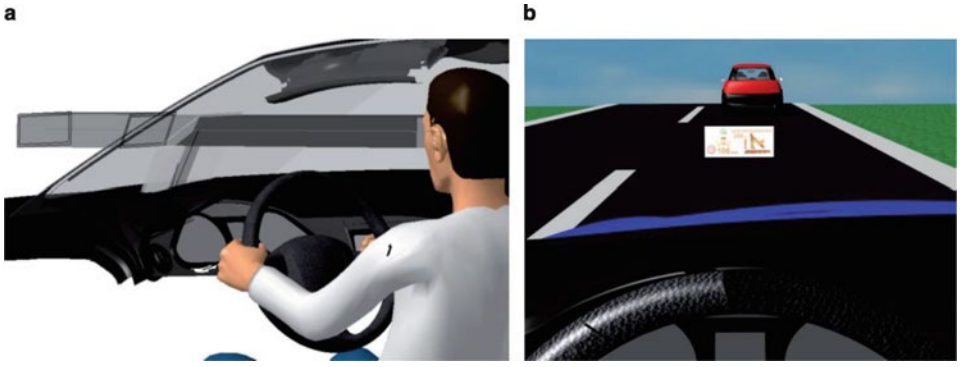


Abb. 7.72 Auslegung eines Head-Up-Displays (HUD), **a** Strahlengangsanalyse, **b** Bildposition aus der Fahrersicht

bei hinreichender Gewöhnung an diesen Zustand subjektiv gar nicht wahrgenommen wird. Nur durch die Nutzung einer Lesebrille bzw. einer Gleitsichtbrille kann dieses Manko partiell kompensiert werden (siehe hierzu Abb. 7.55). Ein Vorteil des Head-Up-Displays (HUD) gerade für den alterssichtigen Fahrer ist es, dass die virtuelle Entfernung der Darstellung zwischen 2 und 3 m liegt, einem Bereich, für den bei hinreichenden Beleuchtungsverhältnissen bereits keine Akkommodation mehr notwendig ist. Die Überlagerung der Instrumentensicht auf den Nahbereich der Straßenszene reduziert die Akkommodations- und Blickzuwendungszeiten für Fahrer aller Altersklassen.

Die Informationsdarstellung im HUD geschieht durch Spiegelung an der Windschutzscheibe. Das System Fahrer – Auge – Windschutzscheibe und HUD-Einheit bilden also ein optisches System. Die entsprechenden Elemente müssen nach den Gesetzen der optischen Strahlenphysik aufeinander abgestimmt werden. RAMSIS-kognitiv bietet dafür ein Werkzeug (Abb. 7.72). Durch Verkippen der HUD-Einheit bzw. des letzten Umlenkspiegels in der Einheit kann die HUD-Darstellung auf unterschiedliche Höhen des Fahrerauges eingestellt werden bzw. die Höhe des Bildes in der Fahrumgebung justiert werden. Da einerseits eine zu hohe Darstellung der HUD-Information vermieden werden muss, um eine Maskierung von wichtigem

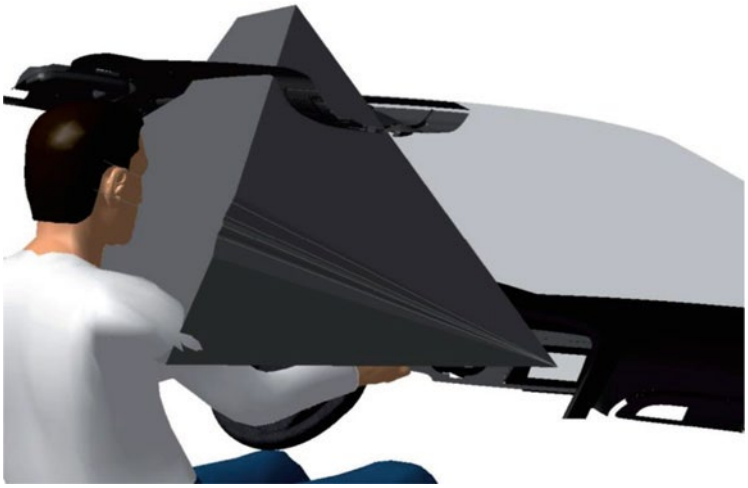


Abb. 7.73 Einsehbereich („Tulpe“) eines Punktes auf dem LCD im Fahrzeug (Halbseitendarstellung; Remlinger 2013)

Verkehrsgeschehen zu vermeiden, und andererseits unterschiedliche Augenpositionen berücksichtigt werden müssen, stellt das HUD-Tool in RAMSIS-kognitiv ein wichtiges Werkzeug dar, um diese komplexen Abhängigkeiten bereits in der Planung zu berücksichtigen.

Die Verwendung von Flüssigkristallbildschirmen (Liquid Crystal Displays, LCD) hat in den vergangenen Jahren eine hohe Verbreitung speziell für die Verwendung in Navigations- und Infotainment-Systemen erfahren. Mittlerweile werden LCDs auch für die flexible Gestaltung im Kombi-Instrument eingesetzt. Für das Display in Fahrzeugmitte (FIZ) sind sogar schon sog. Dual-View-Displays im Einsatz, die für die Fahrer- und Beifahrerperspektive unterschiedliche Bilddarstellungen ermöglichen. Um die hohen Kontrasteigenschaften auch unter den Bedingungen des im Allgemeinen hohen Helligkeitsniveaus im Fahrzeuginnenraum zu erfüllen, wurden für das LCD in der Fahrzeugnutzung spezielle technische Maßnahmen ergriffen, die bedingt durch die LCD-Physik allerdings nur unter eingeschränkten Blickwinkeln ihre Wirkung haben. Ein weiteres im Rahmen von RAMSIS-kognitiv verfügbares Tool dient dazu, die optischen Eigenschaften der Displays und deren Anordnung relativ zur Blickrichtung der Insassen möglichst gut aufeinander abzustimmen. Dazu werden die goniometrisch experimentell ermittelten optischen Grenzen des Displays als Parameter in die entsprechende Funktion eingegeben. Auf dieser Basis wird dann ein trichterförmiger geometrischer Körper (im Fachjargon als „Tulpe“ bezeichnet, Abb. 7.73) dargestellt, welcher das Raumsegment repräsentiert, aus dem ein Fahrzeuginsasse, ohne Einschränkungen zu erleben, auf das Display sehen kann. Die Übereinstimmung der Augenpunktlage der verschiedenen RAMSIS-Manikins mit der „Tulpe“ kann nun einfach überprüft werden.

Selbstverständlich ist es mit den zuvor beschriebenen Funktionen möglich, auch in umgekehrter Richtung ein Bild zu berechnen, das sich aus der jeweiligen Fahrer- bzw. Nutzerperspektive zeigt.

7.3.4 Reflexionen

7.3.4.1 Entstehung von Reflexionen

HUD, LCD-Anzeigen oder auch ganz einfache Anzeigeleuchten sind sog. „Selbstleuchter“. Die Leuchtdichte dieser Selbstleuchter muss immer höher sein als die Umgebungsleuchtdichte, damit die Information sicher erkannt werden kann (empfohlen 10 zu 1; siehe auch ▶ Abschn. 3.2.1.1). Bei zu hoher Umgebungsleuchtdichte kann womöglich der durch die Displaytechnik gegebene Kontrast nicht mehr ausreichen, damit sich die dargestellte Information vom Hintergrund hinreichend abhebt (siehe Abb. 3.15). Anders ist dies bei den meisten Gegenständen der Umgebung einschließlich konventioneller Analoganzeiger, welche als „Fremdleuchter“

bezeichnet werden. Hier wird das auffallende Licht von der Oberfläche reflektiert. Die in das Auge gelangenden Strahlen vermitteln den Eindruck von dem angeblickten Objekt. Die Reflexion des auffallenden Lichtes auf der Oberfläche kann dabei diffus, gerichtet oder gemischt diffus-gerichtet sein. Auch der gerichtete Anteil einer gemischt diffus-gerichteten Reflexion gehorcht immer dem Gesetz „Einfallswinkel = Ausfallswinkel", wobei die Winkel zur Normalen des jeweiligen Oberflächenpunktes gemessen werden. Der Anteil des gerichtet reflektierten an der Gesamtheit des reflektierten Lichtes bestimmt, ob ein Gegenstand „glänzend" oder „matt" erscheint.

Bedingt durch die Konzeption der Glasflächen des Greenhouse ist ein großer Teil des Fahrzeuginneren bei entsprechender Wetterlage der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt, die je nach Fahrzeugposition aus beliebigen Winkeln oberhalb des Horizonts in das Fahrzeug einfallen kann. Der Blick in die tief stehende Sonne verursacht Direktblendung (direct glare). Trifft die Sonne auf hochglänzende Oberflächen im Fahrzeuginnenraum, können durch die zumeist gewölbten Oberflächen auch Strahlen direkt gerichtet (s. o.) in das Fahrerauge reflektiert werden. Man spricht dann von Reflexblendung (reflected glare) durch Tageslichtspiegelung (daylight reflection). Oberflächen, die wesentlich zu dieser Blendungsgefahr beitragen können, sind hochglänzende Flächen der Innenausstattung wie Zierleisten oder Applikationsflächen und die Deckgläser der Anzeigen. Der direkte oder durch Reflexion verursachte starke Lichteinfall in das Auge führt zu einer daran angepassten Helligkeitsadaptation, wodurch dann aus dem Lichteinfall der Umgebung keine Information mehr gewonnen werden kann. Man spricht von *physiologischer Blendung* (disability glare). Selbst wenn die Leuchtdichte des ins Auge fallenden Lichtes noch nicht zu einer Adaptation führt, kann sich der Fahrer durch die hohe Differenz der Lichtreize auf der Netzhaut irritiert fühlen. Man bezeichnet dies als *psychologische Blendung* (discomfort glare). Die Verwendung von Hochglanzapplikationen und metallisch-blanken Oberflächen als Applikationen der Instrumententafel und der Tunnelkonsole sind als modernes und hochwertiges Accessoire gewünscht und finden als modisches Aufwertungselement vielfach Verbreitung im Fahrzeuginterieur. Geht die Verwendung über kleinteilige Akzentteile hinaus, ergibt sich bei größeren Bauteilen mit ebenen Hochglanzflächen eine Reflektionsfläche, die auch seitlich einfallendes Licht, sei es von einem strahlend hellen Sommerhimmel oder von einer direkten Sonneneinstrahlung, zum Augenpunkt des Fahrers lenken kann. Der rasche Wechsel von sehr hellen Lichtreflexen mit dunkel abgeschatteten Positionen führt zu einer „belebten" Wahrnehmung. Diese rasch wechselnden Lichtverhältnisse suggerieren dem Auge Bewegung und sind geeignet die Aufmerksamkeit vom umgebenden Verkehrsgeschehen zumindest kurzzeitig auf den Fahrzeuginnenraum abzulenken. Auch unterhalb der physiologischen Blendung kann die Intensität des an den Deckgläsern der Anzeigen reflektierten Lichtes zumindest partiell höher sein als die Intensität des an der Anzeigenoberfläche reflektierten Lichtes. Ein Ablesen der Information ist dann unmöglich. Helle Reflexe dieser Art müssen aber nicht unbedingt vom Sonnenlicht erzeugt werden, sondern können bei ungünstiger Positionierung der Deckgläser auch durch helle Kleidung verursacht werden („white shirt reflection"). Psychologische Blendungseffekte entstehen auch bei der Sicht durch die Frontscheibe, wenn eine Spiegelung sehr heller Gegenstände (zum Beispiel weißes Papier auf der Instrumententafel, helle Verkleidung der Armaturenbrettoberfläche) oder von Flächenabschnitten mit sehr kontrastreicher Farbgebung erfolgt. Auch bei Nacht können an der Frontscheibe störende Spiegelungen auftreten. Sie entstehen häufig durch hinterleuchtete Anzeigen wie Displays, Instrumente oder Schalterbeleuchtungen vornehmlich im Mittelkonsolenbereich. Dieses Phänomen wird mit dem Begriff *Nachtspiegelung* (night reflection) bezeichnet.

Die geschilderten vielfältigen Möglichkeiten des Entstehens von Reflexionen frühzeitig bereits auf der Basis der CAD-Daten zu entdecken und entsprechend zu vermeiden, ist eine aufwändige Angelegenheit, lohnt sich aber, da Blendungseffekte, die erst spät in dem Entwicklungsprozess entdeckt werden, meist nur unzureichenden abgewendet werden können. In RAMSIS-kognitiv ist deshalb eine Funktion enthalten, mit deren Hilfe der Verlauf von reflektierten Lichtstrahlen im Fahrzeuginnenraum geometrisch nachverfolgt und der mögliche Herkunftsort des reflektierten Lichtes festgestellt werden kann. Im Prinzip wird hierbei von dem jeweiligen Fahrerauge (bzw. dem Mittenauge) ausgehend ein

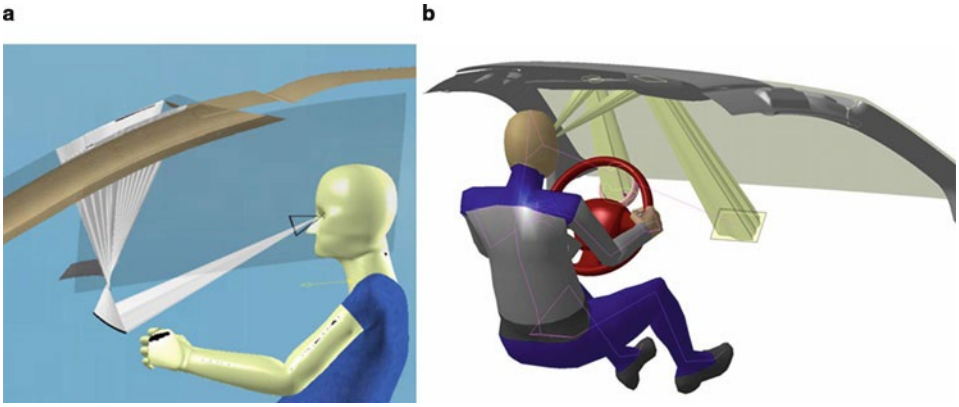


Abb. 7.74 Simulierter Reflexionsstrahlengang von Blendungseffekten **a** Tagesspiegelung von Sonnenlicht, **b** Nachtspiegelung beleuchteter Anzeigen in der Frontscheibe (aus Remlinger 2013)

Abb. 7.75 Berechnungen der Reflexion der Armaturenbrettoberfläche in der Windschutzscheibe für die kleine Frau (**a**, FSMM), den mittelgroßen, langbeinigen Mann (**b**, MMML) und den großen Mann (**c**, MTMM). Der Sichtkegel ist dabei jeweils auf das sog. A-Feld gerichtet (dunkelgrünes Rechteck), welches nach den verschiedenen Gesetzesvorgaben von jeder Spiegelung frei sein muss. In dem umgebenden B-Feld (blaues Rechteck) dürfen hingegen kleinere Reflexionen auftreten. Diese beiden Felder sind jeweils in die Bilder mit eingeblendet (aus Bothe 2010)

Strahlenbündel erzeugt, das auf die interessierende Oberfläche gerichtet ist und dort entsprechend den CAD-mäßig gespeicherten Reflexionseigenschaften reflektiert wird. Die konstruierte Berechnung zeigt den Strahlengang vom jeweiligen Augenpunkt über die reflektierende Fläche zu dem Bereich, wo sich eine blendende Lichtquelle befinden könnte. Durch diese geometrische Repräsentation des Lichtverlaufes werden mögliche Optionen zur Beseitigung dieses Blendungseffektes erkennbar (Abb. 7.74).

Auch diese Berechnungen müssen naturgemäß für unterschiedliche Augenpunktpositionen durchgeführt werden, welche durch die Auslegungsmanikins festgelegt sind. Mit dem Blickwinkel eines ausgewählten Augenpunktes ist es dann in Verbindung mit dem genutzten CAD-System möglich, das Reflexionsbild, das sich dem Fahrer bietet, zu berechnen und abzuschätzen, ob dies wirklich als störend einzustufen ist (Abb. 7.75).

Abbildung 7.76 zeigt die Berechnung der Reflexionen im zentralen Display für vier unterschiedliche Auslegungsmanikins. Es wird hier sichtbar, wie wichtig eine solche Berechnung für unterschiedliche Augenpositionen ist. Die scheinbar perfekte Situation für den mittleren Mann erweist sich für andere Personentypen als deutlich ungünstiger.

7.3.4.2 Abschirmung

Direkte Blendung durch Sonnenlicht ist eine der gefährlichsten Situationen, die durch Umgebungseinflüsse zu Stande kommen können. Während die Reflexionsblendung des Sonnenlichts an einer nassen Straßenoberfläche nur durch eine Polarisationssonnenbrille in den Griff zu bekommen ist[20], kann

20 Das reflektierte Licht ist prinzipiell parallel zur reflektierenden Oberfläche polarisiert, weswegen durch eine Polarisationsbrille mit Sperrung in dieser Richtung der größte Reflexionslichtanteil ausgefiltert werden kann.

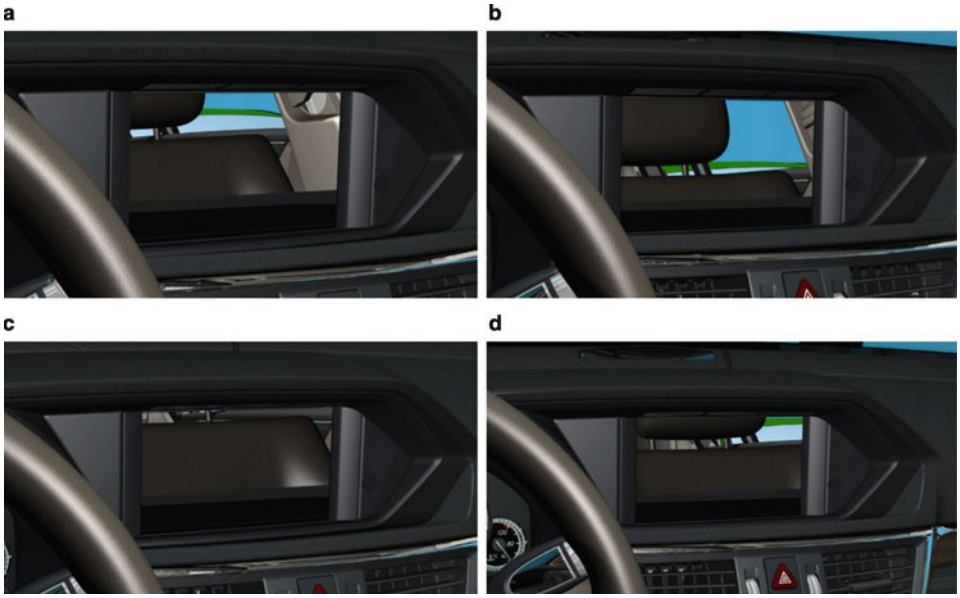


Abb. 7.76 Berechnungen der Reflexion im zentralen Display **a** kleine Frau (FSMM), **b** mittelgroßer langbeinigen Mann (MMML), **c** mittlerer Mann (MMMM), **d** großer Mann (MTMM; aus Bothe 2010)

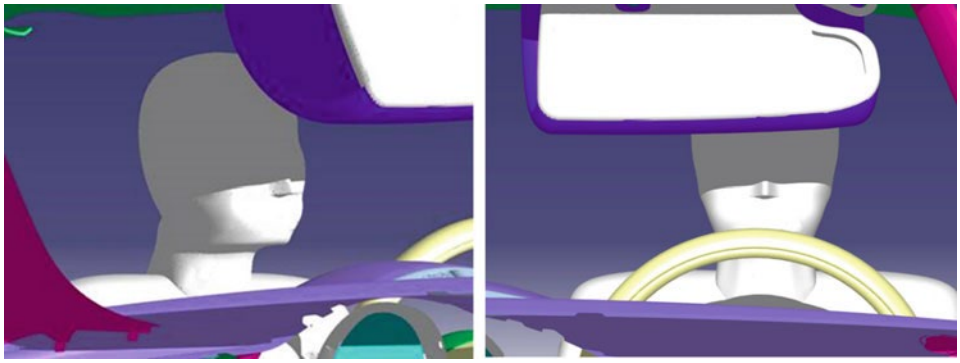


Abb. 7.77 Prinzipielle Wirkung der Sonnenblende

direkte Blendung durch Sonnenblenden bekämpft werden. Prinzipiell ist es Aufgabe der Sonnenblende, direkten Einfall von Sonnenlicht auf die Augen unter allen Umständen zu vermeiden, d. h. diese im Schattenbereich zu halten (Abb. 7.77). Das gilt sowohl für seitlichen wie für frontalen Lichteinfall. Diese Forderung kann nur durch eine hohe Beweglichkeit der Sonnenblende erreicht werden. Mithilfe der Auslegungsfamilie des genutzten Menschmodells ist für die unterschiedlichen Augenpunktlagen zu überprüfen, ob diese Forderung für alle möglichen Einstrahlrichtungen der Sonne gewährleistet ist.

Die höchste Anforderung diesbezüglich ergibt sich für die Situation, dass sich die aufgehende bzw. untergehende Sonne am Horizont im direkten Fluchtpunkt der befahrenen Straße befindet. Der untere Rand der maximal herunter geklappten Sonnenblende muss sich dann exakt in Augenpunkthöhe befinden. Die geringste Distanz zu der konstruktiven H-30-Lage ergibt sich also für die kleine langbeinige Frau (FSMS). Wenn die obere Kante der Sonnenblende keinen Lichtspalt zur Frontscheibe offenlässt, können Personen mit höherer Augenpunktlage durch entsprechende Schrägstellung der

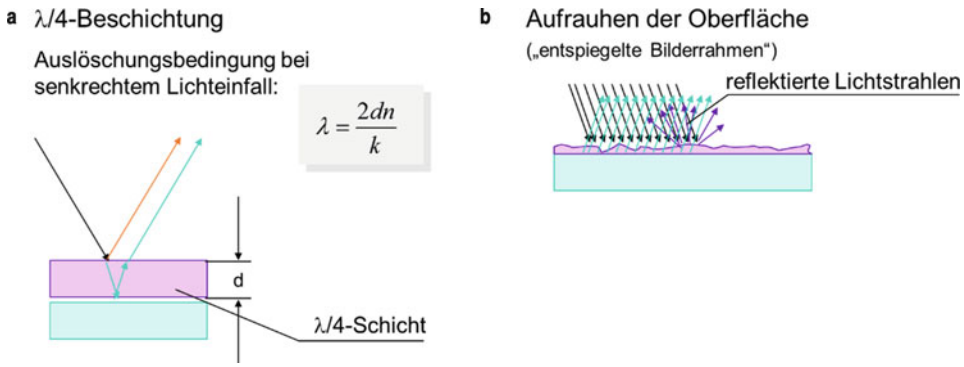


Abb. 7.78 Möglichkeiten der Reflexionsverminderung durch Oberflächenbehandlung (k = 1,2,3 usw.)

Sonnenblende immer eine günstige Position finden. Bei den heute üblichen stark geneigten Frontscheiben, bei denen die Dachrahmenlage womöglich eine kurze Distanz zu dem Fahrerkopf bedingt, ergeben sich ggf. Probleme beim Umklappen der Sonnenblende. Diese Probleme treten verstärkt auf, wenn die Sonnenblende zur Seite geklappt werden muss, um vor Lichteinfall aus dem Seitenfenster zu schützen. Durch diese Problematik ergeben sich komplexe geometrische Anforderungen, die nur mithilfe von korrekt positionierten Menschmodellen zufriedenstellend gelöst werden können.

Mithilfe der in Abb. 7.74 gezeigten Funktion können auch Abschattungen über den Instrumenten (Kombiinstrument und zentrales Display) so konzipiert werden, dass helles Licht, das durch die Scheiben fällt, oder von heller Kleidung der Insassen abgestrahlt wird, nicht in das Fahrerauge reflektiert wird. Auch hierfür ist die Berücksichtigung der Augenpunktlagen der Auslegungsfamilie notwendig (siehe auch Abb. 7.76). Eine Methode, solche Reflexionen wirkungsvoll zu vermeiden, besteht u. a. in einer auf die Hutzenlänge abgestimmten Schrägstellung des Deckglases für die Instrumente. Auch darauf abgestimmte konusförmige oder gewölbte Abdeckungen können bei richtiger Konzeption unerwünschte Reflexionen vermeiden. Neuerdings ist es leider wieder Mode geworden, auf solche einfachen, die geometrische Optik nutzenden Maßnahmen zu verzichten und stattdessen plane oder – unter dem Aspekt des Einfangens von Reflexionen noch schlechter – leicht konvexe Instrumentenabdeckungen zu verwenden. Um diesen Modeeffekt dennoch zu realisieren, taucht immer wieder die Frage auf, ob durch Nutzung des λ/4-Effektes Reflexionen vermieden werden können. In Abb. 7.78 links ist der Effekt der λ/4-Beschichtung für den Fall des senkrechten Lichteinfalls dargestellt[21]. Ein Auslöschen von reflektierten Lichtwellen ist demnach nur für *eine* Wellenlänge des Lichts möglich. Man wählt hierfür normalerweise die Wellenlänge, bei der das Sonnenlicht maximale Intensität zeigt (λ = 520 nm). Aus der Darstellung in Abb. 7.78 geht zudem hervor, dass dieser Effekt nur für *eine* Einblickrichtung Gültigkeit haben kann. Bei gegebener Einblickrichtung ergeben sich somit bei der Betrachtung einer λ/4-beschichteten Oberfläche unter dem Einfluss einfallenden weißen Lichtes regenbogenfarbige Eindrücke, die noch dazu in Abhängigkeit von der Augenposition variieren. Da sich die oben beschriebenen Methoden der linearen Optik zur Vermeidung von Reflexionen im Zusammenhang mit der Touchscreen-Technologie nicht verwirklichen lassen, kommt gerade hier der Wunsch auf, durch Anwendung der λ/4-Beschichtung dieses Problem zu lösen. Durch die dieser Technologie immanente Notwendigkeit, die Bildschirmoberfläche mit dem Finger zu berühren, wird dabei immer eine Fettschicht übertragen, welche den ganzen λ/4-Effekt zunichtemacht.

Als Alternative zur Reduktion von unerwünschten Reflexionen bietet sich deshalb eine aufgeraute Oberfläche (mattglasartig) an, welche das auffallende Licht diffus reflektiert (Abb. 7.78b).

21 Selbstverständlich lässt sich die λ/4-Beschichtung auch für einen anderen Einfallswinkel des Lichtes korrekt berechnen.

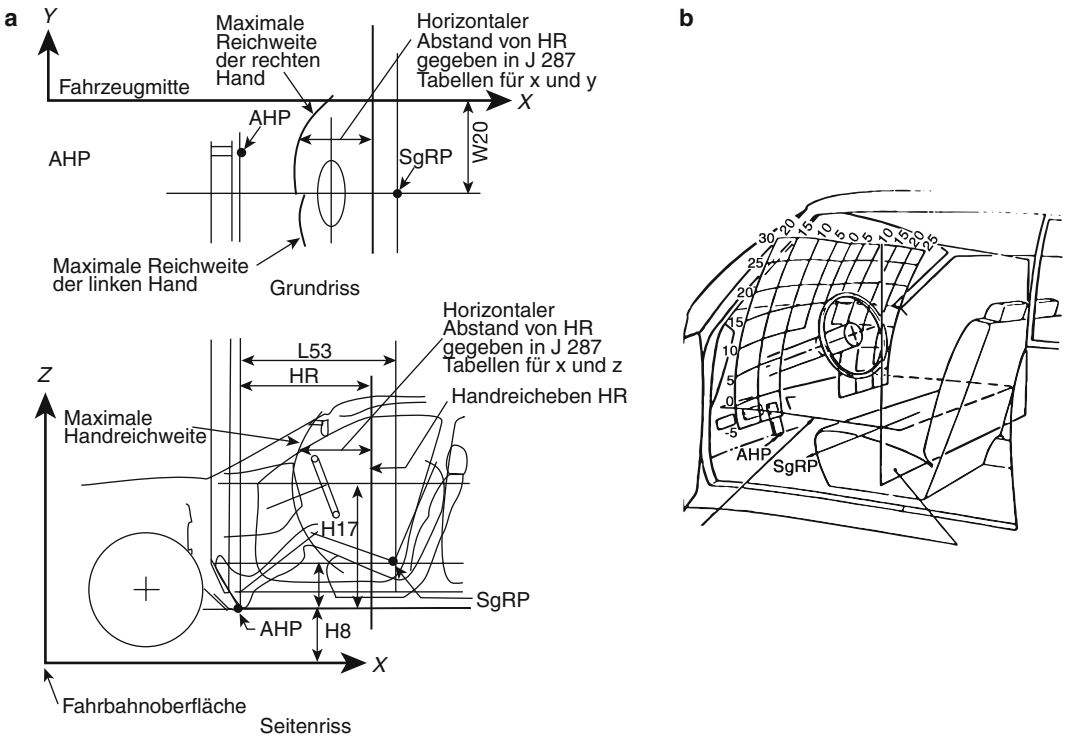


Abb. 7.79 **a** Grund- und Aufriss der Fahrzeugkonstellation zur Bestimmung der Bezugsebene im Abstand HR nach SAE J287, **b** Veranschaulichung der darauf fußenden Erreichbarkeitsflächen

Abgesehen davon, dass dadurch die Schärfe der dargestellten Sehzeichen reduziert wird, ist ein hoher gerichteter Reflexionsanteil wegen der notwendigerweise planen Seite, welche die Lumineszenzschicht trägt, nicht zu vermeiden. So stellt gerade die Verwendung von Touchscreens im Kraftfahrzeug unter dem Aspekt der Reflexionsvermeidung hohe Anforderungen an eine korrekte Positionierung.

7.4 Bedien- und Anzeigekomponenten

7.4.1 Bestimmung der Erreichbarkeitsflächen nach SAE

Neben der Sichtbarkeit spielt natürlich vor allem bei den Bedienkomponenten die Erreichbarkeit eine dominante Rolle. Auch zu den Fragen der Erreichbarkeit gibt es Empfehlungen im Rahmen von SAE J287. Dort ist ein Regelwerk veröffentlicht, das auf experimentellen Studien von Hammond und Roe (1972) sowie Hammond et al. (1975) zur maximalen und bevorzugten Erreichbarkeit basiert. Nach diesem Regelwerk wird die horizontale Distanz von einer vertikalen Bezugsebene bestimmt, welche selbst durch die Distanz HR zum Fersenbezugspunkt AHP festgelegt ist:

$$HR = 786 - 99 \cdot G \tag{7.6}$$

G ist dabei ein allgemeiner Package-Faktor, welcher sich berechnet nach:

$$G = 0{,}00327 \cdot (H30) + 0{,}00285 \cdot (H17) - 3{,}21 \tag{7.7}$$

Dabei ist H17 die Höhe der Lenkradmitte über dem Fersenpunkt (siehe Abb. 7.79). Der Package-Faktor variiert von −1,3 für das Package eines Sport-

Abb. 7.80 Funktionale Greifräume im Fahrzeugcockpit

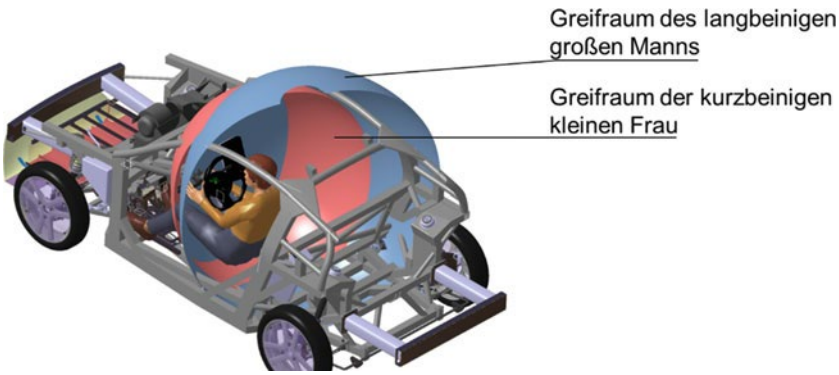


Abb. 7.81 Überlagerung des Greifraums der kurzbeinigen kleinen Frau (FSMS; rot) und des langbeinigen großen Mannes (MTML; blau)

wagens bis +1,3 für das eines schweren Lastwagens. Falls die so errechnete Distanz HR größer ist als die Distanz L53, wird die Bezugspunktebene in den 95-Perzentil-Sitzbezugspunkt SgRP gelegt. In Abhängigkeit von den Variablen „vom Fahrer genutztes Rückhaltesystem" (nur Bauchgurt, Bauch und Schultergurt), „G-Faktor" und „männlich-zu-weiblich-Anteil" können in Tabellen die Koordinaten des entsprechenden Greifraums abgelesen werden.

Dabei werden unterschiedliche Greifräume jeweils für die linke und die rechte Hand ausgegeben. Ein Beispiel dafür findet sich in Abb. 7.79.

7.4.2 Funktionale Greifräume

Gerade in der Kombination von CAD System mit der Anwendung von Menschmodellen ist man aber heute in der Lage, über die SAE-Empfehlungen hinaus sehr viel präziser die Fahrumgebung zu gestalten. Man definiert dafür den sog. funktionalen, von der notwendigen auszuführenden Funktion abhängigen Greifraum. In Verbindung mit der Anwendung im Kraftfahrzeug kommen dabei im Wesentlichen der Kontaktgriff (Drücken eines Buttons), der Zufassungsgriff (häufig definiert als Dreifingergriff, mit dem ein entsprechendes Stellteil gezogen oder gedreht wird) und der Umfassungsgriff (zur Übertragung größerer Kräfte) infrage (Abb. 7.80, siehe auch Abb. 6.29).

Die so definierten Greifräume müssen nun für die verschiedenen Auslegungsmanikins miteinander überlagert werden (meist genügt es, den Greifraum der kurzbeinigen kleinen Frau und des langbeinigen großen Mannes zu betrachten; siehe Abb. 7.81). Die jeweils dem Fahrersitz am nächsten liegende Fläche ist dann für die weitere Auslegung von Bedeutung, diese Flächen müssen allerdings teilweise noch eine Modifikation erfahren, da der Bewegungsbereich links und rechts neben dem Fahrersitz kurz vor oder gar hinter der Sitzlehne durch weitere anatomische Bedingungen, die durch das Menschmodell berücksichtigt werden können, zusätzlich eingeschränkt ist.

Die so definierten Flächen reichen in vielen Fällen nicht aus, um die in einem modernen Kraftfahr-

Tab. 7.9 Prioritäteneinstufung von Bedienelementen nach dem Kriterium „Erreichbarkeit"

Priorität I	Priorität II	Priorität III
– Fahrtrichtungsanzeiger – Abblendlicht/Fernlicht/Lichthupe – Hupe – Scheibenwischerbetätigung – Sonnenblende – Schalter für Assistenzsysteme (Tempomat, Speedlimiter, ACC, Spurverlassenswarner/halter) – Schalthebel – Außenspiegelverstellung – Sitzverstellung	– Warnblinkanlage – Feststellbremse – Hauptlichtschalter – Nebellampen vorne/hinten – Heizbare Heckscheibe – Instrumentenbeleuchtung – Klimaanlage – Radio: Lautstärke, Senderwahl – Seitenfenster – Aschenbecher/Zigarrenanzünder Schiebedach – Spotlight (Fahrer/Beifahrer)	– Zündung, Startknopf – Handschuhfach – Getränkehalter – Ablagenfächer in Seitentüren/in Mittenkonsole – Haubenentriegelung – Innenbeleuchtung

7

zeug zu verbauenden Bedienelemente und Einrichtungsgegenstände unterzubringen. Es ist deshalb sinnvoll, zusätzlich Greifräume unterschiedlicher Priorität zu definieren, z. B.:

- *Priorität I:* ohne Vorverlagerung der Schultergelenkpunkte mit Drei-Finger-Griff erreichbar.
- *Priorität II:* mit Vorverlagerung des jeweiligen Schultergelenkpunktes mit Drei-Finger-Griff erreichbar (Oberkörper bleibt in Ruhestellung).
- *Priorität III:* Oberkörperverlagerung ohne Begrenzung zulässig.

Entsprechend ihrem Bedeutungsgehalt für die Fahrzeugführung sind die einzelnen Bedienteile den Prioritätsklassen zugeordnet (Beispiele zeigt Tab. 7.9).

Die Berücksichtigung der genannten unterschiedlich definierten Greifräume kann sehr unübersichtlich werden. Es ist deshalb sinnvoll, nach der Überlagerung der genannten Flächen die Bereiche selbst wieder in Zonen einzuteilen (in vielen Fällen genügt eine „Ampelbewertung": grün = gut erreichbar; gelb = erreichbar; rot = schlecht erreichbar; alles, was außerhalb der so definierten Felder ist, ist „nicht erreichbar"). Diese Zonen können im nächsten Schritt mit dem Interieurflächen des jeweiligen Fahrzeugs geschnitten werden. Auf diese Weise entstehen auf den Interieurflächen bewertete Zonen, siehe Abb. 7.82.

7.4.3 Berücksichtigung spezieller Bedienanforderungen

Bei der Berücksichtigung der dargestellten Flächen ist neben der einfachen Erreichbarkeit auch die Art der Bedienung zu berücksichtigen. Dies muss gegebenenfalls durch eine entsprechende Animation des Manikins aus der Layoutfamilie überprüft werden. Ein bekanntes Beispiel dafür stellt die Betätigung der Feststellbremse (Handbremse) dar. Die konstruktionsbedingt fixe Lokalisierung dieses Bedienelements hat zur Folge, dass nicht nur der absolute Kraftaufwand für die Betätigung zu berücksichtigen ist, sondern auch die individuelle anthropometrische Situation. Menschmodelle, die über eine Kraftsimulation verfügen, können helfen, den dafür nötigen Raumbedarf zu erkennen und zu einem guten Kompromiss zu kommen, der die sichere Betätigung für unterschiedlich proportierte Personen gewährleistet (Abb. 7.83). Aus ergonomischer Sicht des Betätigungsablaufs ist die heute bei Automatikfahrzeugen zunehmend favorisierte Lösung, mit der Parksperre „P" zugleich die Feststellbremse zu betätigen, positiv zu bewerten[22]. Allerdings schließt man auf diese Weise ähnlich wie bei einer Fußbetätigung der Feststellbremse die Möglichkeit aus, dass in einem Notfall auch der Beifahrer eine Bremse (dosiert!) betätigen kann.

22 Einer SAE Studie (Becker 2013) zufolge nutzen Fahrer eines Automatikfahrzeugs ohnedies nur 40 % die Feststellbremse. Bei Vorhandensein einer Fußfeststellbremse sinkt dieser Anteil sogar auf 20 %.

Abb. 7.82 Bewertete Erreichbarkeitsflächen in einem gegebenen Fahrzeugcockpit (Beispiel Mercedes E-Klasse, W 212; aus Bothe 2010)

Bei handgeschalteten Fahrzeugen ist unter dem Aspekt der Erreichbarkeit dem Schalthebel besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Insbesondere ist die Erreichbarkeit aller Positionen der sog. „Schaltstrauß" (zusammenfassende Darstellung aller möglichen Positionen des Schalthebels; Bothe 2010) zu überprüfen. Als Ausgangslage dient auch hierbei die Fahrerhaltung mit beiden Händen am Lenkrad. Indem die rechte Hand in die Position des ersten bis sechsten Gangs einschließlich des Rückwärtsgangs gelegt wird, kann für jede dieser Positionen der Diskomfort bestimmt werden. Dieser Vorgang wird für alle Auslegungsmanikins wiederholt. Es kann nun in ähnlicher Weise wie bei den zuvor beschriebenen bewerteten Erreichbarkeitsflächen auch für den Schalthebel eine bewertete Erreichbarkeitsfläche bestimmt werden und so eine optimierte Position des Schalthebels gefunden werden (Abb. 7.84).

Auch der Bereich der Sicht auf die Instrumente kann unter dem Aspekt der notwendigen Akkommodation nach dem hier diskutierten Schema bewertet werden (Abb. 7.85).

Über die geschilderten Fälle hinaus ergeben sich bei Berücksichtigung des Betätigungsaufwands gegebenenfalls recht komplexe Situationen: z. B. Bedienen eines Stellteils, das hinter dem Getriebeschalthebel angebracht ist, Verdecken eines Bedienteils durch

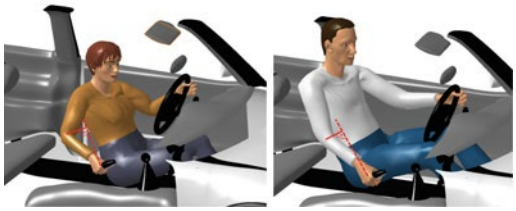


Abb. 7.83 Prognostizierte Haltung des Ziehens der Handbremse für eine Frau des 5., und einen Mann des 95. Körperhöhenperzentils mit Hilfe des RAMSIS-Kraft-Haltungsmodells. Rot eingezeichnete Linien zeigen Hebelarme zwischen Ellbogengelenk und Kraftrichtung beim Ziehen der Handbremse

eine im Flaschenhalter befindliche Getränkeflasche. Es sind auch womöglich komplexe Bedienabläufe zu berücksichtigen, wie beispielsweise das schon erwähnte Zurseiteklappen der Sonnenblende, das Herausnehmen einer Getränkeflasche u. v. a. m.

Wie mehrfach erwähnt, haben Bedienelemente auch Anzeigecharakter, d. h. es muss zusätzlich überprüft werden, ob die entsprechenden Bedienelemente aus den jeweiligen Augenpositionen heraus sichtbar sind. Dabei ergibt sich ein spezifisches Problem in Verbindung mit Touchscreens gerade für alterssichtige Fahrer. Aus Abb. 7.86 ist zu ersehen, dass die Entfernung, auf die ein 65 -jähriger Fahrer gerade noch akkommodieren kann (Nahsehraum), außerhalb des Greifraums eines großen Mannes, ge-

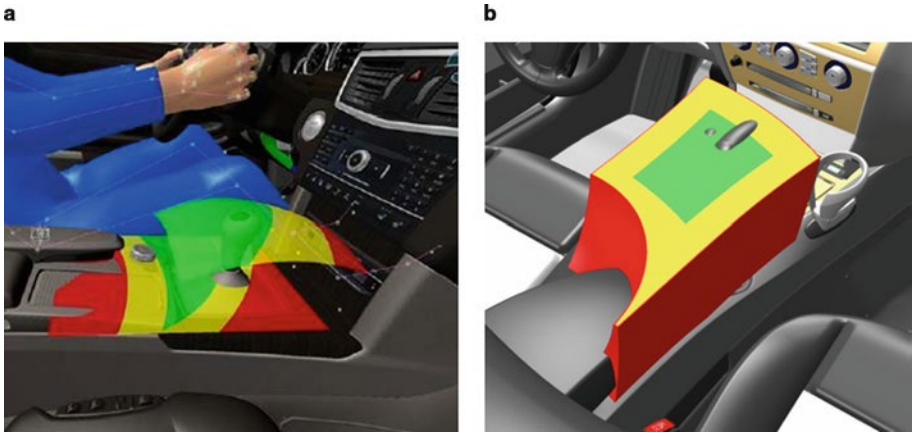


Abb. 7.84 Bewertete Erreichbarkeitsfläche für den Handschalthebel (**a** Beispiel Mercedes E Klasse, W212; aus Bothe 2010, **b** BMW, Wagner 2013)

Abb. 7.85 Bewertung der Sehentfernung auf die Instrumente (Wagner 2013)

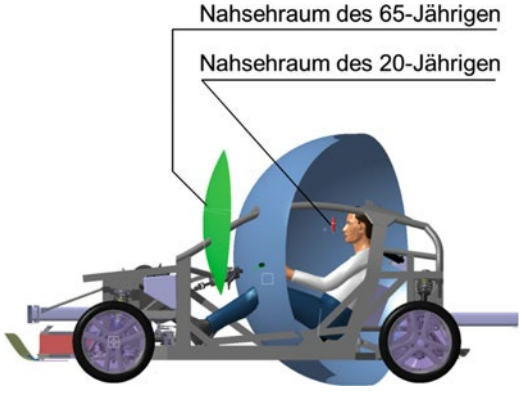


Abb. 7.86 Greifraum des langbeinigen großen Mannes sowie maximale Akkommodation (Nahsehraum) eines 65-jährigen und eines 20-jährigen Fahrers.

schweige denn der kleinen Frau liegt. Das bedeutet: ohne entsprechende Sehhilfe (es kommt in diesem Zusammenhang nur die Gleitsichtbrille infrage) ist er nicht in der Lage, beim Bedienen den auf dem Touchscreen dargestellten Inhalt klar zu sehen. Für den 20–30-jährigen (der womöglich in der Entwicklung das entsprechende Layout gestaltet hat) ist das ganze kein Problem.

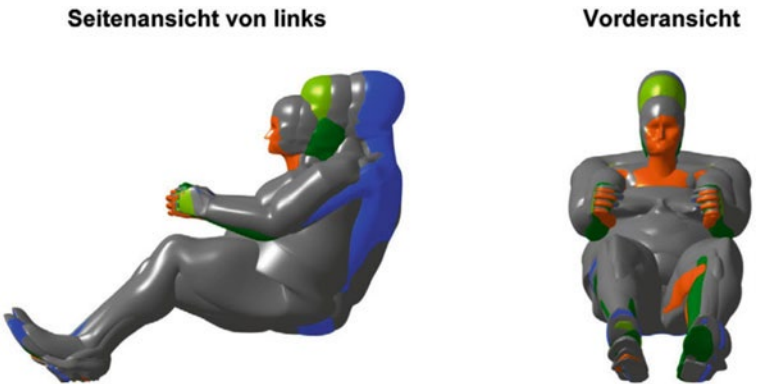


Abb. 7.87 Statischer Raumbedarf des Testkollektivs (aus Bothe 2010)

7.5 Raumbedarf

7.5.1 Statischer und dynamischer Raumbedarf

Man unterscheidet zwischen statischem und dynamischem Raumbedarf. Aus der Überlagerung dieser beiden ergibt sich dann der resultierende Raumbedarf, der für die Auslegung des Fahrzeugs ausschlaggebend ist.

In der Richtlinie SAE J941c wird der statische Raumbedarf des Kopfes in Form einer Hüllkurve beschrieben. Die Grundlage dieser Richtlinien bilden die Untersuchungen von Meldrum (1965), die zu der SAE Augenellipse geführt haben. Daraus wurde die Kopfkontur entwickelt, indem zu den Augenpositionen von Meldrum Kopfkonturen hinzugerechnet wurden, welche aus einschlägiger Fachliteratur entnommen waren (Mies 1987). Damit ist die in SAE J1052 veröffentlichte Kopfhüllkurve an die Augenellipse gebunden, die selbst wieder die tatsächlichen Augenpositionen nicht hinreichend gut wiedergibt. Für den statischen Raumbedarf kommt man zu einem realistischeren Ergebnis, wenn man die verwendeten Auslegungsmanikins in Fahrerposition übereinandergelegt und nur die Einhüllende betrachtet (Abb. 7.87).

Für den dynamischen Raumbedarf ist zunächst auf experimentelle Untersuchungen zurückzugreifen. Mies (1987) hat den notwendigen Raumbedarf des Fahrers bei dynamischer Kurvenfahrt untersucht, indem er in einem Versuchsfahrzeug mit abgeschnittenem Dach und offenen Seitenfenstern mittels einer Stereokamera die Kopfposition der Probanden beobachtet hat. Die Kopfbewegung des Fahrers setzt sich danach aus der Lenkbewegung des Oberkörpers und dem Blickrichtungswechsel zur Steuerung des Fahrzeugs zusammen. Entgegen der Erwartung folgt der Oberkörper des Fahrers dabei nicht der Richtung der Fliehkraft, sondern ist dieser entgegen gerichtet, da der Fahrer ja weiß, welche Kräfte auf ihn zukommen. Dabei fällt auf, dass kleinere Personen ihren Oberkörper wesentlich stärker einsetzen müssen, um die geforderte Lenkarbeit aufzubringen als größere Personen, welche im allgemeinen in der Lage sind, die erforderliche Bewegung des Lenkrads allein mit den Armen zu bewältigen.

Das Verhalten der Fondpassagiere unterscheidet sich von dem der Fahrer vollkommen (Mies 1987). Beim Kurvenfahren rutscht der Oberkörper nach außen. Auch die Neigung des Kopfes folgt der Richtung der Fliehkraft. Der Passagier versucht Blickrichtung und Kopf in der ursprünglichen Lage zu halten und richtet die Körperhaltung entsprechend aus. Abbildung 7.88 zeigt einen Vergleich der erwähnten experimentell erhobenem Kopfhüllkurven und der entsprechenden SAE-Einhüllenden. In Fahrzeuglängsrichtung stimmen die experimentellen Kurven mit denen nach SAE sehr gut über ein. In Fahrzeugquerrichtung übertreffen die dynamischen Kurven, insbesondere die des Fahrers, die SAE-Vorgaben deutlich und zeigen zugleich, wie stark ein enger Dacheinzug den dynamischen Raumbedarf einschränkt.

Die Beobachtungen von Mies (1987) lassen sich modellieren (Bubb und Hudelmaier 2001): der Fahrer versucht mit seinem Oberkörper der Fliehkraft entgegenzuwirken, hält aber seinen Kopf in vertikaler Richtung konstante und richtet dabei seinen

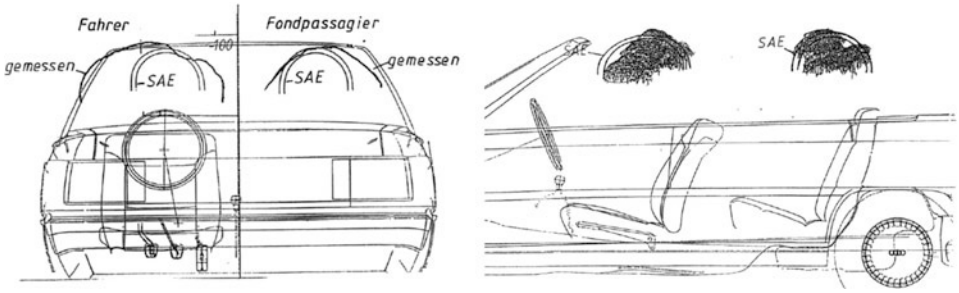


Abb. 7.88 Vergleich der experimentellen festgestellten Kopfhüllkurven (Mies 1987) mit denen nach SAE J 1052

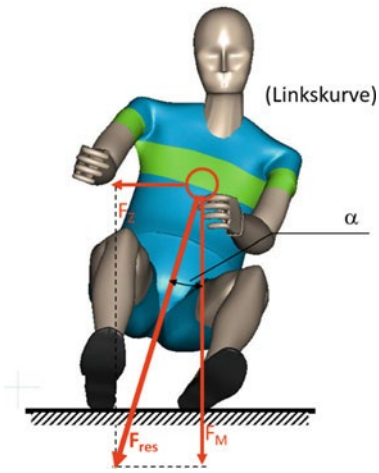


Abb. 7.89 Verhalten des Fahrers bei Kurvenfahrt (Bubb und Hudelmaier 2001)

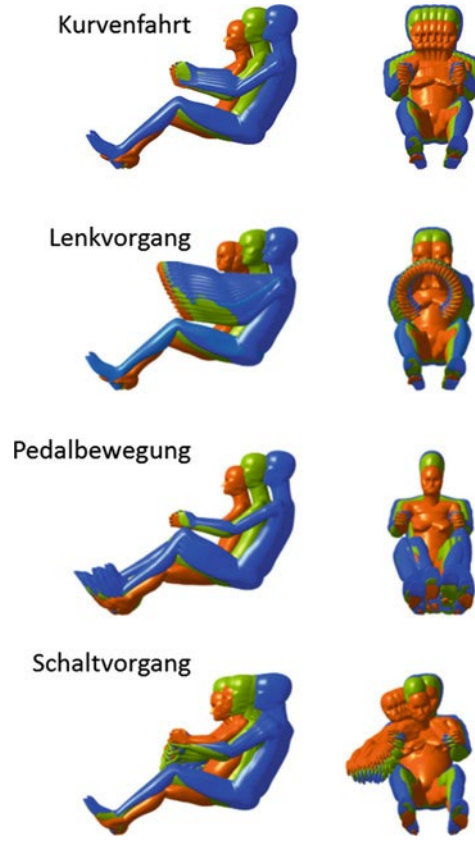


Abb. 7.90 Raumbedarf unterschiedlicher Szenarien durch Übereinanderlegen extremer Auslegungsmanikins (nach Bothe 2010)

Blick auf das Sichtziel (Abb. 7.89). Wenn man von einer Komfortbeschleunigungen von 0,2 g ausgeht, so ergibt sich nach dieser Überlegung ein Neigungswinkel des Oberkörpers von $\alpha = 20°$. Bothe (2010) geht bei seinen Überlegungen von einer Neigung des Oberkörpers von bis zu 10° nach beiden Seiten aus. Der Kopf gleicht die Torsionsneigung analog zu Abb. 7.89 aus.

Für die Simulation des dynamischen Raumbedarfs müssen nach Bothe (2010) zunächst die Bewegungen für die Kurvenfahrt, den Lenkvorgang, die Pedalbewegungen sowie den Schaltvorgang berechnet werden (Abb. 7.90). Ausgehend von der Fahrerhaltung und der gegebenen Fahrzeuggeometrie werden diese Bewegungsabläufe im Prinzip auf folgende Weise berechnet. Es werden zunächst Trajektorien festgelegt, welche die Bewegungsbahnen der Körperpunkte beschreiben. Auf diesen Trajektorien werden Stützstellen als Zielpunkte platziert, mit denen es mittels des Haltungswahrscheinlichkeitsmodells möglich ist, die entsprechende Körperhaltung zu berechnen. Mithilfe des RAMSIS-Motion-Recorders werden diese Stützhaltungen aufgenommen und archiviert. Es entsteht so eine Datenbank aller Be-

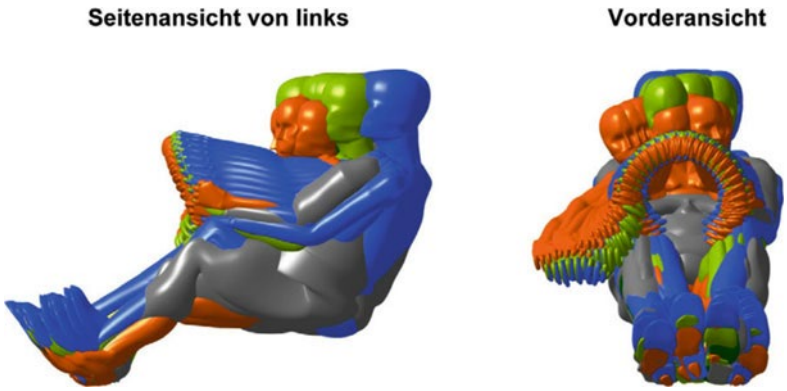


Abb. 7.91 Resultierender Raumbedarf des Testkollektivs (Bothe 2010)

wegungsabläufe der ausgewählten Menschmodelle. Indem all die Bilder der berechnenden Raumbedarfe einschließlich des statischen Raumbedarfs übereinandergelegt werden, erhält man den resultierenden Raumbedarf (Abb. 7.91). An den grauen Flächen, welche das Ergebnis des statischen Raumbedarfs wiedergeben, ist zu sehen, dass auch dieser für gewisse Bereiche ausschlaggebend ist. Aus der Analyse der vorliegenden von Bothe (2010) für die Mercedes E-Klasse zusammengestellten Daten kann festgehalten werden: Der Fuß- und Beinraum wird im oberen Bereich besonders durch den großen Mann (MTMM) wegen seiner maximalen Fuß- und Unterschenkellänge bestimmt. Die kleine Frau (FSMM) legt durch ihre Sitzposition und die kurze Unterschenkellänge den unteren Bereich fest. Der Bereich seitlich wird durch die kleine dicke Frau (FSHM) und durch den mittleren dicken Mann (MMHM) definiert. Der große Mann (MTMM) und der mittlere dicke Mann (MMHM) bestimmt zusammen den Schulterraum. Der mittlere Mann (MMMM) erfordert den notwendigen Kopfraum im vorderen und der großen Mann (MTMM) im hinteren Bereich.

Die hier zusammengestellten Einflussbereiche der verschiedenen Vertreter des Testkollektivs müssen nicht allgemeine Gültigkeit haben. Bei einem anderen Fahrzeugkonzept können durchaus davon abweichende Ergebnisse beobachtet werden. Wie Bothe (2010) bemerkt, sind durch derartige Untersuchungen beispielsweise die Aufenthaltsbereiche der unteren Extremitäten während der Fahraufgabe bekannt. Dies ist von Interesse, wenn an Designmodellen die Anlagefläche zu Tür- und Tunnelverkleidung im Waden- und Kniebereich gestaltet werden soll, denn in diesen Bereichen dürfen weder scharfe Kanten noch störende Designelemente die komfortable Sitzhaltung beeinflussen. Die frühzeitige Visualisierung und Kommunikation solcher komfortrelevanter Gebiete gibt den Designern die Möglichkeit, ihre Entwürfe den Anforderungen der Kunden frühzeitig anzupassen, wodurch mögliche kostenintensive Korrekturschleifen während der Modell- und Prototypenphase verhindert werden.

Die hier vorgestellten Überlegungen zum Fahrerarbeitsplatz sind in entsprechend abgewandelter Form und im Prinzip auch wesentlich weniger aufwändig für die zweite und ggf. dritte Sitzreihe durchzuführen.

7.5.2 Ablagen

Der Innenraum eines Fahrzeugs stellt auch Lebensraum dar. Deshalb ist es notwendig, Optionen für das Ablegen von Gegenständen, die vor und nach und insbesondere während der Fahrt benötigt werden, vorzusehen. Um hierfür Ideen zu gewinnen, ist es sinnvoll von der Szenarientechnik auszugehen, die in ▶ Abschn. 6.1 erläutert worden ist. In Abhängigkeit von dem Einsatzzweck des Fahrzeugs ergeben sich hier unter Umständen ganz unterschiedliche Anforderungen. Die in Tab. 7.10 wiedergegebenen Positionen können dafür nur als Anregung dienen, weitere Überlegungen anzustellen. Insbesondere sind diese Positionen auch für die zweite und dritte Sitzreihe zu überlegen. In Abhängigkeit vom Einsatzzweck des Fahrzeuges (zum Beispiel Familienfahrzeug, Dienstfahrzeug, Chauffeurlimousine) entstehen dadurch ganz unterschiedliche Anforderungen. Anregungen hierfür können auch

Tab. 7.10 Beispiele für vorzusehen der Ablagen

Vor der Fahrt	Während der Fahrt	Nach der Fahrt	Im Stillstand
Ablegen von – Kleidungstücken (z. B. Jackett) – Aktentasche – (nassem!) Regenschirm – Schuhe (z. B. Austausch von Stöckelschuhen gegen flaches Schuhwerk) – Fahrzeugpapier/Führerschein – Parkgaragenschein	Für die Fahrt unabdingbar: – Sonnenbrille – Mobiltelefon einschließlich Halterung – Spannungsversorgung für mitgeführte elektronische Geräte Wünschenswert: – Musik-CD's (Kassetten?) – Getränke – Speisen – Spielzeug für Kinder Für Spezialfälle: – Atlas in Buchform – Betriebshandbuch	Wieder An-sich-nehmen der abgelegten Gegenstände – Schlüssel für Garage – Zufahrtsberechtigung zu Firmenparkplatz – Tankkarte	– Ablagemöglichkeit für Laptop, um zu arbeiten – Ablagemöglichkeit für kleinen Imbiss (Picknick)

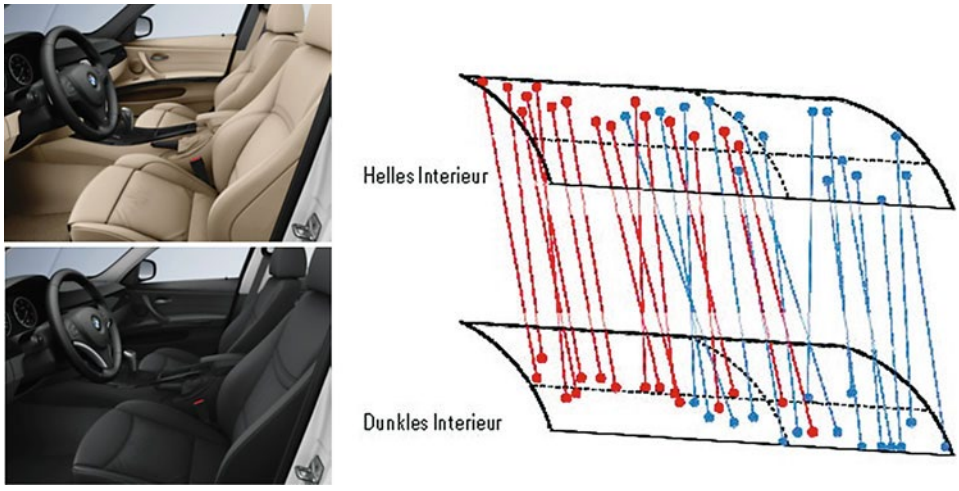


Abb. 7.92 Gewählte Sitzeinstellung in Abhängigkeit von der Farbgestaltung des Innenraums (Beispiel BMW der 3-er Serie, E90)

aus der Arbeit von Michel (2014) gewonnen werden, die sich allerdings mit entsprechenden Fragen für die Gestaltung von Lkw-Arbeitsplätzen auseinandersetzte.

7.5.3 Raumgefühl

Neben objektiven Parametern wie verfügbarer Raum sowie die durch die spezielle Konstellation gegebene Bewegungsfreiheit spielen aber auch viele subjektive Einflüsse für das sog. Raumgefühl eine wesentliche Rolle. Dazu zählen Aspekte wie Farbgebung, Helligkeit oder Haptik, Einflüsse, die nach dem in ▶ Abschn. 3.3.5 dargelegten Komfort-Diskomfort-Modell dem Aspekt des „Gefallens" zuzuordnen sind. Wagner (2013) stellt fest: „Raumgefühl ist die emotionale Reaktion auf den subjektiven Eindruck durch Wahrnehmung und Empfinden eines Raums. Es wird durch das Form- und Farbzusammenspiel innerhalb des Raums positiv oder negativ beeinflusst. Ferner ist es geringfügig von der momentanen psychischen Verfassung abhängig". In einem Versuch mit je 15 männlichen

und weiblichen Probanden unterschiedlicher Körpergröße konnte er an einem Fahrzeug (BMW E90) mit identischer Inneneinrichtung, allerdings unterschiedlicher Farbgebung beobachten, dass im dunklen Interieur von allen Personen innerhalb des gegebenen Sitzverstellfeldes tendenziell eine tiefere und weiter hinten gelagerte Sitzposition gewählt wurde (Abb. 7.92). Das subjektive Empfinden wird dabei durch die in Tab. 7.11 wiedergegebenen Äußerungen illustriert. Man kann daraus unter anderem entnehmen, dass das Konzept und somit die Erwartung an ein Fahrzeug eine wichtige Rolle spielt. So kann oder soll sogar z. B. ein Sportwagen ein eher knappes Raumgefühl vermitteln (Wagner 2013).

Nicht nur die farbliche Gestaltung wirkt sich auf die Sitzposition aus, sondern auch die Gestaltung des Innenraums unter Designaspekten. Wagner (2013) berichtet weiter von einem vergleichenden Versuch zur Fahrersitzeinstellung zwischen zwei Fahrzeugen mit nahezu identischem Maßkonzept. Das Vorgängerfahrzeug (BMW 5er-Serie, E39) war durch ein geschwungenes Armaturenbrett, das einen eher luftigen Eindruck vermittelte, charakterisiert, während der Nachfolger (BMW 5er-Serie, E60) vom optischen Eindruck her einen mehr voluminösen Eindruck machte. Wie aus Abb. 7.93 zu entnehmen ist, unterscheiden sich die beiden Ausführungen von den anthropometrischen Bedingungen, speziell dem Greifraum praktisch nicht. Dennoch rücken alle Probanden (12 weiblich und 11 männlich im Alter zwischen 24 und 60 Jahren) in dem neuen Fahrzeug bei gleicher Sitzhöheneinstellung tendenziell den Fahrersitz ein wenig mehr nach hinten, offensichtlich, um mehr Abstand von dem wuchtiger empfundenen Armaturenbrett zu bekommen.

Auch die farbliche Gestaltung des oberen Fahrzeuginnenraums („Innenhimmel“) hat einen großen Einfluss auf die Wahrnehmung des Raumgefühls. So werden dunkle (braun, dunkelgrau, schwarz) Farben bei unveränderter geometrischer Lage als tiefer, enger, bedrückend oder „sportlicher“ wahrgenommen, als beispielsweise helle (weiß, beige, hellgrau) Verkleidungsteile (siehe auch Tab. 7.11). Eine optische Öffnung des Daches mittels großer Glasflächen erweitert die Sicht nach außen, lässt mehr Licht in den Innenraum und erzeugt auf diese Weise ein weites und offenes Raumgefühl, selbst dann, wenn der Abstand zu den

Tab. 7.11 Subjektive Bewertung eines Fahrzeuginnenraums in Abhängigkeit von der Farbgebung (Wagner 2013)

Helles Interieur	Dunkles Interieur
„Ich fühle mich …“	
„Wie in meinem Wohnzimmer“	„sportlich“
„willkommen“	„dynamisch“
„wohl“	„umschlossen“
„freundlich aufgenommen“	„richtig im Auto drinnen“
„entspannt“	„fokussiert aufs Fahren“
„besonders“	„geborgen“
„warm“	
Aber auch:	Aber auch:
„alt“	„eingeengt“
„gelangweilt“	„bedrückt“
„besorgt, dass das Fahrzeug dreckig wird“	„trist“
	„kalt“
„Das Interieur lässt sich beschreiben als …“	
„Besser“	„genau richtig“
„offen“	„optimal wäre dunkler Himmel“
„großzügig“	„wie gewünscht, wirkt der Raum kaum, so dass Fahren in den Vordergrund tritt“
„luftig“	„kompakt“
„geräumig“	„Optimal umschließend“
„Meine Erwartungen übertreffend“	
Aber auch:	Aber auch:
(große Menschen) „einengend“	(große und kleine Menschen) „einengend“
(und sogar) „zu viel Platz für einen 3er BMW“	„klein“, „düster“, „drückend“, „geschlossen“.

Abb. 7.93 Gewählte Sitzeinstellung in Abhängigkeit von der Gestaltung des Dashboards (**a** BMW 5er E39, **b** BMW 5er E60; Wagner 2013)

Abb. 7.94 Opel Meriva mit Glasdach

Abb. 7.95 Opel Zafira mit Panoramascheibe

Insassen etwas geringer ist als bei dunklen Verkleidungsteilen (Abb. 7.94). Einen besonderen Effekt bieten sogenannte Panorama-Windschutzscheiben, bei denen die Frontscheibe ansatzlos (ohne oberen Dachrahmen) in die verglaste Dachfläche übergeht (Abb. 7.95). Hier ergibt sich ein sehr eindrucksvoller optischer Effekt, der ein großes Raumgefühl und zugleich gute Sicht nach außen vermittelt. Eine besondere Herausforderung für den Fahrer stellen dann Situationen dar, bei denen die Sonne entgegen der Fahrtrichtung bzw. sehr hoch am Himmel steht. Ein Beschattungssystem, das über die Konzeption der üblichen Sonnenblenden hinausgeht, ist hier unerlässlich. Ein weiteres Problem der großzügigen Verglasung ergibt sich hinsichtlich der Klimatisierung des Innenraums: Durch die Glasflächen hindurch heizt thermische Strahlung die Oberflächen des Innenraums auf und erzeugt so einerseits größere Ansprüche an die Klimaanlage und andererseits auch technisch nicht zu kompensierende Temperaturunterschiede auf der Haut der Insassen.

7.6 Ein- und Ausstieg

7.6.1 Türkonzepte

Dem Einsteigen in ein Fahrzeug kommt aus ergonomischer Sicht eine besondere Bedeutung zu, da dieser äußerst komplexe und dynamische Vorgang von

vielen anthropometrischen und fahrzeuggeometrischen Randbedingungen beeinflusst wird. Wie auch in der Kapitelüberschrift wird der Einstig mit dem Ausstieg gerne in einem Atemzug genannt, jedoch sind diese beiden Bewegungsabläufe unterschiedlich und unterliegen ihren eigenen Prinzipien, wie im folgenden Abschnitt ausgeführt werden wird.

Generell werden Ein- und Ausstieg von drei Parametergruppen beeinflusst: Anthropometrie, Fahrzeuggeometrie und der Bewegungsstrategie. Die **Anthropometrie** des Menschen beschreibt die Größe, Proportion und Korpulenz der einsteigenden Person und es liegt auf der Hand, dass die Dimensionen des Körpers einen Zustieg in das Fahrzeug fördern oder behindern können. Vor allem Gewicht und Korpulenz, aber auch Beweglichkeit (Mobilität der Gelenke) und muskuläre Fitness beeinflussen die Agilität, Balance und Geschwindigkeit des Bewegungsablaufes. So ist es für die Bewegung und den flüssigen Ablauf des Einstiegsvorganges entscheidend ob, wo und wie stark die einsteigende Person Abstützung ihres Körpers am Fahrzeug sucht, findet und benötigt. Die Tatsache, dass eine Person klein, leicht und schlank ist, erleichtert den Einstieg in ein Fahrzeug nicht per se, hingegen ist eine ausgeprägte Korpulenz in den meisten Situationen hinderlich.

Die **Fahrzeuggeometrie** hat insofern Einfluss auf den Bewegungsablauf, als sich in der Regel alle Personen zum Einsteigen bücken[23] und beide Füße über eine Schwelle[24] heben müssen. Analog zu Treppenstufen[25], wie sie zum Überwinden von Höhenunterschieden in Gebäuden notwendig sind, ist auch beim Kraftfahrzeug eine Kombination von Höhe und Schrittlänge notwendig, um ein komfortables Erreichen des Sitzes[26] zu ermöglichen.

Einen wesentlichen Einfluss auf Ein- und Ausstieg hat das konstruktiv verwendete **Türkonzept** des Fahrzeugs. Die überwiegende Mehrzahl aller Serienfahrzeuge verwendet konventionell vorne angeschlagene Türen, d. h. die vorderen Türen für Fahrer und Beifahrer sind an der A-Säule angeschlagen und öffnen an der B-Säule, die Fond- oder Hecktüren sind an den B-Säulen angeschlagen und öffnen an der C-Säule. Die Entriegelungsvorrichtung (Türaußengriff mit Entriegelungstaste und ggf. Schließzylinder) befindet sich nahe der öffnenden Flanschkante und wird in der Regel in Öffnungsrichtung betätigt. Die aus aerodynamischen Gründen eine Zeit lang bevorzugte Hebeplatte zum Öffnen der Tür hat sich aus sicherheitstechnischen Gründen nicht durchsetzen können, weil dadurch die Kraft, die benötigt wird, um eine Tür auch nach einem Unfall zu öffnen, nicht ausreichend übertragen werden kann (Abb. 7.97). Überhaupt sind Kraft, Erreichbarkeit und Bedienrichtung gerade bei den Fondtüren auch auf kleinere Personen abzustimmen, um z. B. Kindern ein selbständiges Besteigen des Fahrzeugs zu ermöglichen (siehe auch ▶ Abschn. 7.8.2). Die Lokalisation der Türinnengriffe ergibt sich im Zusammenspiel mit der Analyse der Erreichbarkeitsflächen (Abb. 7.82). Ebenfalls über die Analyse der Greifräume (unter Berücksichtigung des nach vorne geneigten Oberkörpers) können die Griffe zum Zuziehen der Türe in Verbindung mit deren maximalem Öffnungswinkel festgelegt werden.

Eine Kollision des oberen Scheibenrahmens mit dem Kopf (Hals, Kinn, Gesicht oder Brille) des Einsteigenden sollte durch die Form des Rahmens sowie der Anordnung des Türgriffes vermieden werden. Je tiefer der Griff angeordnet ist, desto mehr

23 Die meisten Personenkraftwagen haben eine Höhe von etwa 150 cm. Damit liegt die Unterkante des Dachrahmens, unter der hindurch alle Personen ihren Kopf ins Fahrzeuginnere bewegen müssen, noch unterhalb des 5. Perzentils der Körpergröße. Demzufolge ist ein Bücken beim Einstieg unvermeidlich. Bei SUVs und Kleinbussen liegt die Fahrzeughöhe unter 200 cm. Liegt der Dachrahmen bei solchen Fahrzeugen weiter innen, ist der Einsteigende weniger genötigt, sich zu bücken, als in niedrigeren Fahrzeugkonzepten.

24 Der Einstiegsschweller, der die untere Stufe zum Einstieg definiert, liegt oft auf Höhe der Radmitte und damit in einem Bereich von 200-400 mm. Kleinere Fahrzeuge tendieren zu niedrigeren Einstiegshöhen, während bei SUVs und Kleinbussen diese Stufe so hoch sein kann, dass ein Zwischentritt notwendig wird und eine Stufe im Einstieg vorhanden sein muss.

25 Eine Treppenstufe im Gebäude hat eine Höhe (Steigung) von etwa 160 bis 200 mm.

26 Vereinzelt werden Fahrzeugkonzepte vorgestellt, die bei einer konventionellen Fahrzeugbreite um 1800 mm einen in Fahrzeugmitte angeordneten Fahrersitz vorsehen. Damit liegt der Sitz über 600 mm von der Fahrzeugaußenfläche entfernt und kann nicht mehr mit einem Schritt erreicht werden. Hier ist eine besondere konzeptionelle Lösung des Erreichbarkeitsproblems gefordert (vgl. Mercedes-Benz F100, 1991; BMW Z13, 1992; Mia electric, 2010; siehe Abb. 7.96).

Abb. 7.96 Mercedes-Benz Forschungsfahrzeug F100 mit mittig angeordnetem Fahrersitz und in den Wagenboden einfahrendem Schweller um den Zustieg zu erleichtern

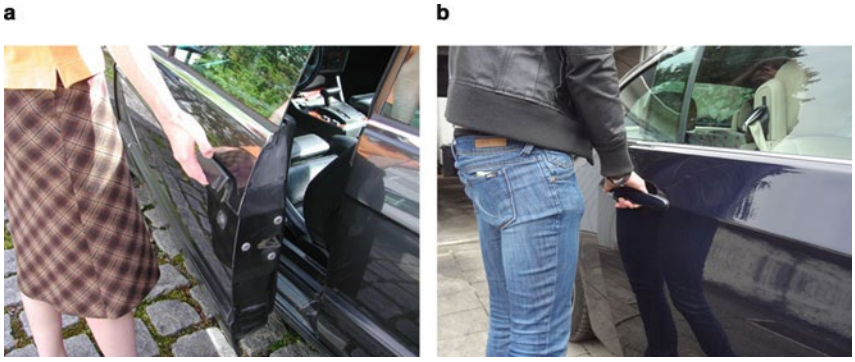


Abb. 7.97 Türgriff als Hebeplatte (**a**) bzw. als Handgriff (**b**)

wird sich eine Person mit dem Oberkörper dem Griff zuneigen und steht beim raschen und eventuell unachtsamen Öffnen in der Gefahr, dem Scheibenrahmen zu nahe zu kommen. Für die Klärung all dieser Fragen können Menschmodelle ebenfalls hilfreich eingesetzt werden.

Hinten angeschlagene Türen öffnen entgegen der Fahrtrichtung. Historisch waren Front- und Hecktüren mit gemeinsamen Scharnierbolzen[27] an der B-Säule angeschlagen, wodurch die Fahrertüren den öffnenden Flansch an der A-Säule hatten. Wurde die Tür während der Fahrt versehentlich oder absichtlich entriegelt, kam es durch den Fahrtwind u. U. zum schlagartigen Öffnen der Tür, wodurch sogar die Tür abreißen und der unangeschnallte Fahrer oder Beifahrer hinausfallen konnte. Aufgrund der Unfallgefährdung wurde diese Bauart in vielen Ländern verboten und darf seither nur noch unter strengsten Auflagen[28] eingesetzt werden. Ein großer Vorteil der hinten angeschlagenen Tür besteht jedoch zweifelsfrei im bequemen und unbe-

27 Die Verwendung von gemeinsamen Scharnierbolzen der Front- und Hecktüren an der B-Säule hat vor allem betriebswirtschaftliche Gründe, vgl. Renault 4CV (1946-1961), Citroën 2CV.

28 Für Personenkraftwagen muss eine Sicherung vorgesehen werden, die verhindert, dass die Türen während der Fahrt geöffnet werden können. Weitere Ausnahmen gibt es für langsam fahrende Traktoren, Baumaschinen und Förderfahrzeuge.

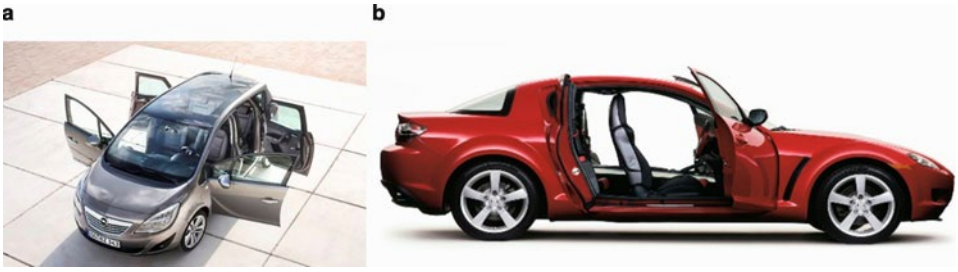


Abb. 7.98 **a** Opel Meriva B (2010), **b** Mazda RX-8 (2003-12)

hinderten Einstieg, da die Tür nicht den großen Zustiegsraum vor dem Sitz versperrt (sie verleitet beim Einsteigen zu der Plumpsstrategie und beim Aussteigen Hebestrategie; siehe ▶ Abschn. 7.6.2). Ebenfalls sind die Montage eines Kindersitzes sowie die Kontrolle des Kindes, das in dem Kindersitz Platz genommen hat, vor dem Schließen der Hecktür einfacher möglich, wenn der Türspalt nach vorne weist. Diese beiden letztgenannten Aspekte haben bei der Entwicklung der Portaltüren[29] des Opel Meriva B[30] eine große Rolle gespielt (Abb. 7.98). Ein weiterer Vorteil kann sich beim Aussteigen eröffnen, wenn an der B-Säule ein vertikaler Haltegriff angebracht ist. Auf diese Weise kann sich der Aussteigende an dem Griff festhalten und leicht aus dem Sitz anheben, indem er sich nach vorne zieht. Dadurch wird auch vermieden, dass er sich an der B-Säule festhält und womöglich verletzt wird, wenn der vorne Sitzende seine Türe zuschlägt. Das Sportcoupé Mazda RX8 verzichtet darüber hinaus auf eine B-Säule und verriegelt die Fronttüren in den Hecktüren. Bei vollständiger Öffnung aller Türen ist so ein bequemerer Zustieg auf die Fondsitze möglich, als es bei reinen zweitürigen Coupés über die geklappten Sitzlehnen der Vordersitze hinweg möglich wäre. Allerdings lässt sich bei diesem Konzept die Hecktüre nicht öffnen, ohne dass die Fronttür bereits geöffnet ist. Vor allem in beengten Parksituationen ist es den Fondpassagieren dadurch kaum möglich das Fahrzeug zu verlassen[31]. Da üblicherweise die Sicherheitsgurte an der B-Säule befestigt und Richtung Vorderinsassen umgelenkt werden, muss für die passive Sicherheit zudem eine besondere konstruktive Lösung[32] gefunden werden.

Ein weiteres, insbesondere bei Kleinbussen verwendetes Türkonzept ist die Schiebetür, deren großer Vorteil[33] in der Regel eine vollständige Öffnung des Türausschnittes selbst bei beengten Parksituationen zulässt. Sobald die Tür aus der Verriegelungsstellung aufgesprungen ist, kann sie parallel zum Fahrzeug nach hinten geschoben werden und trägt somit seitlich kaum auf. Auch hier ist eine Bedienung der Betätigungsvorrichtung (innen wie außen) in Öffnungsrichtung ergonomisch sinnvoll. Auch bei der Schiebetür ist eine Kombination[34] mit vorne angeschlagenen Türen und fehlender B-Säule geeignet, den Einstieg zu erleichtern.

29 Die erste Serie des VW Transporters (VW Typ 2 1950-1967) hatte für den Zustieg zum Fahrgastraum der 2. und 3. Sitzreihe zwei mittelsäulenlose Portaltüren, wobei die vordere Tür zuerst geöffnet werden musste. Diese wurden ab der Baureihe T2 durch eine Schiebetür ersetzt.

30 Der Opel Meriva B (2010) hat eine vorne angeschlagene Vordertür und eine hinten angeschlagene Hecktür. Beide Türen verriegeln an der B-Säule und können unabhängig voneinander geöffnet und geschlossen werden.

31 Der Mini Clubman (2008) verwendet ebenfalls das Konzept der B-Säulenfreien Portaltür, allerdings nur auf der Beifahrerseite.

32 Soll der Gurt nicht in der Türöffnung verlaufen (Mini Clubman, Mazda RX-8) muss er in den Sitz integriert werden, was erhöhte Steifigkeitsanforderungen an die Sitzlehne stellt.

33 Neben den Vorteilen hat die Schiebetür konstruktiv die Herausforderung, eine Längsführung für die Verschiebelänge zur Verfügung zu stellen. Das Gesamtgewicht der Schiebetür ist höher als das einer konventionellen Tür und der Schwerpunkt liegt ebenfalls höher.

34 Der Peugeot 1007 (2005-2009) verwendete ausschließlich zwei Schiebetüren für den Zustieg zur ersten und zweiten Sitzreihe. Der Ford B-Max (2012) kombiniert eine vorne angeschlagene Vordertür mit einer Schiebetür für die Fondpassagiere und verzichtet auf die B-Säule.

Abb. 7.99 Flügeltüren am Konzeptfahrzeug Opel Monza (2013)

Flügeltüren[35] erlauben eine Annäherung an das Fahrzeug von vorne wie hinten mit fast unbehindertem Zutritt und bieten sogar noch einen Schirmeffekt, der bei widriger Witterung den Einstieg von Niederschlag freihält. Allerdings muss die maximal erforderliche seitliche Öffnungsbreite der Tür vollständig vorhanden sein, da andernfalls der Ein- oder Ausstieg nahezu unmöglich ist (Abb. 7.99).

Ähnlich verhält es sich mit der Schmetterlingstür[36], die etwas mehr nach vorne aufschwenkt und den Zutritt zum Fahrzeug nur von hinten zulässt. Mit einer Scherentür[37] lässt sich eine Öffnung des Fahrzeugeinstiegs ohne seitlichen Platzbedarf realisieren. Allerdings ist hier (analog zu Flügel- und Schmetterlingstür) die Erreichbarkeit der vollständig geöffneten Tür vom Fahrerplatz nahezu unmöglich und muss mit Hilfseinrichtungen unterstützt werden. Wesentlich für die Wahl eines bestimmten Türkonzeptes sind sicherlich auch die Aspekte der passiven Sicherheit, insbesondere die Frage nach dem Verlassen des Fahrzeuges, wenn das Fahrzeug verunfallt ist und möglicherweise auf dem Dach liegt. Aus diesen Gründen und aufgrund der geringen Verbreitung dieser alternativen Türkonzepte wird in den folgenden Betrachtungen das konventionelle Türkonzept der vorne angeschlagenen Türen[38] zugrunde gelegt.

7.6.2 Bewegungsstrategien

Bei den Bewegungsstrategien muss man Einstieg und Ausstieg unterscheiden. Der *Einstieg* erfolgt in der Regel aus stehender Haltung in einer seitlichen Vorwärtsbewegung über die Schwellerstufe hinweg und unter dem Dachrahmen hindurch. Dabei bewegt sich der Körper durch die Türöffnung, die von den Säulen und der Türtafel begrenzt werden, hauptsächlich nach vorne. Dadurch ist die begrenzende Geometrie in der Regel im direkten Sichtbereich. Ist die äußere Fahrzeuggeometrie[39] überwunden, sind für den Fahrer noch die Sitz-

35 Flügeltür: Am seitlichen Dachrahmen angeschlagene und nach oben öffnende Tür (DeLorean DMC-12; Opel Monza Concept 2013). Die Flügeltür ermöglicht den Zustieg, wenn die Schweller sehr breit und hoch ausgeführt sind (Mercedes-Benz 300 SL W194/198 (1952-57)) oder sind ein sehr auffälliges und spektakuläres Design-Feature mit publikumswirksamen Show-Effekt.

36 Schmetterlingstür: An dem vorderen Scheibenrahmen (A-Säule) angeschlagene und nach oben und vorne öffnende Tür (McLaren F1, Ferrari Enzo Ferrari).

37 Scherentür: An der A-Säule angeschlagene und nach oben öffnende Tür (Bsp.: Lamborghini Countach, Diabolo, Murcielago, Reventon, Aventador; Bugatti EB110).

38 Vordertüre an der A-Säule angeschlagen und in der B-Säule verriegelt, Fondtüre an der B-Säule angeschlagen und an der C-Säule verriegelt.

39 Äußere Fahrzeuggeometrie der Einstiegöffnung: Alle Bauteile jenseits der Türflanschdichtung (A-Säule, B-Säule, ggf. C-Säule, Einstiegsschweller, Dachrahmen oben, Scheibenrahmen, Türtafel mit Scheibenführung, Außenhaut und Türinnenverkleidung).

kissenkante sowie das Lenkrad und die Pedale zu meistern. Abhängig von der Sitzhöhe[40] kann der Körper im Einsetzvorgang auf den Sitz abgesenkt werden oder muss durch Heben von Hüfte und Gesäß auf den Sitz gehoben werden. Ein Absenken des Beckens auf den Sitz wird als komfortabler wahrgenommen als ein Anheben, da die Gravitation beim Fallen des Körpers „hilft". Ein Anheben des Körpers macht einen zusätzlichen Kraftaufwand erforderlich, was als anstrengendes Heraufklettern wahrgenommen wird. Allerdings wird ein Absenken des Gesäßes auf ein sehr niedriges Niveau (beispielsweise in einem Sportwagen) ebenfalls als sehr unkomfortabel wahrgenommen, da hier eine große Krümmung der Wirbelsäule und große Haltkräfte notwendig sind, um den Körper in Balance zu halten und kontrolliert auf die Sitzfläche abzusenken.

Beim *Aussteigen* kehren sich die Verhältnisse um und können somit in der Wahrnehmung andere Komfortbewertungen hervorrufen. Der Ausstieg erfolgt aus sitzender oder vorgebeugt kauernder Haltung seitwärts oder sogar seitlich rückwärts in den Stand. Hierzu muss der Körper eine standfeste Unterstützung mindestens eines Fußes außerhalb des Fahrzeuges finden, bevor der Kopf und Oberkörper wieder unter dem Dachrahmen hindurch durch die Türöffnung ins Freie gehoben wird. Bei Fahrzeugen, die beim Einsteigen ein Absenken des Körpers auf den Sitz ermöglichen, muss beim Aussteigen der Körper entgegen der Schwerkraftrichtung angehoben werden. Demgegenüber kann bei Fahrzeugen, die beim Einsteigen ein Anheben des Beckens erfordern, der Körper beim Ausstieg der Gravitation folgend aus dem Sitz nach unten in Richtung Standebene gleiten, was als komfortabler wahrgenommen wird. So sind höhere Sitzkonzepte beim Einstieg prinzipiell unbequemer, hingegen beim Ausstieg komfortabler. Niedrigere Fahrzeugkonzepte erleichtern zwar den Einstieg, erfordern aber mehr Kraftaufwand beim Ausstieg. Einen guten Kompromiss bieten Fahrzeuge mit leicht erhöhter Sitzposition in etwa in Höhe des Gesäßes bezogen auf den Fahrbahnboden, wie sie bauartbedingt in SUVs und Geländewagen anzutreffen ist. Der Ausstieg in beengten Verhältnissen[41] stellt eine besondere Herausforderung dar, da hier eine Mindestweite erforderlich, um einen Zu- oder Ausstieg ins bzw. aus dem Fahrzeug zu ermöglichen. Die Mindestöffnungsweite wird fahrzeugseitig von der Stärke des Türblattes (ca. 100–200 mm) und menschseitig von der Beckentiefe (ca. 250–450 mm) bestimmt. Unter diesen Annahmen muss eine Tür mindestens 350 bis 650 mm über die Außenhaut hinaus öffnen, um einen ausreichenden Spalt zur Verfügung zu stellen, der es erlaubt, das Becken[42] aus dem Fahrzeug hinauszuschieben.

Obwohl die zuvor beschriebenen Aspekte grundsätzliche Gültigkeit haben, werden verschiedene Ein- bzw. Ausstiegsstrategien in Abhängigkeit von den Randbedingungen beobachtet. Grund für die Wahl der einen oder anderen Strategien sind neben einer selbst anerzogenen Bewegungsweise Alternativstrategien, wenn der gewohnte Ablauf nicht zum Erfolg führt. Hier spielt die Fahrzeuggeometrie die entscheidende Rolle, wenn das Fahrzeug sich an bestimmten Stellen von dem bisher verwendeten unterscheidet. Das kann einerseits die Situation (enge Parksituation) erforderlich machen, andererseits vom Türkonzept des Fahrzeuges oder von der vorgefundenen Stellung des Sitzes und seiner relativen Lage zu Lenkrad und Pedalerie herrühren. Eine Zunahme der Korpulenz kann ebenso wie die veränderte Beweglichkeit im Alter eine Änderung der Strategie bewirken. Je größer der Freiraum im und um das Fahrzeug ist, desto eher kann der Fahrzeugnutzer sein bevorzugtes Verhaltensmuster anwenden. „Der perfekte Einstieg und damit auch der perfekte Ausstieg als absolute Größe existiert nicht" (Cherednichenko 2007, S. 142). Gleichwohl sind bestimmte Konfigurationen geeignet, die Erwartungen der Zielkun-

40 ISO Maß H5.

41 Beengte Verhältnisse herrschen in Situationen, wenn Fahrzeuge so dicht nebeneinanderstehen, dass die Tür nur ein kleines Stück geöffnet werden kann, z. B. auf Parkplätzen oder in Parkhäusern oder Einzelfertiggaragen. Leider stammen die meisten Bauverordnungen aus Zeiten, als die Fahrzeuge noch wesentlich schmäler waren und so werden die Parklücken aufgrund der gewachsenen Fahrzeugbreiten heute als eng bemessen wahrgenommen.

42 In der Regel ist das Becken, beziehungsweise der Hüftbereich, ggf. der Bauch das begrenzende Körperteil beim Ausstieg.

den hinsichtlich des Ein-/Ausstiegskomforts mehr oder weniger zu erfüllen.

7.6.2.1 Einstiegstrategien

Bei Rigel (2005) findet man Hinweise auf die Parameter des Bewegungsablaufs, der gekennzeichnet ist durch sogenannte *„führende Körperteile"* und die Einhaltung von dort beschriebenen *„Schutzabständen"*. Danach wird die Bewegung durch die Bewegungsbahnen von speziellen Körperteilen gesteuert. Bei einer zielgerichteten Bewegung, wie beispielsweise dem Greifen einer Hand nach einem Gegenstand, wird zwar die Hand von den Muskels des Armes über Knochen und Gelenke bewegt, jedoch „steuert" das Gehirn die Hand als führendes Körperteil. Richtung und Haltung des Armes und letztlich auch des Körpers werden dabei durch untere Regelkreise (u. a. zur Aufrechterhaltung des Gleichgewichts) so gesteuert, dass die beabsichtigte Bewegung realisiert wird. Das Modell der Schutzabstände beschreibt, dass bei Bewegungen bestimmter Körperteile an Objekten vorbei in Abhängigkeit von dem jeweiligen Körperteil ein bestimmter Mindestabstand eingehalten wird, der die Kollision des Körpers mit dem Umgebungsobjekt verhindern soll. Dieser Schutzabstand ist nach Arlt (1998) beispielsweise für die Füße und Hände geringer als für den Kopf. Die Beschaffenheit des Umgebungsobjektes (weich oder spitz) hat ebenfalls einen Einfluss auf die eingehaltenen Abstände. Diese Schutzabstände unterliegen selbstverständlich intra-[43] und interindividuellen[44] Streuungen und können nicht verhindern, dass der Einsteigende unter ungünstigen Randbedingungen oder schnellen Bewegungen sich nicht doch einmal ein Körperteil stößt (siehe Abb. 7.100).

Beim Einsteigen in einen Pkw können im Bewegungsablauf deutliche Abweichungen beobachtet werden. Als Faktoren kommen neben den anthropometrischen Maßen wie Körperhöhe und Stammlänge weitere individuelle Gegebenheiten wie Gewicht, Alter und Beweglichkeit in Frage. Dabei wird die gewählte Strategie auch von der Wahrnehmung und Bewertung der Situation beeinflusst (Rigel 2005). Hinzu kommt in einer Versuchsumgebung noch der Effekt des Lernens[45], da bei mehrfacher Wiederholung prinzipielle Optimierungen und erlernte Umgehungsstrategien und Erkenntnisse zur Anwendung kommen. Rigel (2005) hat 225 Personen[46] im Alter von 22 bis 68 Jahren untersucht und in Anlehnung an die Arbeiten von Höllrich (1992) und Layer (1992) zwischen vier Hauptstrategien unterschieden. Die folgenden Beschreibungen beziehen sich auf den Einstieg auf den Fahrerplatz eines linksgelenkten Fahrzeuges bei bereits vollständig geöffneter Tür.

Einstiegsstrategie – Schlüpfen (Slipping)

Die einsteigende Person verlagert das Körpergewicht auf das linke Bein als Standbein, um das dem Fahrzeug zugewandte rechte Spielbein über den Seitenschweller hinweg in das Fahrzeuginnere zu heben (Abb. 7.101). Dabei verbleibt das rechte Knie jedoch links vom Lenkrad und der Lenksäulenverkleidung. Nun wird das Knie des Standbeins gebeugt und das Gesäß auf den Sitz abgesenkt. Dieser Vorgang erfolgt dynamisch mit oder ohne Abstützung des Körpers am Lenkradkranz. Anschließend wird das linke Bein über den Schweller hinweg in das Fahrzeuginnere gehoben, gleichzeitig oder nachfolgend das rechte Knie unter der Lenksäulenverkleidung hindurchbewegt (schlüpfen) und der rechte Fuß auf dem Fahrpedal abgestellt. Untervarianten der Schlüpfstrategie ergeben sich aus dem Zeitpunkt, zu dem das Knie unter dem Lenkrad

43 Intraindividuelle Streuung: Streuung, die bei ein und derselben Versuchsperson auftritt, wenn diese Person den gleichen Versuch mehrfach wiederholt. Rigel beobachtete für Einzelpersonen durchschnittlich eine Streuung von etwa 20 mm bei vereinzelten Abweichungen von etwa 50 mm.

44 Interindividuelle Streuung: Streuung, die bei unterschiedlichen Versuchspersonen mit gleichen oder sehr ähnlichen Körperabmaßen auftreten, wenn diese Personen den gleichen Versuch durchführen. Rigel ermittelte eine durchschnittliche Streuung von etwa 40 mm bei maximalen Abweichungen von bis zu 100 mm.

45 Zu Beginn einer neuen Aufgabe werden viele Fehler gemacht, die möglicherweise die Erfüllung der Aufgabe zeitlich in die Länge ziehen. Während späterer Lernphasen nehmen die erkannten und gelösten Fehler ab und werden von Beginn des erneuten Durchganges an berücksichtig, wodurch jeder weitere Ablauf schneller und sicherer erfolgen kann.

46 225 Personen: 30 Frauen, 195 Männer, Fahrer limousinenartiger Fahrzeuge (H5 zwischen 470 und 515 mm, H30 zwischen 245 und 285 mm; Rigel 2005).

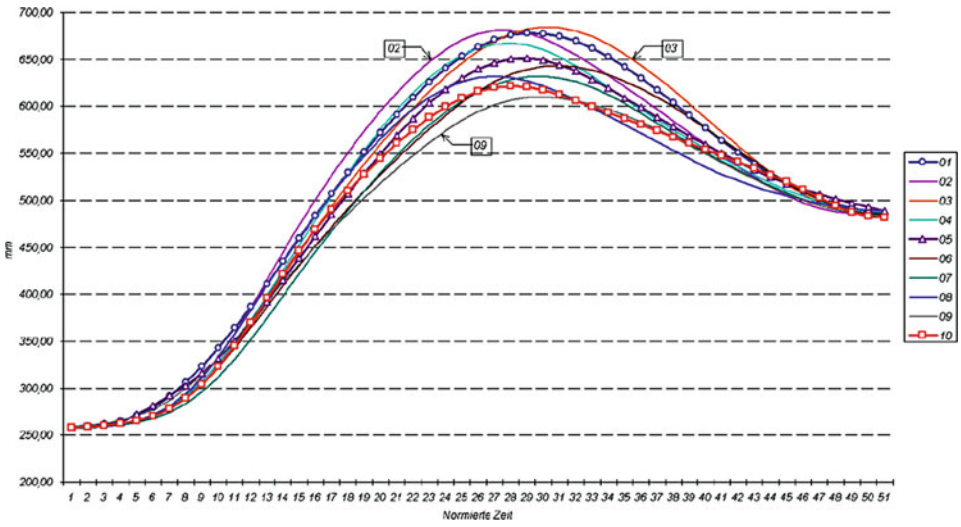


Abb. 7.100 Interindividuelle Streuung eines einzelnen Gelenkpunktes (Cherednichenko 2007)

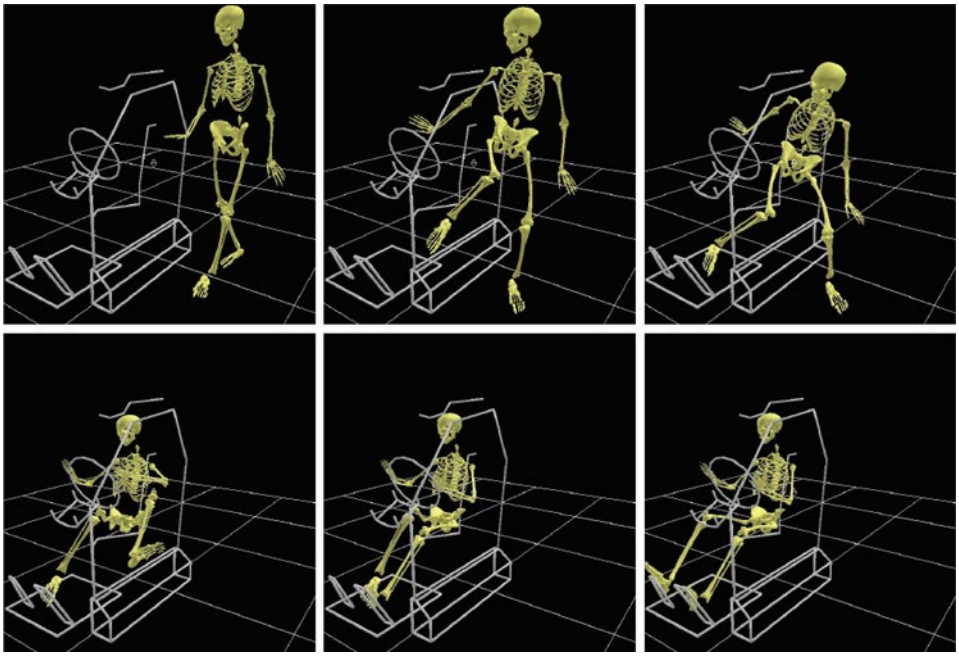


Abb. 7.101 „Schlüpf"-Strategie (Slipping)

hindurchbewegt wird (vor oder nach dem Heben des linken Beins in das Fahrzeug). Weiterhin gibt es die Varianten, dass der rechte Fuß beim Durchfädeln angehoben werden muss und dass der linke Fuß nach dem Heben ins Fahrzeug auf oder vor der Ablagefläche abgestellt wird.

Einstiegsstrategie – Fädeln (Fiddling)

Bei der Fädel-Bewegungsstrategie verlagert die einsteigende Person ebenfalls das Körpergewicht auf das linke Bein und hebt das Spielbein in das Fahrzeuginnere (Abb. 7.102). Allerdings wird der rechte Oberschenkel sofort nach außen ab-

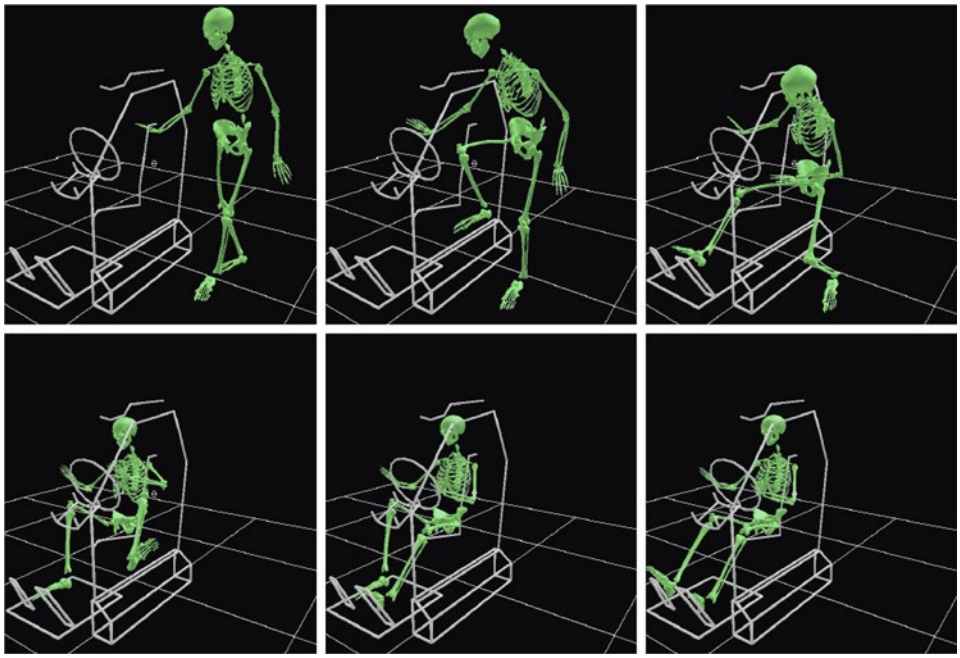


Abb. 7.102 „Fädel"-Strategie (Fiddling)

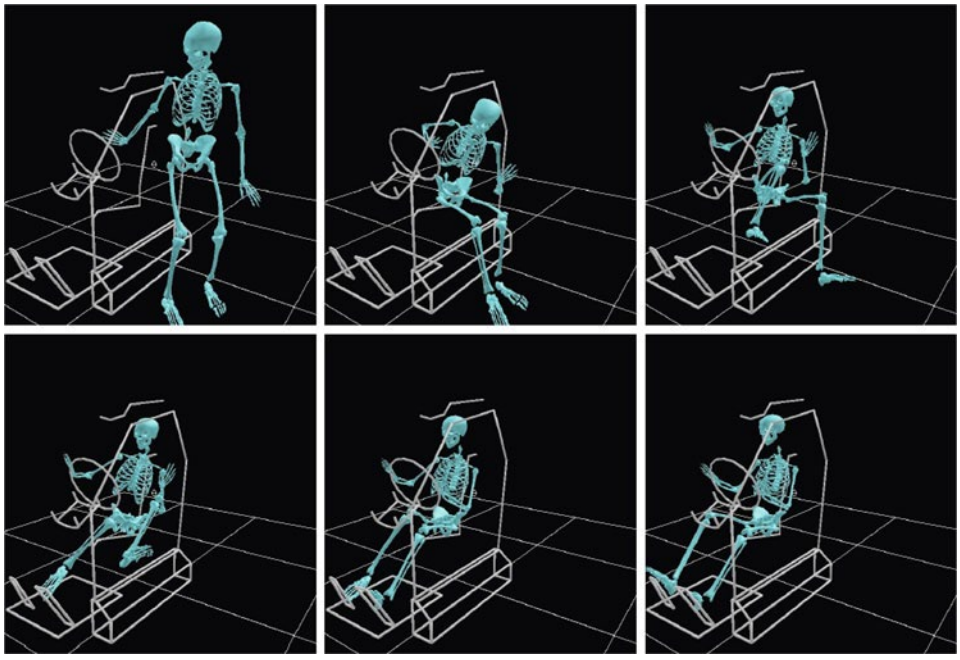


Abb. 7.103 „Plumps"-Strategie (Sagging)

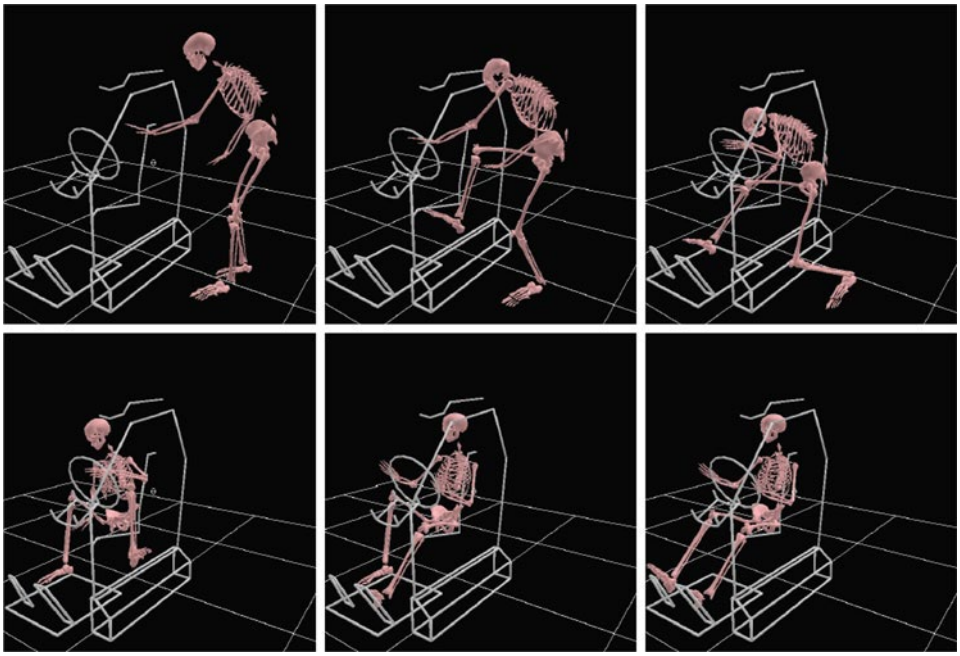


Abb. 7.104 „Hürden"-Strategie (Hurdlejumping)

gespreizt, sodass das Knie unter dem Lenkrad hindurchgefädelt werden kann. Dabei stützt die Person sich schon am Lenkradkranz ab, wenn auch der Kopf sich noch außerhalb des Fahrzeugs befindet. Der rechte Fuß wird vor oder auf dem Fahrpedal abgesetzt, anschließend das Gesäß auf dem Sitz abgesenkt und der Kopf unter dem Dachrahmen hindurch ins Innere des Fahrzeugs geschwenkt. Abschließend wird das linke Bein über den Schweller hinweg in das Fahrzeuginnere gehoben. Damit ist der Bewegungsvorgang abgeschlossen. Auch hier gibt es die Variante, dass der linke Fuß nach dem Einheben vor oder auf der Ablage abgesetzt wird.

Einstiegsstrategie – Plumpsen (Sagging)

Im Gegensatz zu den beiden zuvor genannten Strategien wendet der Einsteigende hierbei der Fahrzeugöffnung den Rücken zu und verbleibt in einem beidfüßigen festen Stand (Abb. 7.103). Nun wird oftmals mit beiden Händen eine Unterstützung am Tür- oder Scheibenrahmen bzw. an der B-Säule gesucht und beide Knie gleichzeitig gebeugt. Mit einer Rumpfbewegung vom Fahrzeug weg wird nur das Gesäß auf die Seitenwange des Sitzes abgesenkt. In dieser bereits sitzenden Haltung wird mit einer Drehbewegung der Körper in die nach vorne gerichtete Fahrhaltung gebracht, der Kopf ins Fahrzeug geschwenkt und das rechte Bein knievoraus unter dem Lenkrad hindurchbewegt. Anschließend wird das linke Bein aktiv oder passiv in das Fahrzeug gehoben. Vor allem ältere und korpulente Menschen bevorzugen diese Strategie.

Einstiegsstrategie – Hürdenspringen (Hurdlejumping)

Bei der vierten Einstiegsvariante steht die einsteigende Person frontal der Türöffnung zugewandt auf beiden Beinen (Abb. 7.104). Ähnlich einem Hürdenspringer wird gleichzeitig der Kopf voraus und ein Bein in das Fahrzeuginnere bewegt. Dabei wird das rechte Bein zwischen Sitz und Lenkrad hindurchbewegt und auf dem Boden abgestellt, der Körper wird mit der linken Hand am Lenkradkranz oder Scheibenrahmen und mit der rechten Hand an der Sitzlehne oder der Mittelkonsole abgestützt. Mit einer Drehbewegung wird das Gesäß über den Sitz geschwenkt und abgesenkt. Das Anheben des linken Fußes in das Fahrzeug schließt den Bewegungsvorgang ab.

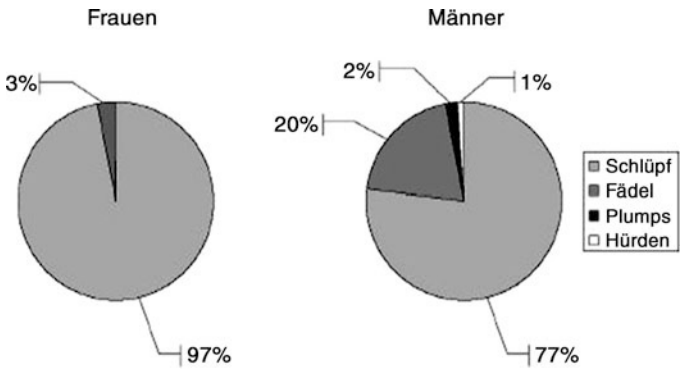


Abb. 7.105 Beobachtete Häufigkeiten der verschiedenen Einstiegsstrategien (Rigel 2005)

Wenn auch die Untersuchungen von Rigel an Limousinen durchgeführt wurden, ergeben sich bei geänderten Randbedingungen Mischformen der beschriebenen Strategien. Bei Kleinbussen mit einem Zwischentritt verschmelzen beispielsweise Fädel- und Hürdenstrategie. Bei Sportwagen[47] mit hohem Seitenschweller und/oder kurzem Türausschnitt führt eine Variante der Hürdenstrategie zum gelungenen Einstieg. Hierbei wird aus dem Stand zuerst das linke Bein in das Fahrzeug gehoben und unter Zuhilfenahme der beidhändigen Abstützung an Scheibenrahmen und B-Säule das rechte Bein über Schweller und Sitz gebracht. Mit einer schwungvollen Bewegung werden nun beide Beine in den Fußraum gebracht und der Oberkörper gleitet dem Gesäß hinterher in das Fahrzeuginnere. Insgesamt weist aber Rigel (2005) auf die große Häufigkeit der Schlüpfstrategie hin (Abb. 7.105).

7.6.2.2 Ausstiegstrategien

Die Bewegungsstrategien des **Ausstiegs** sind den Einstiegsbewegungen ähnlich, unterscheiden sich dennoch aufgrund der stark unterschiedlichen Ausgangshaltung, der Notwendigkeit sich innerhalb des Fahrzeuges abzustützen und sich aus der umschließenden Hülle des Fahrgastraumes zu befreien. Generell wird die Fahrergrundhaltung (sitzende, zurückgelehnte Haltung, Füße auf den Pedalen, Hände am Lenkrad, Blick nach vorne gerichtet) mit dem Öffnen des Sicherheitsgurtes verlassen, in dem sich die Person der Seitentür zuwendet und sich leicht aus der Sitzlehne aufrichtet. Nun wird von innen die Tür entriegelt und leicht geöffnet. Es kann unterschieden werden, ob die Person anschließend die Tür mit dem rechten oder linken Arm weiter öffnet. Fahrschülern wird in dieser Situation empfohlen, sich umzuwenden und durch den sich öffnenden Spalt den nachfolgenden Verkehr zu beobachten, ob sich ein Fahrzeug oder möglicherweise ein Radfahrer von hinten nähert. Da diese Situation nur beim Parken am Straßenrand von besonderer Wichtigkeit ist, entfällt diese Vorsichtsmaßnahme in Reihenparkplätzen, weshalb viele Menschen sich dieses Verhalten nicht aneignen und auch in kritischen Situationen unachtsam aus dem Fahrzeug aussteigen. Der Versuch, durch einen weiter hinten angebrachten Öffnungsriegel an der Innenseite der Tür diese Umdreh-Strategie zu induzieren, hat sich nicht als zielführend herausgestellt und wird deshalb heute kaum mehr realisiert.

Ausstiegsstrategie – Spreizen (Bridging)

Bei der Spreiz-Strategie („Aus-Schlüpfer“) wird mit der linken Hand oder dem Unterarm die Tür aufgeschoben, je nach verfügbarem Frei- und Verkehrsraum jedoch oftmals nur so viel, wie zum Durchschieben des Beckens gerade notwendig ist. Das linke Bein wird durch den unteren Türspalt hindurch auf die Straßenfläche gestellt, während nahezu gleichzeitig der Kopf nach seitlich nach oben durch den oberen Türspalt ins Freie stößt. Bei sehr engen Verhältnissen gleitet der Rücken und das Gesäß dabei auf der Sitzlehne nach oben. Wäh-

47 Historische Fahrzeuge, die diese Strategie erfordern, sind beispielsweise der Mercedes-Benz 300SL W198 (1952-57) und der Jaguar E-Type (1961-74). Auch beim Einstieg durch die Seitenscheibe bei fest verriegelten Türen (Rennwagen, Stock-Cars) ist diese Strategie notwendig.

rend das linke Bein bereits festen Boden unter den Füßen hat, verbleibt das rechte Bein noch innerhalb des Fahrzeugs und zwar auf der rechten Seite des Lenkrades. Für einen Augenblick steht der Aussteigende mit gestrecktem und gespreiztem linken Bein aufrecht im geöffneten Türspalt. Wenn der linke Fuß einen sicheren Stand hat, wird das rechte Bein mit dem Oberschenkel zwischen Sitz und Lenkrad hinausgezogen und der rechte Fuß neben den linken abgestellt. Die Person bewegt sich nun seitlich oder rückwärts aus dem Türspalt heraus und mit dem Schließen der Tür ist der Bewegungsvorgang abgeschlossen. Diese Spreizstrategie lässt sich in zwei Varianten beobachten: Bei der ersten Variation verbleibt das rechte Bein (wie beschrieben) auf der rechten Seite des Lenkrades, bis das Bein aus dem Fahrzeug gezogen wird. Damit ähnelt diese Variante der Fädelstrategie des Einstiegs. Bei einer weiteren Spielart wird nach dem Öffnen der Tür das rechte Knie (wie bei der Schlüpfstrategie des Einstiegs) unter dem Lenkrad hindurchgeführt und zwar nun von der rechten auf die linke Seite des Lenkrades, sodass sich beide Knie eng aneinander links neben dem Lenkrad aufhalten. Die Spreizstrategie kommt insbesondere bei beengten Situationen zum Einsatz.

Ausstiegsstrategie – Klettern (Climbing)

Diese Bewegungsabfolge ähnelt der vorher genannten, insofern ein einbeiniger Stand mit dem linken Bein gesucht wird („Aus-Fädler“). Allerdings wird beim „Klettern“ der Oberkörper und damit auch der Kopf dem Türrahmen zugeneigt. Das erfolgt in der Regel mit einem stoßartigen Ruck aus dem Sitz heraus. Die linke Hand stützt den Körper in der Aufwärtsbewegung und/oder die rechte Hand zieht den Oberkörper gegen die Tür nach oben. Sobald sich das Gesäß vom Sitz löst, wird das rechte Bein zwischen Sitzkissen und Lenkrad hindurchgezogen und der rechte Fuß ebenfalls auf dem Grund abgestellt. Variationen ergeben sich durch die Reihenfolge, wann das rechte Knie unter dem Lenkrad hindurchgeführt wird. Hier steht der Aussteigende seitlich rückwärtig neben dem Fahrzeug. Wird der rechte Fuß nun nach hinten mit einem Ausfallschritt umgesetzt, kann sich die Person gleichzeitig umwenden und aus dem Türspalt heraustreten, sodass die Tür geschlossen werden kann.

Ausstiegsstrategie – Heben (Lifting)

Bei dieser Strategie („Aus-Plumpser“) muss die Tür in der Regel weiter geöffnet werden als in den vorher genannten Bewegungsabfolgen. Sobald die Tür einen ausreichenden Spalt freigegeben hat, werden beide Füße fast gleichzeitig auf die Straße abgestellt. Dadurch wendet sich die Person im Sitz um eine Vierteldrehung, sodass sie quer zur Fahrtrichtung sitzt. Durch ein Vorbeugen in sitzender Haltung wird der Kopf durch die Türöffnung gebracht und mit Hilfe der Arme wird der gesamte Körper aus dem Sitz gehoben. Beide Füße stehen dabei gleichzeitig und fest auf dem Boden. Das Körpergewicht wird von beiden Beinen getragen. Dabei suchen die Hände am Tür- oder Scheibenrahmen bzw. der B-Säule oder der Sitzlehne halt. Seltener werden beide Hände auf den Oberschenkeln abgestützt. Steht die Person nun aufgerichtet mit dem Rücken zum Fahrzeug im Türspalt, muss sie sich um eine halbe Körperdrehung wenden. Sie bewegt sich dabei seitlich aus der Öffnung heraus, um anschließend die Tür zu schließen. Auch bei der Hebestrategie kann unterschieden werden, ob sich erst beide Knie auf der rechten Seite des Lenkrades befinden, oder ob zuerst der linke Fuß auf die Straße gesetzt wird, um anschließend das rechte Bein unter dem Lenkrad hindurchzuführen und dann den rechten Fuß ebenfalls auf den Boden zustellen. Auch hier bevorzugen ältere, korpulentere und schwächere Personen diese stabile und sichere Bewegungsabfolge.

Von verschiedenen Autoren sind Kategorisierungen des Ein- und Ausstiegvorgangs vorgenommen worden, die teilweise etwas unterschiedliche Aspekte als Basis für die Benennung nehmen, aber in der Gesamtbeschreibung zu dem gleichen Ergebnis kommen. Sabbah (2010) hat eine Zusammenstellung und Zuordnung zu den hier vorgenommenen Kategorisierungen vorgenommen (Tab. 7.12).

7.6.3 Bewertungsmethoden

Die unterschiedlichen Ein- und Ausstiegsstrategien sowie deren Komplexität machen es schwierig, eine Bewertung dieser Vorgänge a priori bereits in der Konzeptphase vorzunehmen. Dennoch ist dies not-

Tab. 7.12 Übersicht der Einstiegs- und Ausstiegsstrategien („-" = ohne Nennung; Sabbah 2010)

	Rigel 2005	Andreoni et al. 1997	Chateauroux et al. 2007	Reed et al. 2008
Einstieg	Hürdenspringer	One-foot forward motion	Right-leg-first	Head-first
	Fädler	One-foot lateral sliding		Hip-first
	Schlüpfer	One-foot backward motion		
	Plumpser	Two-foot trunk forward	Buttock-first	
		Two-foot trunk backward		
Ausstieg	Aus-Hürdenspringer	-	-	-
	Aus-Fädler	One-foot parallel to the vehicle	-	-
	Aus-Schlüpfer	One-foot head forward	-	-
	Aus-Plumpser	Two-feet lying strategy	-	-

7

wendig, denn Änderungen zu einem späteren Zeitpunkt der Entwicklung sind kostenintensiv und wegen des damit verbundenen intensiven Eingriffs in das Außendesign oftmals nicht durchführbar. Um ein solches Vorgehen richtig zu interpretieren ist das Statement von Fuchs-Kittowski (1976) zu beachten: „Das Prinzip gleiche Ursache gleiche Wirkung gilt schon in der Physik nicht mehr und auch nicht bei hochkomplexen lebenden Systemen. Es muss ersetzt werden durch das Prinzip gleiche Ursachen – gleiche mögliche Wirkung". Dafür werden gegenwärtig neben den üblichen Probandenversuchen am fertigen, das zukünftige Fahrzeug repräsentierenden Mock-Up drei Verfahren diskutiert, nämlich: die unmittelbare Bewertung der geometrischen Randbedingungen, die Festlegung einer neutralen geringen Diskomfort verursachenden Bewegung und die Simulation des Ein- und Ausstiegsvorgangs mithilfe eines Menschmodells, das dann für die Bewertung herangezogen wird. Die Bewertung der geometrischen Randbedingungen definiert letztlich ein bestimmtes Fahrzeugkonzept und lässt keine Antwort darauf zu, ob eine bestimmte Konstellation für alle Personen gleich gut geeignet ist. Mit der Festlegung einer neutralen Bewegung beschreibt man praktisch einen „Einstiegsschlauch" und untersucht, ob dieser durch die gegebene Fahrzeugkonstellation beeinträchtigt wird. Das Simulationsverfahren lässt demgegenüber eine menschenbezogenen Bewertung zu, also beispielsweise welche Gelenke besonders belastet werden und wie durch eine Änderung der geometrischen Bedingungen dem vorgebeugt werden kann. Ziel einer derartigen allgemeinen Modellierung des Bewegungsverhaltens ist, sie idealerweise auf weitgehend beliebige Produkte anwenden zu können.

7.6.3.1 Geometrische Randbedingungen

In Abb. 7.106 sind von den international definierten GCIE-Maßen (Global Car manufacturers Information Exchange group) bzw. den entsprechenden Maßen nach DIN 70020-1 bzw. SAE J1100 diejenigen zusammengestellt, welche die Türöffnung beschreiben und somit für den Ein- und Ausstiegvorgang relevant sind. Dabei sind auch einige Fahrzeugmaße enthalten, die in Standardnormen nicht direkt definiert sind und nur indirekt über Maßketten bestimmt werden können bzw. auch solche, die nicht aus öffentlichen Quellen stammen. Alle diese Maße werden als „selbstdefiniert" bezeichnet und mit einem kleinen Buchstaben sowie einer laufenden Nummer benannt (Tab. 7.13; Sabbah 2010).

Für einen Maßvergleich von verschiedenen Fahrzeugkonzepten oder Konkurrenzprodukten werden die begrenzenden Parameter der Türflanschöffnung gegenübergestellt. Die einstiegsrelevanten Hauptabmessungen werden vor allem durch den Schwellerquerschnitt und die Dach- und Säulenlage bestimmt. Die Maße des Einstiegsschwellers stellen ein wesentliches Hindernis dar. Sobald das Gesäß auf dem Sitzpolster abgesetzt ist, begrenzen der obere Dachrahmen und der Scheibenrahmen als Verlängerung der A-Säule die Einschwenkbewegung des Oberkörpers und die Möglichkeit, den Kopf ohne zu starkes Einrollen der Brustwirbelsäule komfortabel in den Fahrzeuginnenraum zu schwenken. Die ausstiegsrelevanten Hauptmaße ergeben sich zusätzlich aus

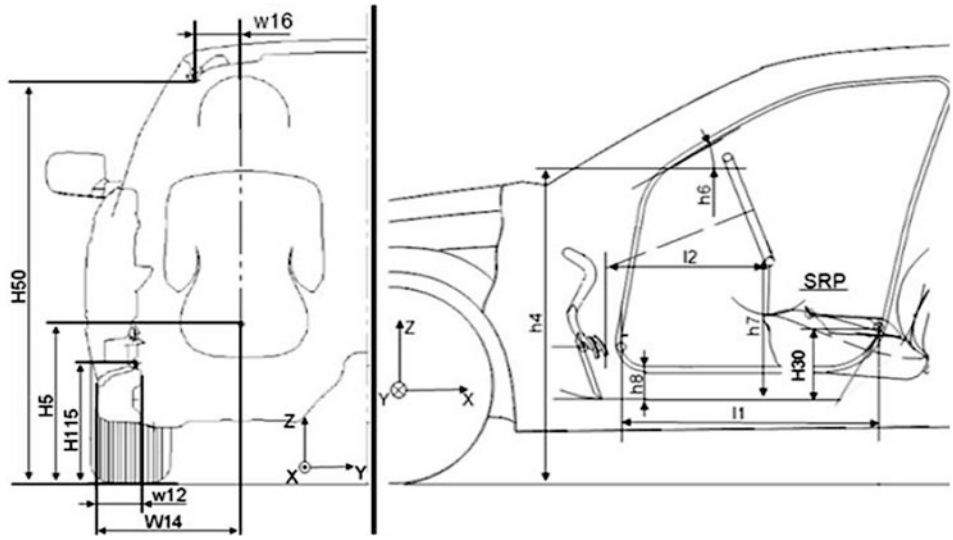


Abb. 7.106 Einstiegsrelevante Hauptmaße

Tab. 7.13 Ein-/Ausstiegsrelevante Fahrzeugparameter (nach Sabbah 2010)

Kurz.	Definition des Maßes	Norm
H5	Vertikales Maß zwischen SRP und der Standebene	DIN 70020-1
H30	Vertikales Maß zwischen SRP u Fersenaufstandspunkt	DIN 70020-1
H50	Vertikales Maß zwischen der Dachrahmenunterkante und der Standebene (gemessen in der x-Ebene durch den SRP)	DIN 70020-1
H74	Kleinster Abstand zwischen Lenkradkranz und Vorderkante des Sitzpolsters (in SRP-Lage)	DIN 70020-1
H115	Vertikales Maß zwischen der Straßenebene und der Schwelleroberkante (gemessen 330 mm vordem SRP)	GCIE 2004
h4	Vertikales Maß zwischen der A-Säulenwurzel und der Standebene	selbstdefiniert
h6	Höhenwinkel derA-Säule zur Horizontalen (angegeben als Höhenmaß)	selbstdefiniert
h8	Vertikales Maß zwischen der Schwelleroberkante und dem Fahrzeugboden (gemessen vor der A-Säule)	selbstdefiniert
w12	Größtes waagerechtes Maß in y-Richtung durch die Mitte (x-Position) des Schwellers	selbstdefiniert
W14	Größtes waagerechtes Maß in y-Richtung zwischen der Schwelleraußenkante und dem SRP	GCIE 2004
w16	Horizontales Maß in y-Richtung zwischen der Dachaußenkante und der Sitzmittelebene (gemessen durch den SRP)	selbstdefiniert
l22	Kleinster Abstand zwischen Lenkradkranz und Rückenlehnenpolster (in SRP-Lage und 25°-Winkel)	selbstdefiniert
l1	Horizontales Maß in x-Richtung zwischen der A- und B-Säule	selbstdefiniert

Tab. 7.14 Den geringsten Diskomfort verursachende ein- und ausstiegsrelevante Fahrzeugparameter (Sabbah 2010)

Bezeichnung des Maßes	Kurzbez.	Optimalwert
Sitzhöhe über Fahrbahn zu Sitzhöhe über Fahrzeugboden	H5 : H30	520 : 260
A-Säulenneigung – Vertikalmaß	h4	950
A-Säulenneigung – Höhenwinkel zur Horizontalen	h6	40°
Dachkante zu Sitzhöhe	H50–H5	789
Dachkantenversatz	W14–w16	230
Lenkradposition: unterer Lenkradkranz zu Fahrzeugboden	h7	500
Lenkradposition: unterer Lenkradkranz zu Pedalebene	l2	500

der Relativlage der A-Säule zum H-Punkt, da dieses Maß festlegt, wie stark der Fuß zum Körper gezogen werden muss, bevor er aus dem Fahrzeug auf die Straße gesetzt werden kann. Des Weiteren sind die Innenstufe des Seitenschwellers und der seitliche Dacheinzug bestimmend für den Ausstiegskomfort.

Sabbah (2010) hat an einem Mock-Up mit variabel einstellbarer Schwellerhöhe, A-Säulen-Neigung Dachkantenhöhe, Dachkantenversatz, Lenkrad- und Sitzposition systematische Diskomfortuntersuchungen vorgenommen, um zu optimalen, den geringsten Diskomfort verursachenden Werten zukommen. Er hat dabei die Bandbreite der Werte variiert, die heute im Bereich von Limousinen bis SUVs auf dem Markt beobachtet werden. Die Versuche wurden mit Probanden einer Körperhöhe zwischen dem 5. und dem 95. Perzentil durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Tab. 7.14 zusammengefasst.

Unabhängig von der Distanz zwischen Fahrbahnfläche und Fahrzeugboden verursacht erwartungsgemäß die niedrigste Schwellerhöhe von 20 mm den geringsten Diskomfort. Trotz der großen Differenz zwischen niedrigster und höchster Dachkantenhöhe H50 zwischen 1202 und 1601 mm (Differenz 459 mm) zeigt die für das Ein- und Aussteigen relevante Differenz zwischen der Dachkantenhöhe und der Höhe H5 des Sitzreferenzpunktes über dem Fahrbahnniveau nur eine Bandbreite von 763 mm bis 815 mm (Differenz: 52 mm), so dass der mittlere Wert von 789 mm als ein guter Kompromiss anzusehen ist. Die Versuche zum Dachkantenversatz zeigen, dass eine weiter innen liegende Dachkante beim Einstieg als angenehmer, beim Ausstieg allerdings als mehr Diskomfort verursachend empfunden wird. Da sich allerdings die von den Probanden genannten Diskomfortwerte nur wenig unterscheiden, kann die mittlere Einstellung von 230 mm empfohlen werden. Die Höhe des unteren Randes des Lenkradkranzes über dem Fahrzeugboden beeinflusst vor allem bei den größeren Männern den Einstieg entscheidend. Bei den Frauen hatte die Längsausrichtung des unteren Lenkradkranz den größten Einfluss. Insgesamt konnte bei den Versuchen beobachtet werden, dass im Gegensatz zu der allgemeinen Erwartung das Einsteigen einen höheren Diskomfort verursachte als das Aussteigen. Die genauere Analyse der beobachteten Körperwinkel lässt diesen Effekt darauf zurückführen, dass der Einstieg von einem „zufällig gewählten" Startpunkt aus geschieht und dies beim Durchtauchen unter den Dachrahmen gegebenenfalls durch eine stärkere Torsion des Oberkörpers kompensiert werden muss. Beim Aussteigen ist die Startposition definiert und somit kann den Vorgang präziser geplant werden. Insgesamt geben größere Probanden höhere Diskomfortwerte an, was auf die notwendig geringeren Körperwinkel zurückgeführt werden kann. Interessant ist auch die Beobachtung, dass sich für die ideale Ein- und Ausstiegseinstellung der Sitz um durchschnittlich 40 mm hinter und 10 mm unter der individuellen Fahreinstellung befindet. Zudem ist für den Ein- und Ausstiegsvorgang ein ausreichender Freigang zwischen der unteren B-Säule und dem Hüftbereich der jeweils individuellen Sitzeinstellung erforderlich. Vereinfacht gesagt sollte der Türausschnitt des Fahrzeuges so groß sein, dass die für den Fahrer eingestellten Sitz und Lehnenflächen – von der Seite betrachtet

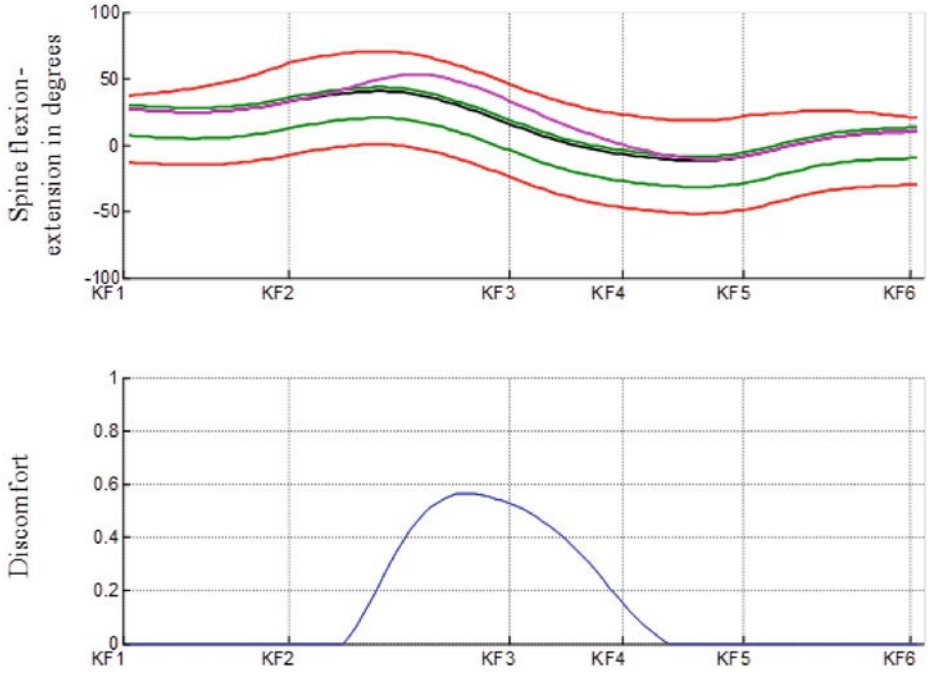


Abb. 7.107 Neutrale Bewegung (schwarze Linie) und Diskomfortkorridor. Die grüne Linie charakterisiert den Bereich tolerablen, niedrigen Diskomforts, die rote Linie sollte nicht überschritten werden. (nach Dufour & Wang, 2005). KF1 : Der linke Fuß hebt vom Fahrzeugboden ab. KF2 : Der linke Fuß überwindet den Schweller. KF3 : Der linke Fuß kommt mit dem Fahrbahnboden in Kontakt. KF4 : Der rechte Fuß hebt vom Fahrzeugboden ab. KF5 : Der rechte Fuß überwindet den Schweller. KF6 : Der rechte Fuß kommt mit dem Fahrbahnboden in Kontakt

– innerhalb des Türausschnittes liegen. Damit gerät man aber in einen Interessenskonflikt mit dem Zugang zur zweiten Sitzreihe in einem (kürzeren) viertürigen Fahrzeug.

7.6.3.2 Bewertung des Einstiegsschlauchs

Von der französischen Forschungsinstitution INRETS (heute IFSTAR) wurde in Zusammenarbeit mit Renault das datenbankbasiertes Modell RPx entwickelt. Grundlage dafür ist die Aufzeichnung einer Vielzahl von Einstiegsvorgängen in existierende Fahrzeugkonzepte mittels eines Motion-tracking-Systems unter Verwendung von Probanden vom 5. bis zum 95. Perzentil Körpergröße. Zu den entsprechenden Vorgängen existieren Aussagen der Probanden zum empfundenen Diskomfort. Alle Bewegungsaufzeichnungen, die zugehörigen Diskomfortaussagen sowie die zugehörigen Maße der verwendeten Karosseriekonzepte sind in einer Datenbank gespeichert. Für die Bewertung eines neuen Karosseriekonzeptes wird in dieser Datenbank das ähnlichste Konzept gesucht und die zugehörige Bewertung ausgegeben. Dofour und Wang (2005) haben daraus ein Konzept für die Ermittlung von dynamischem Diskomfort abgeleitet. Dieses basiert auf der Vorstellung einer neutralen Körperbewegung, die für jedes Körpergelenke durch ein Mittelungsverfahren aus der genannten Datenbank gewonnen wird. Eine Abweichung der beobachteten Bewegung von dem neutralen Verlauf über ein vorgegebenes Maß hinaus wird als Diskomfort bewertet (Abb. 7.107). Die Bereiche des Diskomforts werden über den gesamten Einstiegbewegungsverlauf aufintegriert und als Maß für den empfundenen Diskomfort ausgegeben.

Eine solche neutrale Bewegung oder der aufgenommene Bewegungsvorgang in einem als gut bewerteten Karosseriekonzept kann durch ein Menschmodell dargestellt werden und in ein vorhandenes Karosseriekonzept eingepasst werden (Abb. 7.108). Es wird dadurch offensichtlich, wel-

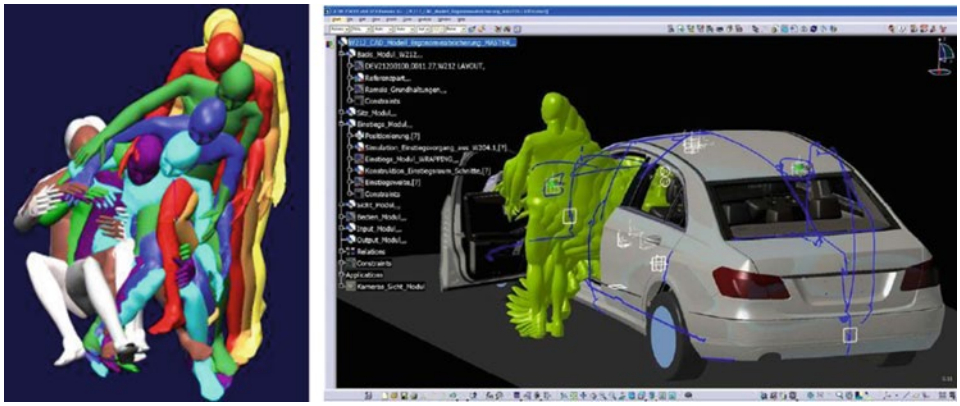


Abb. 7.108 Einstiegshaltungen (Bewegungsschlauch) bei einer neutralen Bewegung (aus Sabbah 2010) und Einpassung in ein vorhandenes Fahrzeug (aus Bothe 2010)

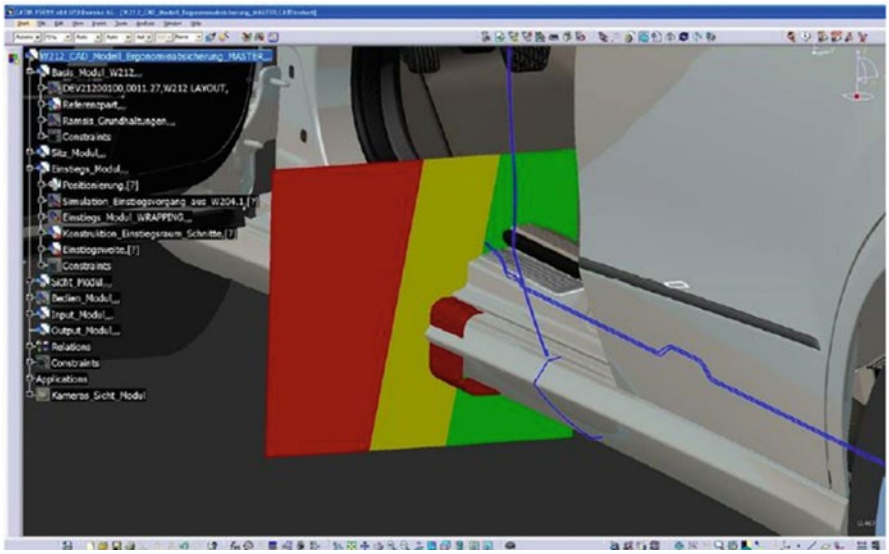


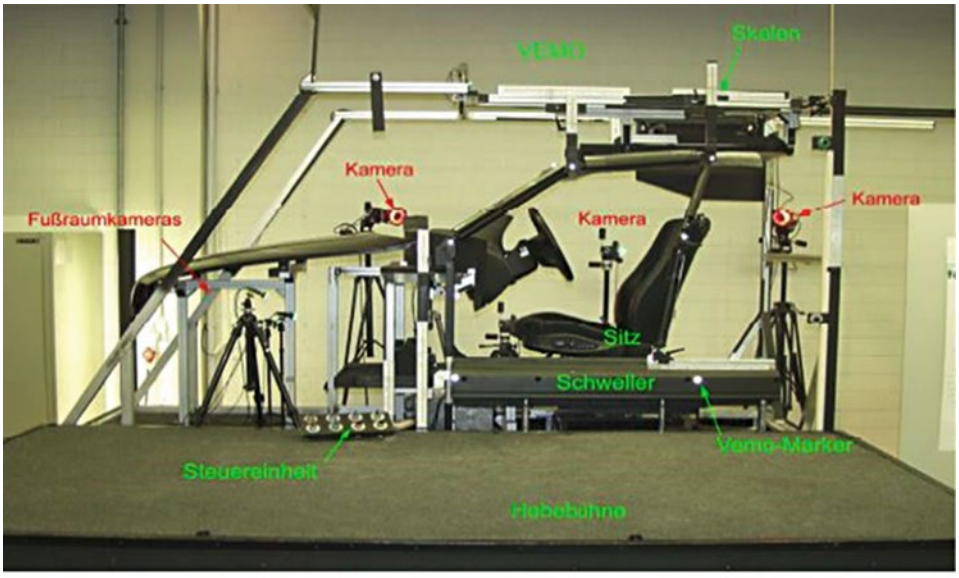
Abb. 7.109 Diskomfortbewertung für Einstiegsweite am Schweller (Bothe 2010)

chen Raumbedarf das jeweilige Auslegungsmanikin für den Ein- und Ausstieg benötigt.

Aus den Untersuchungen von Sabbah (2010) kann der Effekt von verschiedenen Positionen der unter ▶ Abschn. 7.6.3.1 aufgeführten Einflussparameter auf den Diskomfort abgeleitet werden. Ein ähnliches Verfahren wird auch von Bothe (2010) basierend auf der Studienarbeit von Neuendorf (1996) geschildert. Auf dieser Grundlage wurde ein Bewertungstool entwickelt, das am Beispiel der Konstruktion und Position des Schwellers in Abb. 7.109 demonstriert wird. Der Zusammenhang zwischen Einstiegshöhe und Einstiegsweite wird durch die farblich codierte Bewertungsfläche visualisiert. Bei einer großen Einstiegshöhe muss demnach der Schweller einen geringeren Abstand zur Sitzfläche haben als bei niedrigen Fahrzeugen.

7.6.3.3 Bewertung des Bewegungsvorgangs

Das Ziel der Arbeit von Cherednichenko (2007) wie auch der Vorgängerarbeit von Rigel (2005) war es, den gesamten Bewegungsvorgang des Einstiegs mithilfe von mathematischen Verfahren zu simulieren, sodass die geometrischen Einflussfaktoren den Bewegungsvorgang unmittelbar steuern, wo-



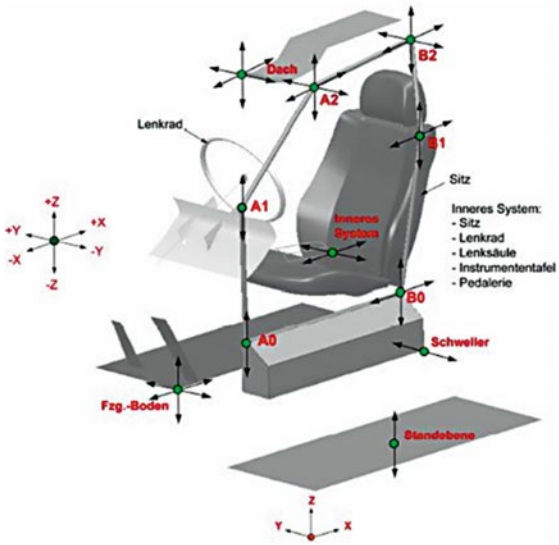


Abb. 7.110 Variables Einstiegsmodell (VEMO) zur systematischen Erforschung des Einstiegsverhaltens (aufgebaut bei BMW, aus Cherednichenko 2007)

mit die Grundlage für eine individuelle Bewertung gegeben ist. Dazu wurde bei BMW eigens das Mock-Up VEMO (Variables Einstiegs-Modell) entwickelt, mit dessen Hilfe eine variable Einstiegsgeometrie erzeugt werden konnte. Zugleich musste das Mock-Up so aufgebaut sein, dass zur Bewegungserfassung durch die Kameras ein möglichst ungehinderter Blick in die Szene möglich war. Abbildung 7.110 gibt den Aufbau von VEMO sowie dessen grundsätzliche Verstellmöglichkeiten wieder.

Cherednichenko beschränkt sich für sein Modellierungsvorhaben wegen der bei Rigel (2005; siehe Abb. 7.105) beobachteten Häufigkeiten auf die Schlüpfstrategie. Mittels Motion-tracking wird die Bewegung des Probanden erfasst. Der Einstiegsvorgang wird in fünf Funktionsphasen aufgegliedert. Für jede dieser Phasen kann ein „führender“

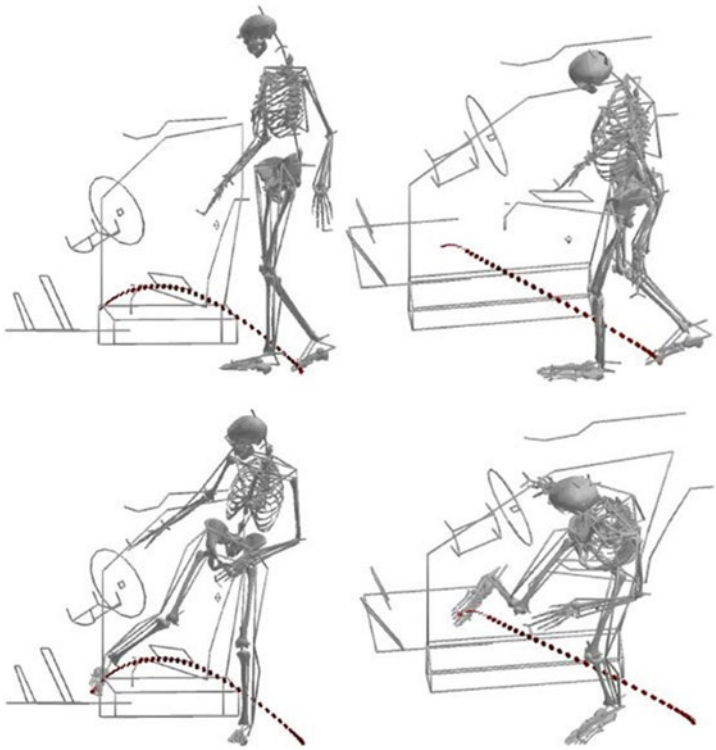


Abb. 7.111 Bewegungsverlauf des rechten Fußes in seiner Phase als führendes Körperteil aus unterschiedlicher Perspektive

Tab. 7.15 Phasen des Einsteigvorgangs und führenden Körperteile (Cherednichenko 2007)

Phase	Beschreibung	Führender Körperteil
Phase I:	„Annäherung"	linker Fuß
Phase II:	„Stabile Stützposition einnehmen"	rechter Fuß
Phase III:	„Sitzposition einnehmen"	Becken
Phase IV:	„Überführung in die frontale Sitzposition"	linker Fuß
Phase V:	„Fahrerhaltung einnehmen"	Kopf

Körperteil identifiziert werden, welcher primär für die Erfüllung der Bewegungsfunktion verantwortlich ist. Auf der Grundlage der Beobachtung durch das Motion-tracking ist dieser führende Körperteil jeweils dadurch charakterisiert, dass seine Bewegung in dieser Situation exakt in einer planen Ebene abläuft (Abb. 7.111).

Die neuronale Koordination scheint sich also mit der Richtung und Geschwindigkeit dieses Körperteils zu befassen, die Innervation der restlichen Muskulatur erfolgt quasi autonom auf der Basis lokaler Muskelreflexe und unter Berücksichtigung einer stabilen Körperhaltung im Hinblick auf die gegebenen Gleichgewichtsbedingungen. Nach dieser Methode können für die einzelnen Funktionsphasen die in Tab. 7.15 und Abb. 7.112 wiedergegebene „führenden Körperteile" festgelegt werden.

Die Ebene, in der sich jeweils der „führende Körperteil" bewegt, wird mittels der Berechnung einer Regressionsebene in der Punktewolke einer Bewegungsspur bestimmt. Die Abweichung von dieser Ebene beträgt nicht mehr als 10 mm. Wenn sich ein Körperteil deutlich aus diesem Toleranzbereich herausbewegt, kann davon ausgegangen werden, dass es seine Rolle als führender Körperteil beendet hat. Es zeigt sich, dass ca. 80 % der Gesamtbewegung eines solchen Körperteils in diesem Toleranzbereich abläuft. Die verbleibenden 20 % am Anfang und am Ende der Bewegung können als Übergangsphase zum nächsten führenden Körperteil verstanden werden.

Cherednichenko hat in einer Versuchsreihe das VEMO an die individuellen anthropometrische Maße

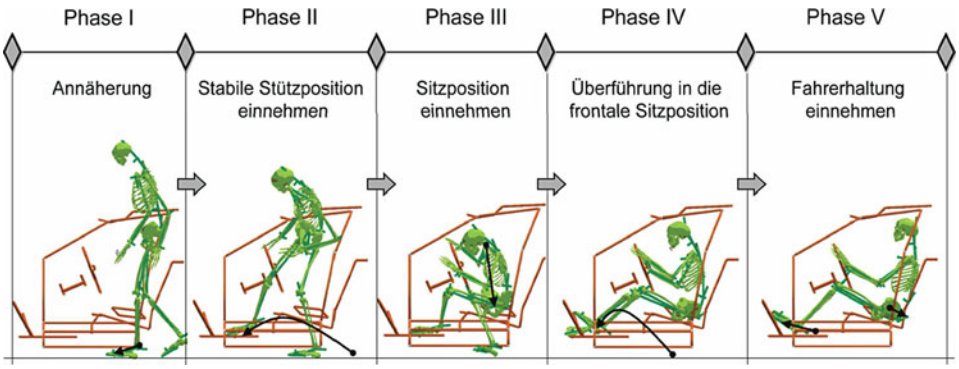


Abb. 7.112 Phasen eines Einsteigvorgangs (Cherednichenko 2007)

der Probanden angepasst hat (vereinfacht: ein kleines Auto für kleine Personen und ein großes Auto für große Personen). Beachtenswerterweise zeigen unter diesen Bedingungen Personen unterschiedlicher Anthropometrie das gleiche Verhalten[48]. Damit ist eine allgemeine Modellierung der Einstiegsbewegung möglich. Der erste Teil der Bewegungsmodellierung ist der Bewegung der führenden Körperteile gewidmet. Dabei wird die Modellierung der *Phase I* auf die Parameter reduziert, die für die Einstiegsbewegung relevant sind. Das sind die Annäherungsrichtung und die Position des linken Fußes am Ende der Annäherungsphase.

Bei der *Phase II* „eine stabile Stützposition einnehmen" hängt die Bewegungsebene des rechten Fußes sowohl von den anthropometrischen Maßen der Person als auch von den geometrischen Einstiegskonfigurationen ab. Die einzelnen Richtungsvektoren der Bewegungsebene werden dabei unterschiedlich durch die Parameter beeinflusst. Es konnte eine mathematische Prozedur entwickelt werden, durch die über Korrelationsanalysen deren Ausrichtung modelliert werden kann.

Als Vorbereitung für eine harmonische Absenkung des Beckens auf den Sitz in der anschließenden Phase III muss die Lage des rechten Fußstützpunktes richtig erfolgen. Das geschieht durch visuelle Unterstützung. Daraus kann abgeleitet werden (und wird im Experiment auch beobachtet), dass dieser Vorgang stark beeinträchtigt ist, wenn der Fußraum wegen Sichtbeeinträchtigung nicht genau eingeschätzt werden kann. Der funktionale Zusammenhang zwischen Fußstützpunkten und der Sitzposition kann als Hinweis der körpermaßspezifisch rückwärts verlaufenden Planung der Fußbewegung in der Einstiegsphase II betrachtet werden. Das vorgestellte Modell ermöglicht die Berechnung der Bewegungsebene des rechten Fußes und in dieser die der Bewegungsbahn in Form einer aus zwei Polygonen 3. Grades zusammengesetzten Spline-Kurve. Dieser ist ein Geschwindigkeitsprofil zugeordnet, dessen genaue Form von den auf die anthropometrischen Maße der Person bezogenen Geometriegrößen abhängt (siehe Abb. 7.113).

Die *Phase III* „Sitzposition einnehmen" stellt aus Sicht der Bewegungsplanung das zentrale Bewegungsziel dar. Dabei ist das Becken der führende Körperteil. Der Oberkörper folgt dieser Bewegung und hat zusammen mit den oberen Extremitäten die Aufgabe, durch Haltungskorrekturen das Gleichgewicht zu erhalten und den Bewegungsablauf zu stabilisieren. Die Einheitsvektoren der Bewegungsebene des Beckens zeigen starke Korrelationen mit den Körpermaßen der Versuchspersonen, insbesondere mit den Leitmaßen Körperhöhe, Beinlänge und Stammlänge. Dieser Einfluss wird in dem Bewegungsmodell durch die körpermaßzentrierten Fahrzeugparameter berücksichtigt. Direkt in das Modell geht der Body-Mass-Index (BMI) ein, wodurch korpulenzbezogene Bewegungsbahneinflüsse berücksichtigt werden. Die Bewegungsbahn des Beckens in ihrer Ebene kann

48 Das ist insofern bemerkenswert, als auch die ideale Sitzdruckverteilung unabhängig von der individuellen Anthropometrie ist. Offensichtlich zeigen Menschen ähnliches Verhalten, wenn die Umgebung an ihre individuellen Abmessungen angepasst ist. Das unterschiedlich beobachtete Verhalten kommt also wesentlich dadurch zustande, dass die gleiche, gegebene Umgebung für jeden Menschen unterschiedlich ist.

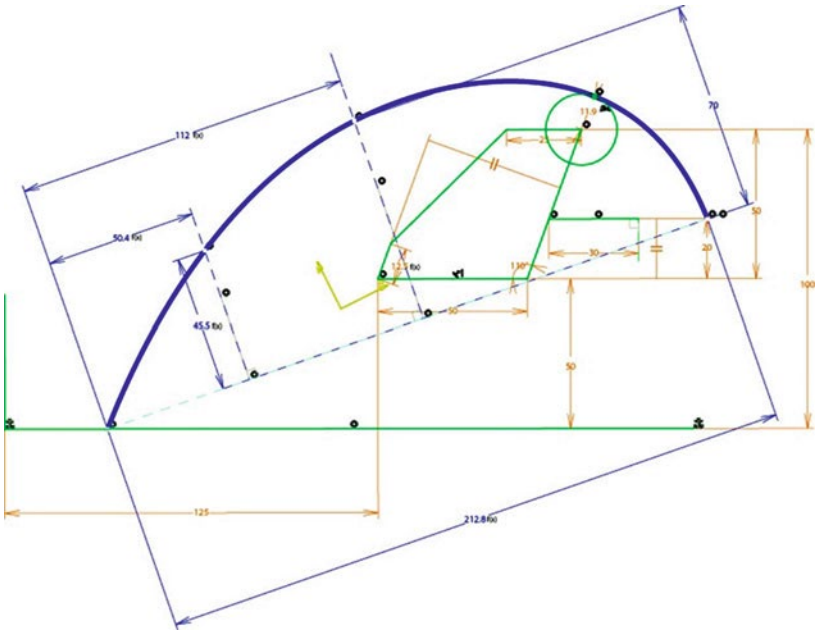


Abb. 7.113 Konstruktion der Bewegungsbahn des rechten Fußes über den Schweller (Erläuterungen hierzu siehe Cherednichenko 2007)

vollkommen durch ein Polygon 2. Ordnung beschrieben werden. Die Modellierung ermöglicht dabei detaillierte Aussagen zum Einfluss von Geometriegrößen auf den notwendigen Bewegungsablauf. An dieser Stelle wird auch der Vorteil einer funktionalen Modellierung gegenüber einer datenbankbasierten Modellierung offensichtlich. Eine weitere Auffälligkeit ist, dass das Geschwindigkeitsprofil des Beckens und der Fußbewegungen, das durch einen vierphasigen Verlauf charakterisiert ist, nahezu identisch ist. Der Organismus scheint also für führende Körperteile eine feste Struktur zu bevorzugen.

In der *Phase IV* „Überführung in die frontale Sitzposition" werden alle Bewegungen in der Sitzhaltung durchgeführt. Das funktionale Bewegungsziel ist nun die zielgerichtete Verlagerung des linken Fußes auf die Fußstütze. Der linke Fuß ist also nun führender Körperteil. Allerdings sind die Kräfte sowie die Platzverhältnisse für eine Willkürbewegung des Beines meistens nicht ausreichend. Dies wird durch eine Korrekturbewegung im Sitz ausgeglichen, die der Minimierung der notwendigen Kraft unter einer optimalen Ausnutzung des Bewegungsfreiraums dient. Die Führungsfunktion des linken Fußes muss dabei in zwei Abschnitte zerlegt werden, eine Notwendigkeit, die sich generell immer ergibt, wenn eine direkte Zielerreichung nicht möglich ist. Im Einzelnen wird die Bewegungsbahn in den Bewegungsebenen durch Spline-Funktionen simuliert. Bestandteil der Modellierung ist auch, dass für das Heben des Fußes offensichtlich eine „Komfortkraft" vom zentralen Nervensystem vorgegeben ist, bei deren notwendigem Überschreiten (z. B. beim sehr starken Anheben des Fußes) die Bewegung als „unkomfortabel" beurteilt wird.

In der *Phase V* wird der Einstiegsvorgang abgeschlossen und die endgültige Fahrerhaltung eingenommen. Darunter wird die fahrerspezifische Positionierung der Füße, der Hände und des Oberkörpers verstanden. Da für diese Fahrerhaltung gute Prognosemodelle existieren und auch Bewegungsabläufe in der Fahrerhaltung bereits mit gutem Erfolg modelliert sind, wird hierauf nicht näher eingegangen. Vielmehr können die erwähnten Modelle zur Modellierung der Phase V direkt herangezogen werden.

Die zeitliche Phasensynchronisierung zeigt, dass im Mittel aller Versuche der Einstiegsvorgang innerhalb von 4,6 s abgeschlossen ist. 15 % Zeitanteil nimmt die Annäherungsphase ein, die übrigen Phasen beanspruchen jeweils etwa gleich

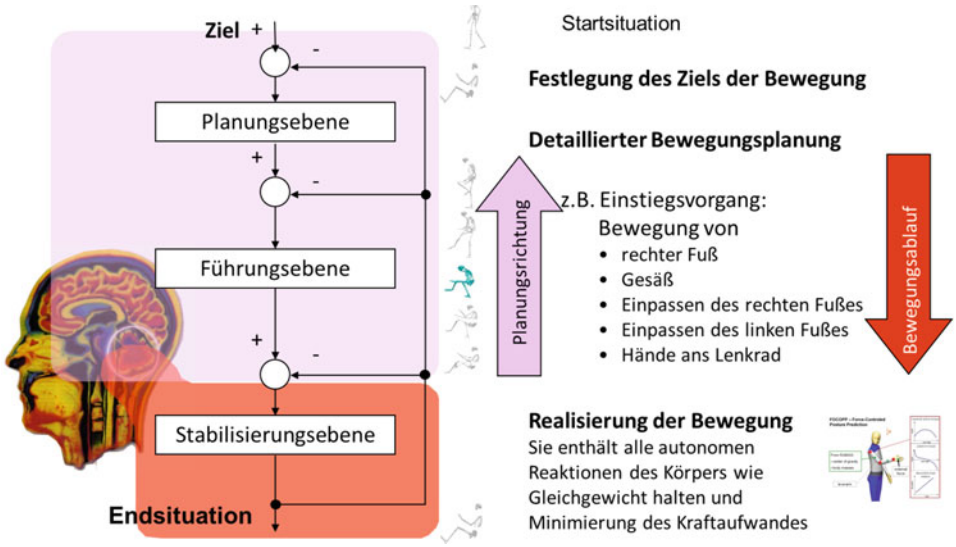


Abb. 7.114 Simulation des Einstiegsvorgangs (Schlüpferstrategie) und mentale Analogie: Planung und Führung geschieht im Großhirn, Stabilisierung im Kleinhirn und Basalganglien (siehe auch Abb. 3.5).

viel Zeit, mit Ausnahme der letzten Phase die mit 36,2 % den größten Zeitanteil beansprucht. Es zeigt sich auch deutlich, dass die einzelnen Phasen sich an den Nahtstellen überlappen, was einen glatten Bewegungsverlauf bewirkt. Eine korrekte Modellierung des Zeitaufwandes ist nach den Ergebnissen von Sabbah (2010) auch deswegen notwendig, weil eine enge Korrelation zwischen dem Zeitaufwand für den Einstiegsvorgang und dem empfundenen Diskomfort beobachtet wurde.

Während die Parameter für die Bewegungsgleichungen der führenden Körperteile zum Erreichen des Zieles sehr eng definiert sind, können andere in weiten Grenzen variiert werden, ohne das Ergebnis deutlich zu beeinflussen. Diese Parameter werden als Stabilitätsparameter bezeichnet. Es sind dies im Wesentlichen:

- Unterstützung der Bewegungskoordination durch Kopfhaltung und visuelle Bewegungskontrolle
- Gleichgewichtsstabilisierung durch Handbewegungen und -positionierung
- Bewegungsglättung durch Torso- und Beckenausrichtung

Bei alledem kann beobachtet werden wie komplexe Bewegungsabläufe zusätzlich visuell kontrolliert werden.

Die Simulation der Gesamtbewegung wird ausgehend vom Endzustand unter Berücksichtigung der funktionalen Ziele rückwärts aufgebaut. Dafür verantwortlich sind die führenden Körperteile, welche die Bewegung des Gesamtkörpers bestimmen. Ihre Bewegung wird durch das statistisch-mathematische Modell vollständig beschreiben und anhand der körpermaßzentrierten Fahrzeugmaße geschätzt. Der Gesamtkörper wird dabei als ein geführtes kinematisches System betrachtet. Die Struktur der Bewegungssimulation besteht aus den Teilschritten:

1. Festlegung des funktionalen Zieles
2. Berechnung der Stützhaltung
3. Prognose der Bewegung des führenden Körperteils
4. Prognose der Bewegung der geführten Körperteile
5. Stabilisierung durch Stabilitätsvariable.

Die Parallelität dieser Struktur zum mentalen Vorgang wird in Abb. 7.114 veranschaulicht.

Der so berechnete Bewegungsverlauf wird mit Hilfe des Menschmodells RAMSIS visualisiert. RAMSIS wird dabei über sog. Koppelpunkte mit den Bewegungsbahnen der führenden Körperteile verbunden. Es sind dies die Fußstützpunkte am linken und rechten Fuß und das Hüftzentrum, das auch für die Berechnung der Sitzposition im Sitz und für

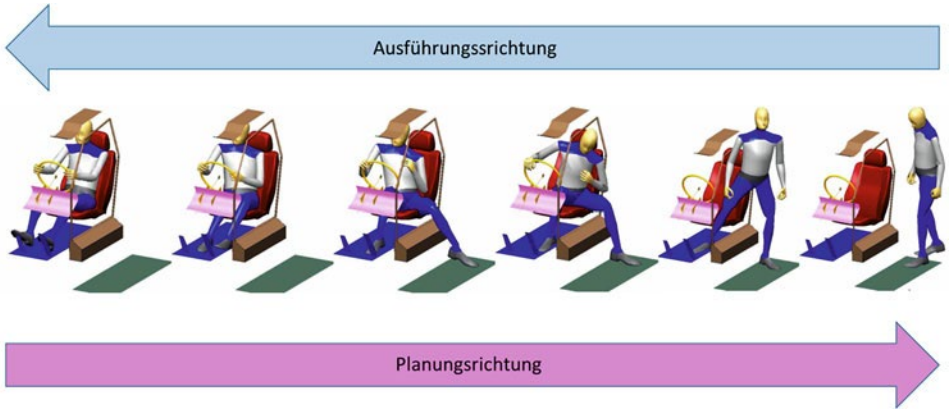


Abb. 7.115 Stützhaltungen für die Visualisierung des Einstiegvorgangs mittels RAMSIS

die Sitzhaltung benötigt wird (Abb. 7.115). Die restliche Körperhaltung wird über das RAMSIS-eigene Haltungswahrscheinlichkeitsmodell bzw. das Kraft-Haltungs-Modell berechnet. Das Erreichen der Bewegungsziele wird durch Stützhaltungen gesichert. Sie bilden die Bewegungszustände an den Grenzen der Bewegungsphasen ab. Das erwähnte Krafthaltungsmodell ist bisher für statische Haltungsprognosen ausgelegt. Die Einstiegsbewegung ist aber ein dynamischer Vorgang. Durch Anwendung des d'Alembertschen Prinzips kann das Kraft-Haltungs-Modell auch für die Simulation dynamischer Vorgänge verwendet werden. Über die Berechnung der Kräfte und des Ausnutzungsgrades der jeweiligen maximale Kraft kann ein Maß für den Diskomfort des berechneten Bewegungsablaufs gefunden werden (Sabbah 2010). Nach der Untersuchung von Zacher und Bubb (2004) ist der maximale Diskomfort, der während eines solchen Bewegungsvorgangs in irgendeinem Gelenk gefunden wird, ausschlaggebend für den insgesamt empfundenen Diskomfort.

Auf der Grundlage des hier beschriebenen Verfahrens zur Bewegungssimulation stellt Cherednichenko (2007) ein allgemeines Modell zur Prädiktion von Diskomfort beim Einstiegsvorgang vor (Abb. 7.116). Danach bestimmen die Eingangsgrößen geometrische Randbedingungen, individuelle Anthropometrie und Aufgabe (hier Einstieg nach der Schlüpfstrategie) die Bedingungen für die nun erfolgende Bewegungssimulation. Diese erlaubt aufgrund der Visualisierung in Verbindung mit dem CAD-Modell des Fahrzeugs erste Beurteilungen durch Experten und eine Kollisionsüberprüfungen. Mithilfe eines Multi-Body-Systems (entweder das RAMSIS-Krafthaltungsmodell oder z. B. ALASKA/Dynamicus, siehe auch Sabbah 2010) können dann unter Nutzung der Trägheitsmomente des verwendeten Menschmodells die Kräfte berechnet werden, die aus physikalischen Gründen benötigt werden, um den simulierten Bewegungsvorgang zu realisieren. Die errechneten Kräfte sind in Verbindung mit dem Ausnutzungsgrad der jeweiligen Gelenkfreiheitsgrade die Grundlage für eine Abschätzung des Diskomforts. Dadurch, dass der gesamte Vorgang von den geometrischen Randbedingungen und der Anthropometrie des Auslegungsmannequins abhängt, kann der Diskomfort und die Wirkung von Änderungen auf den Diskomfort bereits in einer frühen Phase der Entwicklung abgeschätzt werden.

7.6.4 Zugang zur 2. und 3. Sitzreihe

Es ist davon auszugehen, dass die Berechnung und Bewertung des Zugangs zur zweiten Sitzreihe für ein viertüriges Fahrzeug im Prinzip nach den gleichen Kriterien erfolgen kann wie für den Einstieg auf den Fahrersitz. Allerdings existieren für diesen Vorgang bisher noch keine fundierten wissenschaftlichen Untersuchungen. Im Wesentlichen kommen hierfür wohl die Schlüpfstrategie und die Plumpsstrategie infrage. Für Erstere ist es wichtig, dass genügend, auch visuell erfassbarer Raum zwischen dem unteren Anlenkpunkt der B-Säule und dem Rücksitz existiert, so

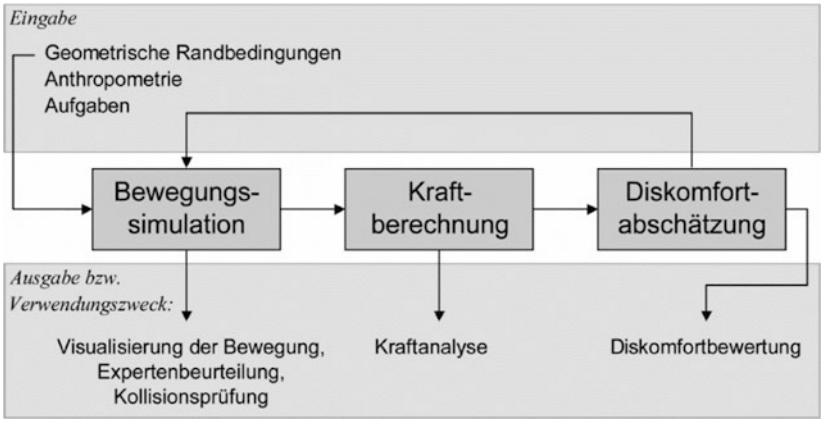


Abb. 7.116 Vorschlag der Diskomfortvorhersage auf der Grundlage von Bewegungssimulation (nach Cherednichenko 2007)

dass der rechte Fuß einen sicheren Halt im Fahrzeug findet. Für die Anwendung der Plumpsstrategie, die wohl eher von älteren Personen genutzt wird, darf die Rücksitzbank nicht zu sehr nach hinten zwischen die Radkästen positioniert sein. Der Abstand zwischen B-Säule und Rückbank muss aber so groß sein, dass die Beine ungehindert nach innen schwenken können. Gerade für den Zugang zur Rückbank hat der obere Dachrahmen eine womöglich einschränkende Wirkung, da bei den heutigen Designrichtungen ein nach hinten abgeflachtes Dach attraktiv erscheint.

Der Zugang zur hinteren Sitzbank bei einem zweitürigen Fahrzeug wurde bisher nicht wissenschaftlich untersucht. Hier spielt sicherlich die Größe der Türöffnung und die Distanz zwischen dem Vordersitz und der hinteren Karosserieflanke eine wichtige Rolle. Durch Maßnahmen, die unter dem Namen Easy-Entry bekannt sind, wird diese Distanz vergrößert, indem für das Einsteigen der Vordersitz entweder mechanisch oder durch eine elektrische Vorrichtung nach vorne gefahren werden kann[49]. In jedem Fall muss der hintere Fußraum groß genug sein, um eine Körperwendung zu ermöglichen. Das Dach muss hoch genug sein, um dem Körper genügend Raum für den kurzzeitigen Aufenthalt in gebückter Haltung zu bieten. Auch hier kommen die beiden genannten Einstiegsstrategien in abgewandelter Form vor. Die folgenden Vorgänge werden für das Betreten des Fahrzeugs von rechts beschrieben. Im Fall der Fädlerstrategieabwandlung wird das Fahrzeug zuerst mit dem rechten Fuß betreten. Der gesamte Körper wird in den Innenraum nachgezogen und dort dann eine Drehung vorgenommen, um auf dem Sitz Platz zu nehmen. Im Fall der Plumpsstrategieabwandlung wird das Fahrzeug zuerst mit dem linken Fuß betreten. Der Fuß wird dabei möglichst weit innen auf dem Fahrzeugboden abgesetzt. Nun wird versucht den Körper mit dem Gesäß voraus nach innen zu ziehen und direkt auf dem Sitz zu schieben.

Da bei den heutigen Fahrzeugkonzepten keine eigenen Türen für die dritte Sitzreihe – sofern überhaupt vorhanden – vorgesehen sind, ergeben sich für den Zugang dorthin die gleichen Probleme wie für den Zugang zur hinteren Sitzreihe in einem zweitürigen Fahrzeug. Da aber für die zweite Sitzreihe keine verstellbaren Rückenlehen vorzusehen sind, kann man hier durch entsprechende Klapplösungen für verbesserten Zugang sorgen.

Während für die Platzierung der Türinnengriffe bei einem viertürigen Fahrzeug ähnliche Kriterien gelten wie für die Vordersitze, ergibt sich bei zweitürigen Fahrzeugen und für Passagiere der dritten Sitzreihe ein spezifisches Problem. Es muss gewährleistet sein, dass das Fahrzeug auch ohne Hilfe einer zweiten Person verlassen werden kann. Dazu muss sichergestellt sein, dass beim Vorgleiten des vorderen Sitzes der Zugriff zum Türöffner freigegeben wird. Ist dies aus konstruktiven oder ergonomischen Gründen für den vorne Sitzenden nicht möglich, so ist ein spezieller Türöffner für die hintere Sitzreihe vorzusehen.

49 Frühere Lösungen, bei denen der gesamte Vordersitz nach vorne geklappt werden konnte und damit einen größeren Zutrittsraum eröffnete, sind heute wegen der vorgeschriebenen Rückenlehnenverstellung nicht mehr möglich. Allerdings existieren auch Parallelogrammmechaniken, bei denen Lehne und Sitzfläche nach nach vorne klappen, ohne eine Verschiebung in den Sitzschienen zu benötigen!

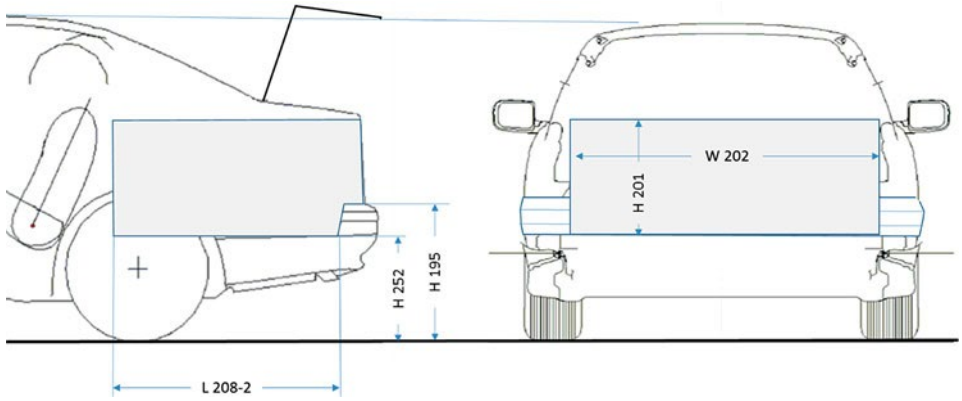


Abb. 7.117 Den Laderaum maßgeblich bestimmende Größen

7.7 Beladen

Da das Fahrzeug nicht nur als Transportmittel für Personen sondern auch für Güter herangezogen wird, ist das Nutzvolumen des Heckbereichs von besonderem Interesse. Nicht nur kommerzielle Fahrzeugnutzer wie Handwerker oder Taxi- und Transportunternehmen, sondern auch der private Nutzer des Fahrzeuges ist auf ein gewisses Nutzvolumen und die komfortable Beladbarkeit angewiesen, sei es um gelegentliche Einkäufe zu verstauen oder größere Objekte wie Getränkekisten, Umzugskartons oder beispielsweise eine Waschmaschine.

7.7.1 Geometrie

Neben den reinen Öffnungsmaßen der Heckklappe sind nach Karwowski et al. (1993) die Höhe, die Form und Lage der Ladekante von besonderem Interesse. Abbildung 7.117 gibt die wesentlichen den Laderaum bestimmenden Größen wieder.

Abhängig vom Gesamtfahrzeugkonzept wird dabei mehr oder weniger Augenmerk auf die Gestaltung des Heckbereiches gelegt. Stufenhecklimousinen haben einen relativ geringen Ladekomfort, weil der den Kofferraum abdeckende Heckdeckel unterhalb der Heckscheibe angeschlagen ist und damit nur eine begrenzte Öffnungsweite zulässt. Ist das Fahrzeug mit einem versenkbaren Verdeck ausgerüstet, wird der Laderaum durch das Absenken des Faltdaches sogar noch weiter eingeschränkt. Dennoch ist die Ladekante auch hier so niedrig wie möglich anzuordnen. Aus Gründen der Karosseriesteifigkeit und um dem Nummernschild eine Befestigungsfläche zur Verfügung zu stellen, wird der Bereich zwischen den Heckleuchten aus gestalterischen Gründen oft geschlossen. Bei Fließhecklimousinen, bei denen die Heckklappe oberhalb des Heckfensters im Dach angeschlagen ist, kann die Heckklappe vom Stoßfänger ab über die gesamte verfügbare Höhe geöffnet werden, wodurch eine größere Beladungsöffnung, sowohl in der Höhe als auch in der Breite angeboten werden kann. Bei Kombilimousinen steht die Heckklappe meist noch etwas steiler und reicht vom Dach bis in den Stoßfänger hinein, wodurch die Ladekante noch tiefer[50] liegen kann. Ist die Höhe und Tiefe des Stoßfängers vom Ladegut überwunden, muss die Heckklappendichtung und ggf. das auskragende Heckschloss passiert werden. Die nachfolgende Stufe in den Kofferraumboden (H195–H252) hinein fällt je nach Fahrzeugkonzept höher oder geringer aus, ist aber aus ergonomischer Sicht so gering wie möglich auszuführen, idealerweise in einer Ebene mit der Kante des Stoßfängers (H195 = H252). Um den Widerspruch zwischen größtmöglichem Ladevolumen und ebener Ladekante aufzulösen wird die Verwen-

50 Der Fiat Tempra Station Wagon (1993-96) erlaubte es, den Stoßfänger als eine Art „Tailgate" zusätzlich nach unten zu klappen, was die Ladekante zusätzlich verringerte. Citroën hat in seinen Kombifahrzeugen (z. B. Citroën C5 Break (2004-08) die Option, das hydropneumatische Fahrwerk und damit auch die Ladekante um mehrere Zentimeter abzusenken.

dung eines versetzbaren Ladebodens[51] angeboten, der je nach Beladungsanforderung eine Anpassung an die Bedürfnisse erlaubt (Abb. 7.118). Die Ladekante (H195) von der Standfläche bis zum höchsten Punkt im unteren Heckflanschverlauf sollte ein gewisses Maß nicht überschreiten. Dieses Maß wird von einer standardisierten Beladungssituation vorgegeben, bei der eine kleine Person mit einer gefüllten Getränkekiste[52] sich der Heckklappenöffnung nähert und die Kiste – ohne diese wesentlich anzuheben – in den Heckraum stellen kann. Eine kleine Frau[53] benötigt eine Ladekante von ca. 500 mm über dem Boden, um eine solche, mit den Händen getragene Kiste ohne Anheben in den Laderaum zu stellen. Bei 600 mm über der Grundebene müssen bereits 50 % der Männer und 90 % der Frauen die Kiste anheben. Bei 700 mm müssen alle Männer und Frauen die Kiste soweit anheben, dass die Unterarme fast waagerecht sind. Bei einem Kistengewicht von 10 bis 20 kg ist hier somit eine erhebliche Hebeleistung[54] zu vollführen. Die Wahl der Höhe der Ladekante erfolgt hier prinzipiell so tief wie möglich aufgrund der Bedürfnisse der Zielgruppe im Umfeld der Wettbewerbsfahrzeuge.

Müller (2010) berichtet von systematischem Be- und Entladeversuchen an einem Vollheckfahrzeug aus dem Mittelklassesegment. Die Bewegungsabläufe wurden mit einer Videokamera in Seiten- und Vorderansicht aufgenommen. Die Auswertung dieser Bewegungsabläufe lässt keinen bedeutenden Unterschied zwischen Be- und Entladevorgang erkennen. Der dynamische Raumbedarf ist für beide Vorgänge nahezu identisch. Bei den mit einem 20 kg schweren Hartschalenkoffer durchgeführten Beladungsvorgängen wurden zwei unterschiedliche Bewegungsstrategien beobachtet. Jede dieser Strategien lässt sich in die Phasen „Koffer anheben" – „Körper relativ zum Gepäckstück orientieren" – „Koffer abstellen" und „Koffer ablegen und positionieren" einteilen (siehe Abb. 7.119).

Abb. 7.118 Ausziehbarer Ladeboden des Opel Insignia Sports Tourer (2013)

- Die sog. „Ein-Hand"-Strategie wurde bei allen männlichen Probanden beobachtet. Hierbei wird der Koffer mit der rechten Hand in gebeugter Oberkörperhaltung gegriffen. Sodann wird er durch Aufrichten des Oberkörpers vom Boden abgehoben. Dabei wird der Körper des Probanden relativ zum Gepäcksvolumen orientiert und die linke Hand zur Führung an die Seitenfläche des Koffers angelegt. Nach dem Abstellen des Koffers auf der Ladefläche wird dieser auf die Seitenfläche gekippt und schließlich mit beiden Händen in den Kofferraum geschoben.
- Die „Zwei-Hand"-Strategie wurde bei der weiblichen Probandin beobachtet. Der Koffer wird dabei zunächst mit der rechten Hand gegriffen und ebenfalls durch Aufrichten des Oberkörpers angehoben. Anschließend wird er zusätzlich mit der linken Hand am Griff gefasst. Auch hier wird der Körper relativ zum Gepäckvolumen ausgerichtet. Mit Unterstützung des Oberschenkels und unter Anwinkelung der Arme wird er auf der Ladekante abgesetzt. Anschließend wird er auf die Ladefläche abgelegt, indem die rechte Hand die rechte Kofferkante positioniert.

Mit Kenntnis dieser im Detail beschriebenen Strategien und unter Anwendung des Kraft-Haltungs-

51 Für den Opel Insignia Sports Tourer (2013) ist ein ausziehbarer Ladeboden optional lieferbar, mit dem auch die Tiefe des Stoßfängers leicht überbrückt werden kann.

52 Eine handelsübliche Getränkekiste „Deutscher Brunnen" mit zwölf 0,7-Liter-Glasflaschen hat die Maße: Länge 353 mm, Breite 275 mm, Höhe 345 mm, wiegt leer ca. 6 kg und gefüllt ca. 18 kg.

53 Die kleine Frau wird angenommen als das 5. Perzentil der Körperhöhe der deutschen Population.

54 Nach einer Empfehlung des Bundesamtes für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (baua) sollten Männer über eine Strecke von 5 m nicht mehr als 20 kg heben (Frauen 10 kg). Darüber hinaus verdoppelt sich die Lastbewertung bei einer arbeitstechnischen Bewertung der Belastung.

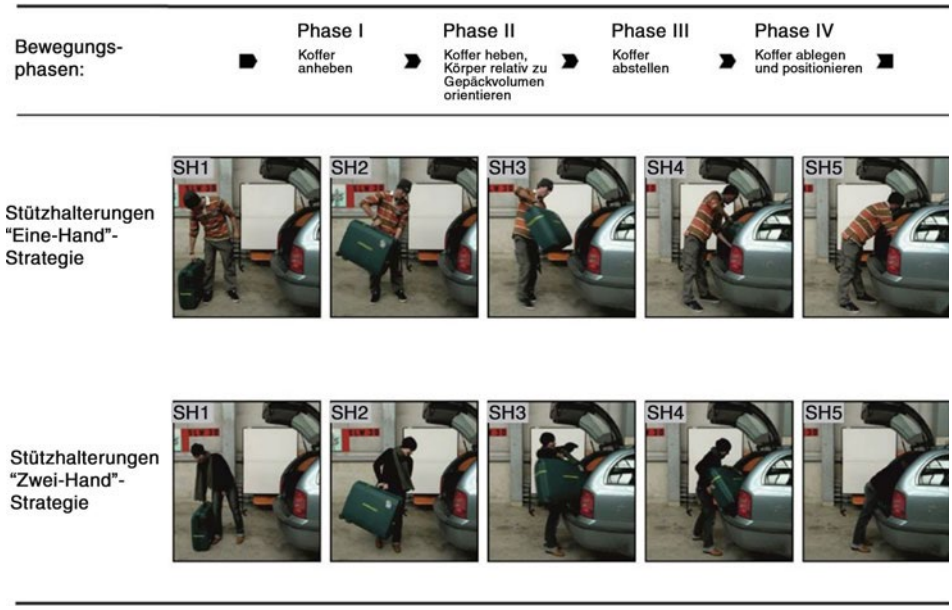


Abb. 7.119 Bewegungsvorgang beim Beladen des Kofferraumvolumens mit einem Koffer unter Anwendung der „Ein-Hand"-Strategie und der „Zwei-Hand"-Strategie (aus Müller 2010)

modells in RAMSIS ist es möglich, die genannten Bewegungsabläufe mit den verschiedenen Auslegungsmanikins (es genügt hier der große Mann MLMM und die kleine Frau FSMM) zu modellieren. Dadurch können die notwendigen Bewegungsvolumina und insbesondere die Mindestöffnung des Gepäcksraums identifiziert werden.

7.7.2 Bedienbarkeit

Unter ergonomischen Gesichtspunkten spielt die Bedienbarkeit der Gepäckraumöffnung eine wichtige Rolle. Die Höhe des Öffnungsgriffs kann als Kompromiss zwischen der Position der frei hängenden Hand der kleinen Frau und des großen Mannes gefunden werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in vielen praktischen Anwendungsfällen der Gepäckraum geöffnet werden muss, wenn man gleichzeitig schwere Gepäckstücke in der Hand hat und diese womöglich zum Öffnen nicht abstellen kann. Als Lösung hat sich hierfür eine Gestiksteuerung herauskristallisiert, bei der durch eine entsprechende Bewegung des linken oder rechten Fußes (beobachtet beispielsweise durch die Rückfahrkamera) ein automatisches Öffnen erreicht wird, wenn der Nutzer den Schlüssel des Fahrzeugs bei sich trägt. Zum Hantieren an der geöffneten Heckklappe muss diese soweit nach oben geklappt sein, dass sich auch der große Mann beim Vorbeugen nicht daran stößt. Auch diese Bedingung kann mithilfe des entsprechenden Auslegungsmanikins überprüft bzw. ausgelegt werden. Diese geöffnete Heckklappe erfährt aber eine weitere Einschränkung durch die kleine Frau: es muss sichergestellt sein, dass sie mit der ausgestreckten Hand den Griff zum Zuziehen erreichen kann. Ein Kompromiss zwischen den genannten beiden Extremen, verschiedene Öffnungswinkel individuell zu programmieren ist durch Nutzung der relevanten Manikins möglich. Eine andere Lösung besteht darin, dass Öffnen und Schließen elektromotorisch zu unterstützen. Ein Problem stellt dann die Lokalisation des Schalters dar, der das Schließen initiiert. Er muss so angebracht werden, dass der Nutzer durch den Schließvorgangs sich nicht selbst verletzt. Eine Möglichkeit besteht zwar darin, das Öffnen und Schließen prinzipiell über die Betätigung des Schlüssels ferngesteuert vorzunehmen. Allerdings muss selbst unter dieser Voraussetzung das

Öffnen und Schließen von Hand möglich sein. Die simpelste Variante zur Auflösung dieses Zielkonfliktes besteht darin, die Befestigung einer textilen Schlaufe vorzusehen, damit auch kleine Personen die Heckklappe zum Schließen erreichen.

Die Anforderungen an den Zugang zum Kofferraum wird nicht ausschließlich durch die Anthropometrie des Fahrers gebildet. Viele Fahrzeuge werden täglich für den Transport von Kindern und Jugendlichen eingesetzt, die häufig während eines kurzen Haltes aussteigen und ihre Schul- oder Sporttaschen eigenständig aus dem Fahrzeug entnehmen. Wenn der Fahrer zum Schließen der Heckklappe das Fahrzeug verlassen muss, kann das für den Nutzer einen gravierenden Diskomfort und gegebenenfalls Gefahrensituationen erzeugen.

7.8 Berücksichtigung spezifischer Nutzergruppen

7.8.1 Ältere Fahrzeugnutzer

Die Veränderung der sog. Alterspyramide und die damit verbundene Zunahme an älteren Personen sowie deren Bedürfnis nach Erfüllung des Wunsches nach Mobilität, das nur durch den Pkw in zufriedenstellender Weise zu erfüllen ist, ist für die Fahrzeugindustrie Anlass, sich um diesen Personenkreis verstärkt zu kümmern, zumal dieser Personenkreis auch als hinreichend zahlungskräftig für den Neukauf von Fahrzeugen eingeschätzt wird. Das Durchschnittsalter heutiger Neuwagenkäufer liegt bei 50,6 Jahren, wobei 29 % älter als 60 Jahre sind (Dudenhöffer 2008). Um für diesen Kundenkreis konstruktive Vorgaben zu konkretisieren, ist es notwendig, genauere Kenntnis über die altersspezifischen Veränderungen zu haben. Eine einheitliche Beschreibung des Alterungsprozesses stößt jedoch auf die Schwierigkeit, dass die interindividuelle Varianz in den einzelnen Lebensabschnitten größer ist, als die altersbedingte Varianz der Leistungsfähigkeit (Schmidt und Lang 2007). Dessen ungeachtet unterscheidet die Weltgesundheitsorganisation folgende Altersabschnitte:

- Jugendliches bzw. jugendbetontes Erwachsenenalter (15–30 Jahre)
- Reifealter (31–45 Jahre)
- Umstellungs- oder mittleres Alter (46–60 Jahre)
- Lebensabschnitt des älteren Menschen (61–75 Jahre)
- Lebensabschnitt des alten Menschen (76–90 Jahre)
- Lebensabschnitt des sehr alten Menschen (mehr als 90 Jahre)
- Langlebige (mehr als 100 Jahre)

Da jedoch eine rein am kalendarischen Lebensalter orientierte Beschreibung des Alterungsprozesses unrealistisch ist, wird nach Weineck (2004) zwischen den beiden folgenden Alterungsprozessen differenziert:

- Physiologisches Altern, das sich auf die synchrone degenerative Veränderung aller Organe und Gewebe bezieht, welches als „normales" Altern verstanden wird.
- Pathologisches Altern, das durch stark hervortretende Insuffizienzbereitschaft eines Organs oder Systems charakterisiert ist und mit schweren körperlichen und geistigen Einbußen einhergeht.

Zu der ersten und hier vor allem interessierenden Kategorie des Alterns gehören alle altersspezifischen Änderungen, die im Folgenden kurz geschildert werden. Allerdings sind für die Definition des „gesunden Alten" auch die häufigsten pathologischen Einschränkungen mit in Betracht zu ziehen, vor allem Bluthochdruck und Arthrose, welche zu plötzlich und unerwartet auftretender Fahrerunfähigkeit (Herzinfarkt, Schlaganfall) und lokaler extremer Bewegungseinschränkung führen können.

Zu den degenerativen Veränderungen gehört vor allem das Nachlassen der Sinnesleistungen, insbesondere die Reduktion der *Akkommodationsfähigkeit des Auges* (siehe ◘ Abb. 7.55) verbunden mit einer Zunahme der Reaktionszeit. Nach Hager (2009) haben von den über 75-jährigen (Mehrfachnennungen möglich)

- 70 % Katarakt (grauer Star): voranschreitende Trübung der Augenlinse, damit einhergehend Sehschärfeverlust, Erhöhung der Blendempfindlichkeit, schlechtere Kontrastwahrnehmung und verzögerte Hell-Dunkel-Adaption,
- 5 % Glaukom (Grüner Star): zu hoher Augeninnendruck, wodurch die Nervenfasern verletzt werden und zum Teil absterben. Folge:

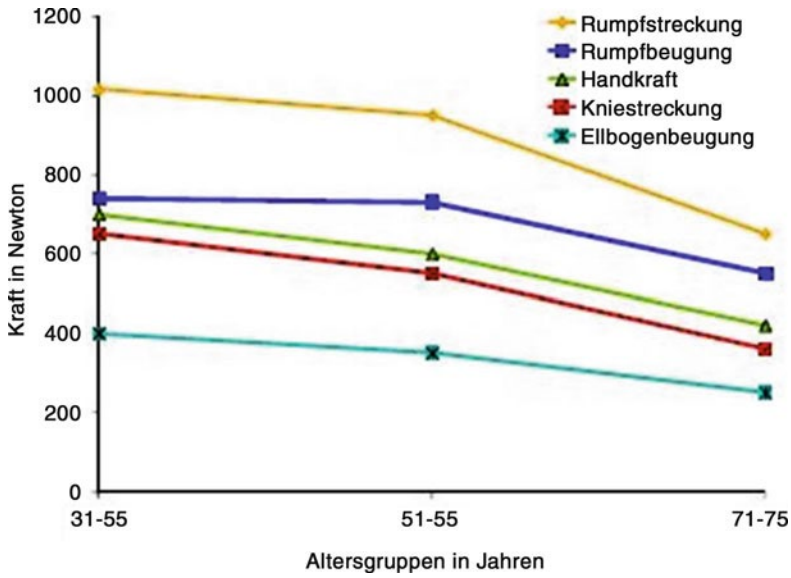


Abb. 7.120 M;aximale isometrische Muskelstärke in Abhängigkeit des Alters (Viitasalo et al. 1985)

Einengung des Gesichtsfeldes, im Extremfall Erblindung des betroffenen Auges,

- 30 % altersabhängige Maculadegeneration (AMD): Zellen auf der Macula (gelber Fleck, Ort des schärfsten Sehens) sterben ab. Folge: das Sehvermögen in der Mitte des Blickfeldes nimmt stark ab.

Auch das *Hörvermögen* ist altersbedingten Veränderungen unterworfen. Insbesondere wird der erfassbare Lautstärkepegelbereich reduziert, speziell die obere Grenzfrequenz nimmt ab, die Signalselektionsfähigkeit wird geringer und die akustische Ortsfindung ist reduziert. Für das *haptische Empfinden* kann ebenfalls angenommen werden, dass die zuständigen Rezeptoren altersbedingten Veränderungen unterliegen. So leiden ältere Menschen unter einem Sensitivitätsverlust und können beispielsweise Druckunterschiede schwerer unterscheiden (zusammenfassend zitiert aus Brenner 2013).

Weiterhin sind *Gedächtnisleistung bzw. Intelligenz* altersspezifischen Veränderungen unterworfen. Man unterscheidet die sog. fluide Intelligenz, die sich in der Schnelligkeit der Reaktion und Kombinationsfähigkeit zeigt, und die kristalline Intelligenz, welche quasi erworbenes Wissen repräsentiert. Während erstere bereits ab dem 30. Lebensjahr eine deutliche Reduktion erfährt, bleibt letztere über lange Zeit nahezu unverändert. Über viele Jahre erworbenes „Expertenwissen" kann in bestimmten Situationen oftmals sogar die reduzierte fluide Intelligenzleistung im Effekt kompensieren. Man geht davon aus, dass eine merkliche Einbuße der kognitiven Fähigkeiten im Durchschnitt erst ab dem 75. Lebensjahr auftritt. Viele Defizite im Bereich der Veränderung der Sinnesorgane und der kognitiven Fähigkeiten können partiell durch entsprechende Assistenzsysteme kompensiert werden. Die Nutzung von Assistenzsystemen wird deshalb von vielen Experten gerade für ältere Autofahrer empfohlen (diesbezüglich ► Kap. 9).

Gerade für die altersgerechte Gestaltung des Fahrzeugpackaging ist das Nachlassen der Körperkräfte und der Beweglichkeit von besonderem Interesse. Brenner (2013) stellt hier einige Beispiele aus der Literatur zusammen (Abb. 7.120, 7.121, 7.122 und 7.123). Einen Überblick über Literaturdaten zur altersabhängigen Veränderung der Kräfte findet sich in D'Souza (2014).

Wie die vorangegangenen Kapiteln gezeigt haben, spielen für die ergonomische Gestaltung des Fahrzeugpackagings Menschmodelle eine entscheidende Rolle. Selbst wenn diese Aussagen zu Kräften und Bewegungsbereichen machen, entbehren sie bisher Aussagen zu altersabhängigen Veränderungen. Amereller (2014) hat die altersabhängige

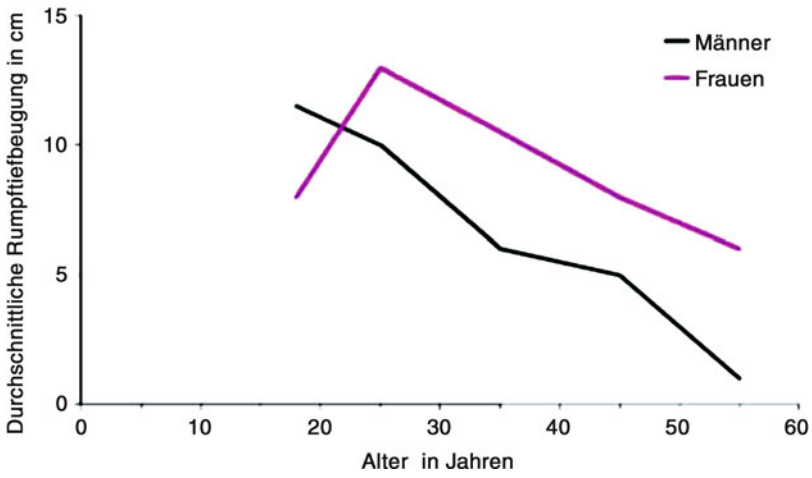


Abb. 7.121 Durchschnittliche Rumpftiefbeugen zur Bestimmung der Wirbelsäulenbeweglichkeit (Richter 1974)

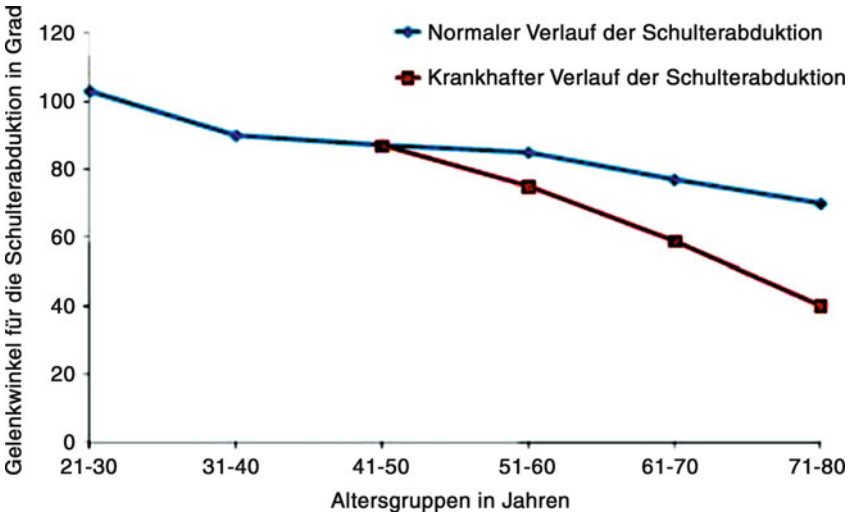


Abb. 7.122 Schulterbeweglichkeit im Alter (Clarke et al. 1975)

Gelenksbeweglichkeit an einer Population von über 300 Probanden systematisch untersucht mit dem Ziel, diese Ergebnisse in dem Menschmodell RAMSIS zu etablieren. Bei einem Vergleich der Beweglichkeit von Männern und Frauen zeigt sich bei fast allen Gelenken – mit Ausnahme der Hüftdrehung – eine signifikant höhere Gelenkigkeit der Frauen. Auch der in der Literatur behauptete negative Zusammenhang von BMI und Beweglichkeit konnte zum Teil nachgewiesen werden, wobei allerdings einschränkend zu bemerken ist, dass die Versuchspersonen mit einem BMI von 22,6 +/– 3,0 eher schlank waren und damit der erwartete Effekt auch nicht so groß ausfallen konnte (siehe auch ▶ Abschn. 4.2.4.2).

Wegen der komplexen Verhältnisse bezüglich der Körperkräfte bezieht sich D'Souza (2014) nicht direkt auf tabellarische Kräftedaten, sondern befasst sich genauer mit den Skalierungsansätzen der Kräftemodellierung in Anybody (siehe hierzu ▶ Abschn. 5.2.2.3, sowie ▶ Kap. 4), wobei die originalen Skalierungsalgorithmen in Anybody den Einfluss von Alter und Geschlecht sowie die Adressierung unterschiedlicher funktionaler Muskelgruppen vermissen lassen. Sie untersucht mit den Altersgruppen 50–59, 60–69 und 70–79 als Repräsentanten für die oberen Körperpartien das Ellenbogengelenk und für die unteren das Kniegelenk. In Übereinstimmung mit den in der Literatur geschilderten Ergebnissen zeigen dabei Frauen nur ca. 50 % der entsprechen-

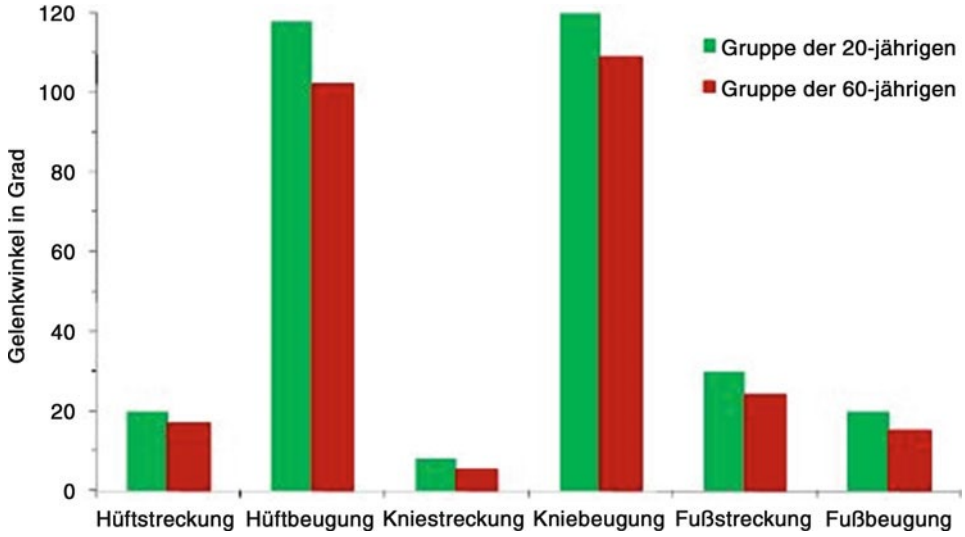


Abb. 7.123 Abbau der Hüft-, Knie- und Fußbeweglichkeit im Alter (Lark et al. 2004)

den Kräfte der Männer. Die maximalen Momente am Ellenbogengelenk wie am Kniegelenk nehmen mit zunehmendem Alter ab, wobei die Abnahme bei Männern stärker ist als bei den Frauen. Allerdings gibt es bezüglich dieser Werte erhebliche individuelle Streuungen. Eine Faktorenanalyse zeigt sowohl für die Kräfte im Ellenbogen- wie im Kniegelenk als Haupteinflussfaktoren das Geschlecht und die Körperelementlänge (50 %), an zweiter Stelle die Körpermasse (16 %) und an dritter Stelle das Alter (12 %). Es wurden Gleichungen entwickelt, die eine Vorhersage von Ellenbogenmoment bzw. Kniegelenkmoment ermöglichen und die in Anybody implementiert werden können.

Brenner (2013) hat in einer IST-Analyse Schwachpunkte ausfindig gemacht, die sich für ältere Personen besonders stark bemerkbar machen, aber auch von jüngeren Personen kritisiert werden. Das sind für das Ein-und Aussteigen besonders hohe bzw. breite Türschweller, die Sitzhöhe, die optimal an die individuelle Anthropometrie angepasst sein sollte, die Sitzwangenhöhe, die Lage der A-Säule und die Dachkantenhöhe sowie die Verkleidung der Lenksäule. Bezüglich der Erreichbarkeit wird besonders der Gurt bemängelt, der nur durch Körperdrehung erreichbar ist und dessen feststehendes Schloss nicht freistehend gestaltet ist. Wenn der Kraftaufwand für die Betätigung eines Fahrzeugelements zu groß ist, missfällt dies allen Nutzergruppen, unabhängig vom Alter. Besonders gilt das für das Öffnen, weniger für das Schließen der Türen, aber auch für andere Bedienelemente (z. B. Zündschloss oder Betätigung des Handrades für die Sitzlehnenverstellung). Bezogen auf die Sicht werden besonders negative Bewertungen für die mangelnde „Sicht nach draußen" vergeben, wobei Ältere notwendige Körperbewegungen zusätzlich bemängeln. Weitere Aspekte beziehen sich auf die Größe und Lage von Schalter und Piktogrammen. Im Bereich „Sitze" fällt auf, dass Ältere prinzipiell höher sitzen wollen als Jüngere. Ein weiterer Kritikpunkt ist die Armlehne, die teilweise als vom Körper zu weit entfernt empfunden wird.

Auf der Grundlage dieser Kritikpunkte hat Brenner an Sitzkisten, die mit den in der IST-Analyse benutzten Fahrzeugmodellen identisch waren, Modifikationen vorgenommen, um zu untersuchen, ob die ergonomischen Verbesserungen wahrgenommen werden und ob Verbesserungen, die ältere Fahrzeugnutzer zufriedenstellen, womöglich von Jüngeren abgelehnt werden. Für die Versuche wurden wie bei der IST-Analyse die drei Kategorien 30-, 50- und 70-Jährige gebildet. Bei dem Cluster „Ein- und Ausstieg" führen alle Verbesserungen bei jeder Altersgruppen zu günstigerer Beurteilung. Dabei fällt auf, dass die jüngeren Nutzer oftmals bereits mit einer moderaten Verbesserung zufrieden sind, wobei eine Steigerung, die bei den älteren noch zu

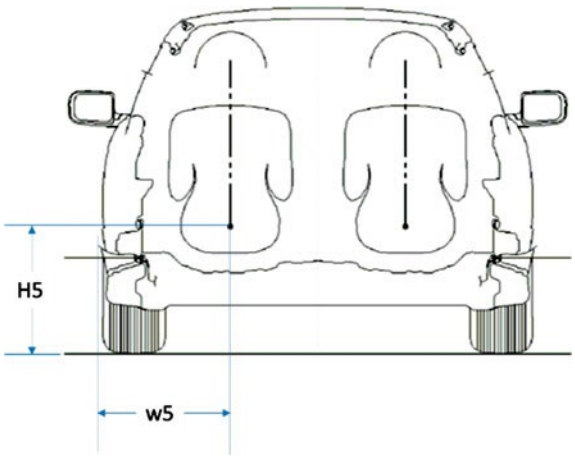


Abb. 7.124 Für den Ein- und Ausstieg relevante Maße (nach Brenner 2013), H5 = Höhe des SgRP über der Fahrbahn, w5 = Abstand Sitzmitte zu äußerer Kante des Türschwellers

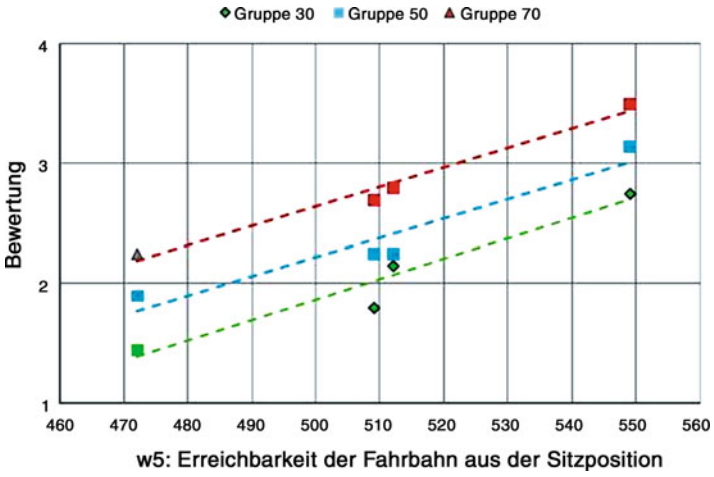


Abb. 7.125 Bewertung (1 = „sehr gut"; 5 = „ungenügend") des Maßes w5 „Erreichbarkeit der Fahrbahn aus der Sitzposition" für Sportwagen und Mittelklassefahrzeuge durch drei Altersklassen (aus Brenner 2013)

einer Verbesserung des Urteils führt, keinen Effekt mehr zeigt. In Brenners Arbeit finden sich detailliert Angaben zur Position des Radio-Klima-Bedienfeldes, des Becherhalters, der Armlehne (welche interessanterweise von den älteren eher abgelehnt wird) und zum Freigang von Bedienelementen (z. B. Sitzverstellung, Gurtschloss). Im Allgemeinen fällt auf, dass die älteren Nutzer meist kritischer sind und Forderungen erheben, die sekundär auch von den jüngeren als Verbesserungen empfunden werden.

Aus den gewonnenen Ergebnissen konnten auch unmittelbare Angaben zu konstruktiven Verbesserungen gewonnen werden. Dabei ist es notwendig, für jede Fragestellung **ein** beschreibendes Maß zu finden, das der Ausprägung der Bewertung zugeordnet werden kann. So ist ein beschreibendes Maß für das Aussteigen der Abstand w5 zwischen der Mitte des Fahrzeugsitzes und der äußeren Kante des Türschwellers (Abb. 7.124). Dafür zeigen sich für die Kategorien Sportwagen und Mittelklassewagen auch eindeutige altersspezifische Abhängigkeiten hinsichtlich der Bewertung (Abb. 7.125). Ähnliches ergibt sich für die Bewertung der Sitzhöhe über der Fahrbahn H5, wobei hier zunächst eine Erhöhung des Fahrzeugsitzes positiv bewertet wird, was sich aber bei weiterer Steigerung wieder umkehrt. Interessant ist in jedem Fall die Parallelität der Kurvenverläufe für die drei Altersgruppen (Abb. 7.126).

Am Beispiel des Freigangs „Bedienelement-Sitzverstellung" wird sichtbar, dass in die Bewertung

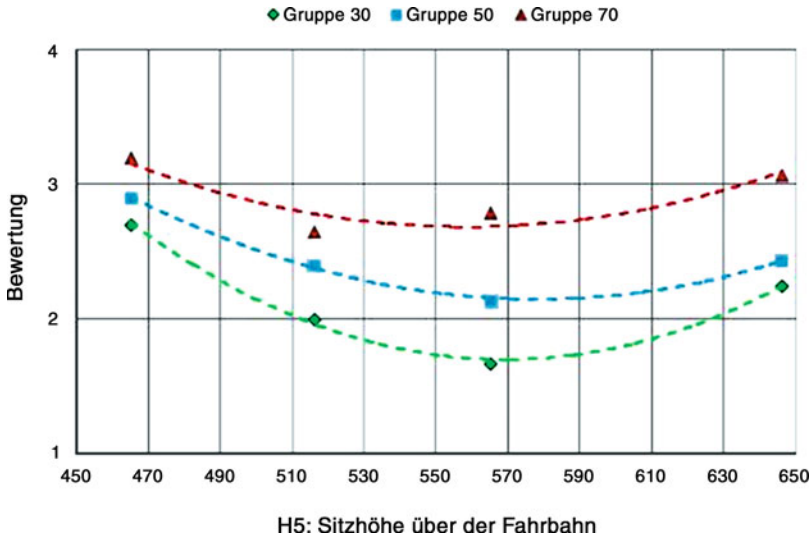


Abb. 7.126 Bewertung (1 = „sehr gut"; 5 = „ungenügend") des Maßes H5 „Sitzhöhe über der Fahrbahn" für Sportwagen und Mittelklassefahrzeuge durch drei Altersklassen. (aus Brenner 2013)

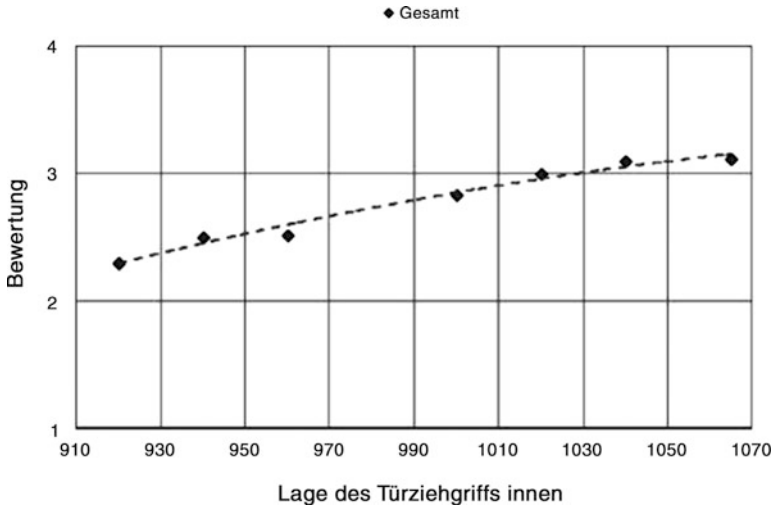


Abb. 7.127 Bewertung des Maßes „Erreichbarkeit Türzuziehgriffs" definiert als radialer Abstand des Türgriffs vom individuell eingestellten Sitz-Mittelpunkt (aus Brenner 2013)

der Maße auch Erwartungen bezüglich des jeweiligen Fahrzeugsegments einzubeziehen sind. In einem größeren Fahrzeug wird auch mehr Raum erwartet (gute Bewertung bei Sportwagen bereits bei 50 mm, bei SUVs erst bei 65 mm). Wie die Beispiele Lage/Erreichbarkeit-Türzuziehgriff innen (Abb. 7.127) und Lage/Erreichbarkeit-Kofferraum-Einladehöhe (Abb. 7.128) zeigen, finden sich auch Zusammenhänge, die vollkommen unabhängig vom Alter der Probanden sind. In beiden Fällen führen alters- und fahrzeugklassenunabhängige geringere Abstände zu besserer Bewertung.

Aus den Untersuchungen von Brenner (2013) ist festzuhalten: Die durchschnittlichen Bewertungen älterer Nutzer sind entweder gleich oder schlechter als die der jüngeren, niemals jedoch besser und in vielen Fällen besteht zwischen jüngeren und älteren kein Unterschied in der Bewertung. Aus der Untersuchung können folgende Haupthandlungsfelder definiert werden, in denen eine besondere Berücksichtigung älterer Nutzer notwendig ist: Ein- und Ausstieg, Kraftaufwand, Lage und Erreichbarkeit, Sichtbedingungen und Form der Bedienelemente. Insgesamt bestätigt die Untersuchung das Konzept bzw. die Forderung

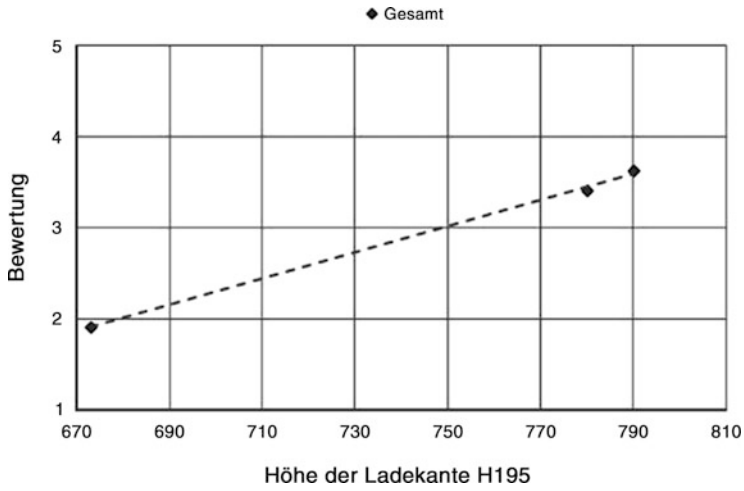


Abb. 7.128 Bewertung des Maßes H195 „Ladekante" (aus Brenner 2013)

Abb. 7.129 Drehsitz „Swing-Up" (Mercedes-Benz 2010)

des „Design for all", nämlich keine Unterschiede für unterschiedliche Altersgruppen vorzusehen, sich aber immer an den höchsten Forderungen zu orientieren.

Viele Hersteller unternehmen Anstrengungen, seniorengerechte Gestaltung nach dem Motto „Design for all" zu bewerkstelligen. Darüber hinaus wurden aber auch Einstiegshilfen entwickelt, die von Mercedes-Benz in einem Sonderausstattungsprogramm in Form von Schwenk- und oder Drehsitzen in verschiedenen Varianten angeboten werden (Abb. 7.129).

Dass es auf dem Markt offiziell kein „Seniorenfahrzeug" gibt, ist dem Umstand zuzuschreiben, dass das Image eines solchen Fahrzeugs nicht verkaufsfördernd ist und von den Betroffenen als stigmatisierend abgelehnt wird. Selbst bei vorhandenen Einschränkungen, Behinderungen und Gebrechen ist es von den Fahrzeugnutzern nicht gewünscht, dass dies auch am Fahrzeug erkennbar ist. Das vielversprechende Konzept eines Kleinwagens mit geringen, überschaubaren Abmessungen, einer hohen übersichtlichen Sitzposition und großen, leichtgängigen Schiebetüren für den Einstieg auf den Fahrerplatz fand nur eine eingeschränkte Marktresonanz. Der PSA Konzern hatte im Jahre 2005 mit dem Peugeot 1007[55] (Abb. 7.130). ein derartiges Fahrzeug auf den Markt gebracht und dabei die Bedürfnisse von

55 Peugeot 1007 (2005): Länge 3731 mm, Breite 1686 mm, Höhe 1620 mm, Radstand 2315 mm.

Abb. 7.130 Peugeot 1007 (2005)

Abb. 7.131 Opel Mokka (2013)

Familien und Senioren im urbanen Lebensraum konsequent umgesetzt (Abb. 7.130). Zwischen 2005 und 2009 wurden jedoch nur insgesamt 120.000 Einheiten des mutigen Konzeptes gebaut, was eher an der mangelnden Akzeptanz der potentiellen Kunden als an der technischen Umsetzung oder der Qualität gelegen hat. Erfolgreicher im Segment der generationsgerechten Fahrzeuge sind kleine Geländewagen, die als „small SUV" ebenso beherrschbare Abmaße, guten Ein- und Ausstieg und zudem die Optik eines vollwertigen Automobils mit modischen Akzenten bieten. Der 2013 eingeführte Opel Mokka[56] (Abb. 7.131). hat bereits in seinem ersten Jahr eine ähnliche Produktionszahl wie der Peugeot 1007 in fünf Jahren erzielt und trifft die fast identische Zielgruppe Familien und „Empty Nesters"[57]. Diese beiden Beispiele illustrieren sehr anschaulich, dass technisch sinnvolle Konzepte mit ergonomischen Attributen eine entsprechende „Verpackung" benötigen, um als Mehrwert wahrgenommen zu werden und nicht als Nachweis rein rationeller Notwendigkeiten.

7.8.2 Kinder

Ein wichtiges Nutzungsszenario für das Automobil ist die Verwendung als Familienfahrzeug. Hier sind speziell auf die besonderen Bedürfnisse der jüngsten Insassen angepasste Lösungen von marktentscheidendem Vorteil. Zusätzlich montierbare Kindersitze sind in großer Zahl am Markt verfügbar und dank der ISOFIX®-Befestigung und Top-Tether-Verankerung ist auch eine universelle Verwendbarkeit in den unterschiedlichsten Fahrzeugen möglich. Damit ist den anthropometrischen Erfordernissen insofern genüge getan, als die Sitzkontur den kleineren Körperabmaßen angepasst ist und das Rückhaltesystem auch für Kinder wirksam und verletzungsarm sein kann. Die ergonomischen Anforderungen für Kinder gehen jedoch über den reinen Sicherheitsaspekt hinaus. Bereits der Einstieg in die zweite Sitzreihe stellt das selbstständige Kind vor körperbedingte Herausforderungen. Selbst ein Schulkind, das eigenständig genug ist, die Türe zu öffnen und auf die Sitzbank zu steigen, trifft gelegentlich auf technische Lösungen, die zwar für Erwachsene zu bewältigen sind, jedoch Kindern Probleme bereiten. Die Gestaltung des Türaußengriffs sollte so gewählt sein, dass das Kind sowohl in Höhe der Anordnung als auch in der Richtung der Betätigung in der Lage ist, die Tür von außen zu entriegeln und insbesondere die Kraft aufbringen kann, sie zu öffnen. Die Überwindung des Schwellers erfordert eine niedrige Einstiegshöhe sowie eine schmale Radhauskontur, was das oben bereits erwähnte „Design for all" ebenfalls erfordert. Viele Menschmodelle stellen auch Kindermodelle zur Verfügung, die zur Behandlung der angeschnittenen Fragen herangezogen werden können.

Kinder empfinden lange Autofahrten häufig als langweilig. Das Interesse an der Beobachtung der Landschaft oder, einen bestimmten Zielort zu erreichen, ist bei ihnen nicht besonders ausgeprägt. Dennoch ist die uneingeschränkte Sicht durch die

56 Opel Mokka (2013): Länge 4278 mm, Breite 1774 mm, Höhe 1646 mm, Radstand 2555 mm.

57 Empty Nesters: Mit dem Erwachsenwerden der Kinder verändert sich auch die Lebenssituation und hier auch die automobilen Bedürfnisse der Eltern. Nun sind eigentlich nur noch zwei Sitzplätze und wenig Laderaum notwendig, während bei jungen Familien Vans und Kombilimousinen praktisch notwendig sind.

Seitenscheibe nach außen eine Anforderung, die aufgrund einer modern nach hinten ansteigenden Brüstungslinie für Kinder von vielen Fahrzeugen nicht erfüllt wird.

Es sind Möglichkeiten vorzusehen, den Zustand der Langeweile zu kompensieren. Deshalb ist elektrische Versorgung in der zweiten und gegebenenfalls dritten Sitzreihe für den Betrieb von mobilen Unterhaltungsgeräten wichtig. Auch eine Möglichkeit zu schlafen ist vorzusehen. Dies ist in Verbindung mit der passiven Sicherheit ein praktisch nicht zufriedenstellend gelöstes Problem.

Häufig kommt es während der Fahrt insbesondere bei Kleinkindern zu Befindlichkeitsstörungen. Die Ursache hierfür sind u. a. Fahrwerksschwingungen, die über den Sitz auf den Kinderkörper übertragen werden. Entsprechen diese Schwingungen annähernd der Eigenfrequenz des Kindermagens (ca. 10 Hz) kann es zu Irritationen des peripheren Nervensystem (Magen-Darm-Trakt) in Form von Übelkeit, teilweise bis zum Erbrechen kommen. Vom Fahrwerk werden über den Sitz aber auch Schwingungen übertragen, die die Eigenfrequenz der Augen (ca. 20 Hz) oder des Gehirns (ca. 18 Hz) ansprechen und bei fehlender ausreichender Sicht zur Fahrzeugumgebung zu Irritationen im neuromuskulären System führen, was ebenfalls Übelkeit auslösen kann. Für die Erwachsenen auf den Vordersitzen sind die Schwingungsanregungen aufgrund Ihrer unterschiedlichen Anthropometrie und auch wegen des größeren Abstandes zur Hinterachse weitaus harmloser. Sie sind sich auch nicht immer bewusst, dass Sportfahrwerke und Niederquerschnittsbereifung den Fahrkomfort für Kinder auf der Rückbank zusätzlich beeinträchtigen. Besonders wichtig für die Befindlichkeit ist wie bei dafür empfindlichen Erwachsenen die Übereinstimmung der gefühlten Beschleunigung und der visuell beobachteten Bewegung. Die Beschleunigungen, insbesondere die Beschleunigungsänderungen (Ruck), die unerwartet sind und nicht verstanden werden, können Ursache für Übelkeit sein. Eine visuelle Kontrolle der Umgebung hat eine stabilisierende Wirkung, solange das Auge den bewegten Objekten folgen kann. Der somit notwendige Blickkontakt zur Umgebung kann durch die Fahrzeugkarosserie (A-, B-, C- und D-Säulen aber auch die Brüstungshöhe), die Sitze mit den Kopfstützen, aber auch Sichtschutzrollos oder Tönungsfolien an den Seitenscheiben eingeschränkt werden. Eine bewusste Blickabwendung von der nach außen gewandten Sicht zur Umgebung auf den inneren Nahbereich kann deshalb bereits zu den aufgeführten Befindlichkeitsstörungen führen. So ist das Lesen auf den Passagierplätzen eine häufige Ursache von Übelkeit, auch das Spielen mit Handheld-Konsolen oder die Beschäftigung mit portablen Mediaplayern, Videogeräten oder Smartphones können durch den konzentrierten Blick fern der Umgebung zu diesen Effekten führen. Insofern ist es auch eine Frage der individuellen Empfindlichkeit und des erzieherischen Eingriffs, inwieweit die oben erwähnten Mittel zur Bekämpfung der Langeweile tatsächlich zum Einsatz kommen können.

7.9 Handwerklichkeit

Das Auto ist heute das kostspieligste Verbrauchsgut[58] in einem privaten Haushalt. Diese Feststellung gilt sowohl für den Kauf eines Neuwagens als auch eines Gebrauchtwagens. Aufgrund des hohen Investitionsaufwandes möchte der Käufer sehen, wofür er sein Geld ausgegeben hat. Er will den Eindruck haben, dass es wie von einem guten Handwerker, der seine Kunst versteht, gemacht ist. Bhise (2012) führt aus, dass die Handwerklichkeit (craftmanship) ein relativ neues, zunehmende Bedeutung gewinnendes Gebiet ergonomischer Gestaltung sei. Der Kunde möchte den Eindruck gewinnen, dass sein Fahrzeug von einem exzellenten Handwerker gemacht sei, der sein ganzes Können darauf verwandte, den wahrnehmbaren Eigenschaften des Produktes den letzten Schliff zu geben bezogen auf Aussehen, Anfühlen, Geräusch und Geruch. Er adressiert damit die sog. Produktqualität. Folgt man der Definition der Qualität nach ISO 8402, welche mit „die Gesamtheit der Eigenschaften einer Betrachtungseinheit (hier des Produktes), die die Fähigkeit, festgelegte und selbstverständliche Forderungen zufriedenzustellen“ beschrieben ist,

58 Wegen des hohen Wertverlustes, dem ein Fahrzeug im Laufe seines Lebenszyklus ausgesetzt ist. entbehrt es im Allgemeinen – im Gegensatz zum Kauf einer Wohnung oder eines Hauses – der Eigenschaft eines Investitionsgutes.

so liegt das Problem in der Definition der „selbstverständlichen" Forderungen, denn sie charakterisieren u. a. auch unausgesprochene Erwartungen des Kunden. Der heute in allen Testberichten erwähnte Qualitätseindruck bezieht sich auf diesen Aspekt. Die Gesamtheit dieses Eindrucks lässt sich nicht allein durch technisch messbare Größen wie beispielsweise gleichmäßige Spaltmaße, das Fehlen von Lackfehlern und Kratzern, die Entgratung von Plastikteilen u. ä. beschreiben. Auf der Grundlage von Interviews mit zahlreichen Fahrzeugbesitzern und Diskussionen mit Ingenieuren und Designern verschiedener Fahrzeughersteller und Zulieferer hat Bhise (2012) folgende Liste von Eigenschaften und Forderungen zusammengestellt, die den Begriff der Handwerklichkeit näher beschreiben können:

Optische Qualität

1. Perfekte Passung von unterschiedlichen Bestandteilen im sichtbaren Bereich, charakterisiert durch
   - glatte Linien, geringe Spaltenmaße und Vermeidung von Fluchtungsfehlern,
   - gleichmäßige Zwischenräume an allen gelenkigen Verbindungen, unsichtbare Achsen
   - bündige Oberflächenanpassungen, parallele, glatt gerundete (entgratete) Ränder,
   - geringe Oberflächenvariabilität/Unebenheit (keine Verwerfungen oder Verzerrungen), usw.
2. Optische Harmonie (ähnliches Aussehen und Anfühlen von angrenzenden Bestandteilen mit ähnlichen Materialien bezüglich Farbe und Helligkeit, Textur/Körnigkeit, Glanz/Reflexionseigenschaften, Finish usw.)
3. Hochwertige Oberflächen (z. B. kein Rost, verblassende Farbe, Risse, Abblättern, Kratzer).
4. Keine sichtbaren Verbindungen (z. B. keine sichtbaren Schrauben, Klipse, Leitungen, usw.). Produktoberflächen sollten durch unsichtbare oder nicht hervorstehende Verbindungen sauber und ununterbrochen aussehen. Dadurch soll der Designer das Gefühl für ein „gut gemachtes" Produkt vermitteln. Andererseits können auch wenige sichtbare Schrauben über den dadurch hervorgerufenen „Maschinen-Look" durchaus den Eindruck für genaue, gute handwerkliche Ausführung vermitteln.
5. Vermeiden ärgerlicher Sichtirritationen (z. B.: grell hervorstechende Lichtquellen, Reflexion hellerer Oberflächen in die Verglasung oder reflektierender Oberflächen, Welligkeit, Verzerrungen gespiegelter Objekte)

Taktile Qualität

1. Oberflächen im Innenraum, die häufig vom Nutzer berührt werden (z. B.: Knöpfe, Griffe, Sitze, Schalttafeln, Türtafeln, Armstützen, Konsolen, usw.) sollten bezüglich der Berührungseigenschaften ein angenehmes Gefühl vermitteln, welches beispielsweise beschrieben und skaliert werden kann durch Adjektivpaare wie weich/hart, glatt/rau, strukturiert/nichtstrukturiert, glatt/klebrig, usw.)
2. Ein angenehme Nutzungsgefühl von Schaltern, z. B.: Feedback, das bei der Schalter-Bewegungen empfunden wird, Unterdrückung von Vibrationen, kein Gelenkspiel, „knackiges" Detentgefühl (ausgeprägter Druckpunkt, objektivierbar durch Kraft-Weg-Verlauf) usw. (es wird in diesem Zusammenhang auf die Ausführungen in ► Abschn. 6.2.1.3 verwiesen).

Akustische Qualität

1. Angenehmer von den technischen Funktionseinheiten verursachter Sound (bestimmt und glatt, nicht hart oder blechern, z. B.: gesundes Motorgeräusch, satter Türschlag, nicht piepsige Warnsignale, knackige akustische Rückmeldung von Schalterbetätigungen usw.)
2. Abwesenheit von unerwünschten/ärgerlichen Geräuschen wie Quietschen, Rasseln, Rauigkeit.

Harmonie

1. Harmonie über alle Systeme, Subsysteme, und Komponenten hinweg, z. B.: Ähnlichkeiten im Erscheinungsbild und Betätigungsgefühl von Radio und Klimaanlage; allerdings: gewisse Unterschiede sind erforderlich, um zwischen den Funktionen zu unterscheiden und somit Fahrerfehler bei der Nutzung zu reduzieren (siehe hierzu ► Abschn. 6.2). Trotzdem sollten die verschiedene Handhabungseigenschaften

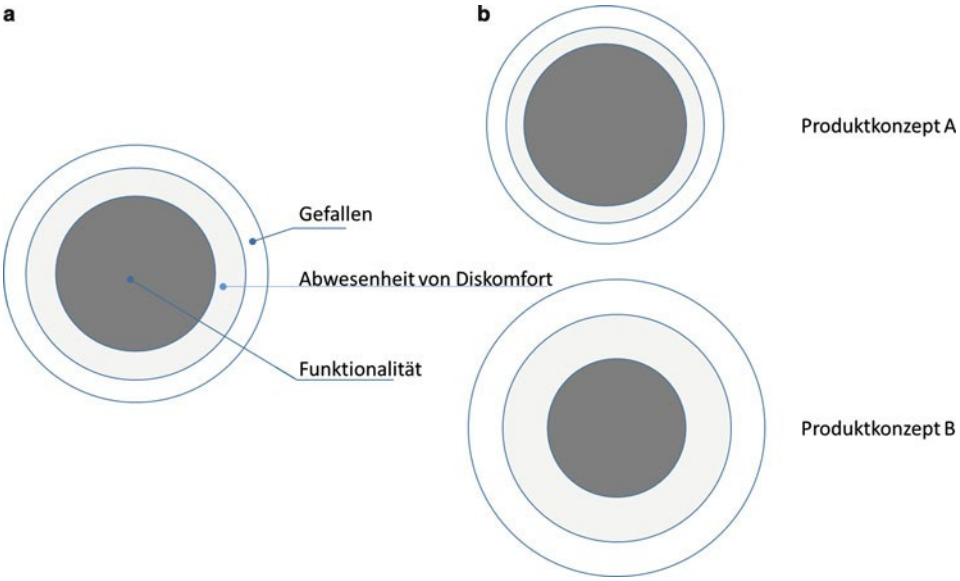


Abb. 7.132 Ring-Modell der Produktbegehrlichkeit nach Peters (1987) und Levitt (1980), **a** Bedeutung der Ringe, **b** zwei unterschiedliche Produktkonzepte

den Eindruck von Designkonsistenz vermitteln, d. h. alle Systeme sollten so aussehen und sich so anfühlen, als seien sie von demselben Designer entworfen worden. Sie sollten zugleich den Charakter der jeweiligen Automarke widerspiegeln.
2. Harmonie zwischen den Materialien und ihrer Machart innerhalb eines Fahrzeugs, um so ein Markenimage zu schaffen.
3. Nur wenige unterschiedliche Materialien in unmittelbarer Nachbarschaft, z. B.: sollten viele Bestandteile aus unterschiedlichen Materialien mit vielen innerhalb eines kleinen Gebiets gelegten Trennlinien vermieden werden, weil so die Wahrnehmung von Durcheinander, Fehlanpassungen, Unebenheit, usw. erzeugt wird.

Geruchsqualität

1. Verwendung nach Möglichkeit geruchsloser Materialien, insbesondere sollte vermieden werden, Material mit unangenehmem und giftig wirkendem Geruch zu verwenden.
2. Verwendung vom Material mit angenehmen Geruch, z. B.: Geruch von natürlichem Leder, blumiger, fruchtiger, würziger Geruch.

Viele der oben genannten Punkte haben nicht direkt etwas mit der Funktion oder der in den Kapiteln zuvor beschriebenen ergonomischen Qualität zu tun. Vieles von dem sind im Sinne des in ▶ Abschn. 3.3.4 beschriebenen Komfortmodells von Zhang et al. (1996) Aspekte des Gefallens. Bhise (2012) weist in diesem Zusammenhang auf das Ring-Modell der Produktbegehrlichkeit von Peters (1987) und Levitt (1980) hin, das hier – leicht abgewandelt auf das oben genannte Komfortmodell – kurz beschrieben wird. Der Kern jedes Produktes ist danach durch dessen Funktionalität beschrieben. Die Größe der Fläche, die die Funktionalität repräsentiert, beschreibt qualitativ deren Umfang (Abb. 7.132). Sie charakterisiert im Wesentlichen dasjenige, was von einem Produkt erwartet wird (z. B.: ein Auto steht jederzeit in seinem Funktionsumfang als Fahrzeug zur Verfügung). Zu dieser Funktionalität gesellt sich als übergreifender Ring das Maß der Abwesenheit von Diskomfort (u. a. es wird keine ungünstige Körperhaltung aufgezwungen, die Sicht aus dem Fahrzeug ist nicht eingeschränkt). Sofern Diskomfort auftritt, würde sich dies auf die Beurteilung negativ auswirken. Der äußere Ring charakterisiert das Ausmaß an Gefallen (z. B. das Interieur erfreut das Auge durch die harmonische Abstimmung von Materialien und Farbe; das Fahrzeug erlaubt das Andocken eines Mobiltelefons). Er beschreibt also, in wieweit die Erwartungen des Nutzers übertroffen werden.

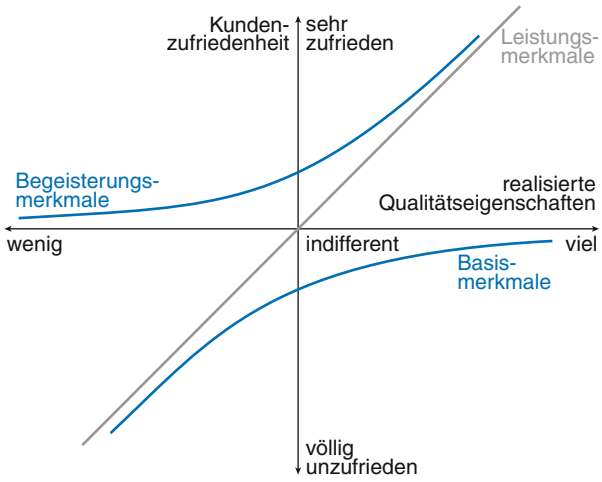


Abb. 7.133 Kano-Modell (Quelle: Wikipedia)

In Abb. 7.132 sind auf der rechten Seite die qualitativen Einschätzungen zweier unterschiedlicher Produktkonzepte dargestellt. Das Produkt A zeichnet sich gegenüber dem Produkt B eigentlich durch eine höhere Funktionalität aus. Trotzdem erzielt das Produkt B eine deutlich höhere Begehrlichkeit, weil es durch sein Gefallen die Erwartungen des Nutzers übertrifft.

Das generelle Problem der Anwendung ergonomischer Regeln in Verbindung mit der Produktbegehrlichkeit besteht darin, dass praktisch nur dafür gesorgt werden kann, den Diskomfort so weit wie irgend möglich zu reduzieren. Aspekte des Gefallens sind u. a. die klassischen Bereiche des Industrial Designs, die aber nicht auf Kosten der Vermeidung von Diskomfort realisiert werden dürfen. Schon aus diesem Grund ist bei der Entwicklung des Fahrzeuginterieurs eine enge Zusammenarbeit von Designer und Ergonomen unabdingbar. Neue Begehrlichkeiten zu finden, ist ein Anspruch an die Kreativität aller an der Entwicklung Beteiligten. Wie an anderer Stelle schon dargestellt, können Kundenbefragungen nur existierende Unzulänglichkeiten aufdecken. Es kann nicht erwartet werden, dass der Kunde etwas „erfindet". Allerdings ist es möglich, eine neue Produktidee durch Befragungstechniken an Repräsentanten der avisierten Kundschaft hinsichtlich ihrer Begehrlichkeit zu testen.

Bhise (2012) führt als eine Möglichkeit, diese Begehrlichkeit zu quantifizieren, die Kano-Methode an, die im Marketingbereich eine relativ große Rolle spielt. Im Prinzip besteht die Methode darin, bezüglich eines Merkmals (z. B.: Vorhandensein einer Holzleiste) mittels jeweils einer funktionalen und einer dysfunktionalen Frage in einer fünfstufigen Ratingskala die Akzeptanz bzw. Ablehnung zu eruieren (u. a. Klopp 2014)[59]. Aus der Kombination der Antwort des Probanden auf die funktionale und dysfunktionale Frage wird anhand einer von Kano entwickelten Auswertungstabelle diese Antwort einer der folgenden Kategorien zugeordnet:

- **A** (Attractive) = Begeisterungsfaktor
- **M** (Must-Be) = Basisfaktor
- **O** (One-dimensional) = Leistungsfaktor
- **I** (indifferent) = irrelevantes Produktmerkmale
- **R** (Reverse) = unerwünscht (führt zu Unzufriedenheit)
- **Q** (Questionable) = falsch verstanden (d. h. Antworten in diese Kategorie werden nicht berücksichtigt)

Die Häufigkeiten, die sich bei einer Befragung mit einer großen Anzahl von Probanden ergibt, wird

59 Funktionale Frage: wenn am Armaturenbrett ihres Fahrzeugs eine Holzleiste vorhanden wäre, was würden Sie darüber denken? Antworten: 1. würde mich sehr freuen …-… 5. würde mich sehr stören. Dysfunktionale Frage: wenn am Armaturenbrett ihres Fahrzeugs keine Holzleiste vorhanden wäre, was würden Sie darüber denken? Antworten: 1. würde mich sehr freuen …-… 5. würde mich sehr stören.

über verschiedene Formeln in Koeffizienten umgerechnet, die eine Positionierung in dem Diagramm der Abb. 7.133 ermöglichen. Der Bereich zwischen den Kurven „Begeisterungsmerkmale“ und „Basismerkmale“ stellt den neutralen Bereich dar, der die reinen Leistungsmerkmale (= Funktionalität) charakterisiert. Hohe Leistungsmerkmale sind zwar Voraussetzung für hohe Kundenzufriedenheit, erzeugen aber keine Begeisterung. Sie charakterisieren die „unausgesprochenen Wünsche“. Ein Produktmerkmal, das sich unterhalb der Kurve der Basismerkmale lokalisiert, sollte vermieden werden. Je weiter oberhalb der Kurve der Begeisterungsmerkmale eine Produkteigenschaft aufgrund der Kundenbefragung lokalisiert wird, umso mehr ist davon auszugehen, dass es sich hier um ein Merkmal handelt, mit dem sich das betreffende Produkt vor Konkurrenzprodukten auszeichnen würde. Es sind dies Merkmale, welche die Kunden bisher nicht gesehen haben und die bei ihnen einen – so Bhise – „Wow“-Effekt auslösen (z. B. HUD in einem Kleinwagen). Dabei muss allerdings beachtet werden, dass im Laufe der Zeit solche „Wow“-Eigenschaften unausgesprochene Kundenwünsche werden, so dass der Hersteller ständig neue „Wow“-Merkmale erfinden muss.

Literatur

Verwendete Literatur

77/649/EWG: RICHTLINIE DES RATES zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über das Sichtfeld der Fahrer von Kraftfahrzeugen. (zuletzt geändert durch 90/630/EWG) In: Amtsblattes der Europäischen Union – Luxemburg: Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, 2008 (2008)

Amereller, M.: Die Gelenkbeweglichkeit des Menschen im Altersgang als Fokus wissenschaftlicher Forschung im automobilen Kontext. Dissertation Technischen Universität München (2014)

Arlt, F., Bubb, H.: Simulation of target directed movements within the CAD man model RAMSIS. In: Proceedings of SEA Conference on Human Modeling The Hague, 18-20 May 1999. SAE International, (1999)

Arlt, F.: Untersuchungen zielgerichteter Bewegungen zur Simulation mit einem CAD-Menschmodell, Dissertation Technischen Universität München (1998)

Bäumler, M.: Ermittlung einer ergonomisch optimalen Pedalanordnung für Personenkraftwagen. Diplomarbeit an der Katholischen Universität Eichstätt (1992)

Becker, S.: Robson Forensic Inc. Parking Brake Use Study, SAE Paper, Bd. 2013-01-0199. (2013)

Bhise, V., Kridli, G., Mamoola, H., Devaraj, S., Pillai, A., Schulze, R.: Development of a Parametric Model for Advanced Vehicle Design SAE Technical Paper, Bd. 2004-01-0381. Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale (2004)

Bhise, V., Pillai, A.: A Parametric Model for Automotive Packaging and Ergonomic Design. In: Proceedings of the 2006 International Conference on Computer Graphics & Virtual Reality Las Vegas, Nevada, June 26 - 29, 2006 (2006)

Bhise, V.D.: Ergonomics in the automotive design process. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York (2012)

Bitter, T.: Objektivierung des dynamischen Sitzkomforts, Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, Dissertation, Shaker Verlag 2005 (2005)

Bothe, A.: Entwicklung eines parameterbasierten CAD-Modells zur Ergonomieabsicherung einer Mittelklasselimousine. Diplomarbeit am Institut für Konstruktionstechnik der Universität Stuttgart (2010)

Brackett, R.O., Pezoldt, V.J., Sherrod, M.G., Roush, L.K.: Human Factors Analysis of Automotive Foot Pedals. National Highway Traffic Safety Administration, Springfield (Virginia) (1989)

Brenner, M.: Nutzergruppenspezifische Ergonomie im Fahrzeug. Dissertation Technischen Universität München (2013)

Brückner, B.: Neue Ansätze für die Ergonomieabsicherung in der Fahrzeugentwicklung. Vortrag zum 3. Symposium Human Machine Interaction Design – Von der nutzergerechten bis zur energieeffizienten Gestaltung. Stuttgart (2011)

Bubb, H., Hudelmaier, J.: 1-Liter-Auto und Anthropometrische Gestaltung. In: Fahrzeugkonzepte für das 2. Jahrhundert Automobiltechnik 19.VDI/VW Gemeinschaftstagung. VDI-Berichte, Bd. 1653, VDI-Berichte, Düsseldorf (2001)

Cherednichenko, A.: Funktionales Modell der Einstiegsbewegung in einem PKW, Dissertation Technischen Universität München (2007)

Clarke, G.R., et al.: Preliminary studies in measuring range of motion in normal and painful stiff shoulders. Rheumatology and Rehabilitation **14**(1), 39–46 (1975)

Dassault Systems: ENOVIA V5 DMU: Using 3D Manikins to Optimize Vehicle Occupant Packaging for Vehicle Occupant Accomodation (2009)

Dirlich, T.: Experiments in simulated microgravity under water: preliminary findings on individual neutral postures. AHFE 2010. Miami (2010)

Dofour, F., Wang, X.: Discomfort Assessment of Car Ingress/Egress Motion using the Concept of Natural Movement SAE International Digital Human Modeling Conference (2005)

Dreßel, J., Kain, V.: Untersuchungsbericht über das reelle Sitzverhalten des Fahrers. Unveröffentlichte Studie. Institut für Ergonomie, München (1985)

D'Souza, S.F.: Physical efficiency as a function of age: Development of an age scaling model for biomechanical simulation. Dissertation Technischen Universität München (2014)

Dudenhöffer, F.: Demografische Entwicklung und schrumpfender Automarkt. Jahrbuch der Absatz und Verbrauchsforschung **54**(1), 81–90 (2008). G. Nürnberg, Ed.

Flügel, B., Greil, H., Sommer, K.: Anthropologischer Atlas. Edition Wötzel, Frankfurt/Main (1986)

Franz, M., Kamp, I., Durt, A., Kilincsoy, Ü.: A light weight car seat shaped by human body war Contour. Int. J. Human Factors Modelling and Simulation **2**(4), 314–326 (2011)

Fuchs-Kittowski, K.: Probleme des Determinismus und der Kybernetik in der molekularen Biologie. Tatsachen und Hypothesen über das Verhältnis des technischen Automaten zum lebenden Organismus. Gustav Fischer Verlag, Jena (1976). S. 185

Göhler, T.: Umblickverhalten im Pkw – Eine Validierung von RAMSIS-Augpunktlagen. Diplomarbeit – München, Untertürkheim: Lehrstuhls für Ergonomie der Technischen Universität München, DaimlerChrysler AG (1999)

Hager, K.: Sehen, Hören, Schmecken und Riechen. In: Kolb, G.F., Leischker, A.H. (Hrsg.) Medizin des alternden Menschen. Lehrbuch zum Gegenstandskatalog der neuen ÄApprO, S. 85–93. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft Stuttgart, Stuttgart (2009)

Hammond, D.C., Roe, R.W.: SAE Controls Reach Study SAE Paper, Bd. 720199. Society of Automotive Engineers Inc., Warrendale, PA (1972)

Hammond, D.C., Mauer, D.E., Razguanas: Control Reach: The Hand Reach of Drivers SAE Paper, Bd. 750357. Society of Automotive Engineers Inc., Warrendale, PA (1975)

Hartung J.: Objektivierung des statischen Sitzkomforts auf Fahrzeugsitzen durch die Kontaktkräfte zwischen Mensch und Sitz. Dissertation Technischen Universität München (2005)

Hirao, A., Kitazaki, S., Yamazaki, N.: Development of a new driving posture focused on biomechanical loads 2006 Word Congress, Detroit, Michigan. SAE Technical Paper, Bd. 2006-01-1302 (2006)

Hirz, M., Hirschberg, W., Dietrich, W.: Integrated 3D-CAD Design in Early Automotive Development Processes. In: FISITA – World Automotive Congress 2008. The Future of Automobiles and Mobility. London, (2008)

Höllrich, M.: Untersuchung des Einstiegsvorgangs beim PKW mittels Bildverarbeitung und Softdummy. Unveröffentlichte Diplomarbeit. BMW. München (1992)

Hudelmaier, J.: Sichtanalyse im Pkw unter Berücksichtigung von Bewegungen und individuellen Körpercharakteristika. Dissertation Technischen Universität München (2003)

Human Solutions: RAMSIS: Beschreibung der Maße des RAMSIS Package Designer: Speyer, H.. Unveröffentlichtes Manuskript, Kaiserslautern (2000)

Human Solutions: Ramsis Package Designer: Speyer, Hartmut. Unveröffentlichtes Manuskript, Kaiserslautern (2002)

Human Solutions: RAMSIS User Guide, Version 3.8. Kaiserslautern (2008)

Kahlmeier, W., Marek, C.: Gern Groß. In: Der neue Ford Mondeo ATZ/MTZ- Sonderausgabe. (2000). Okt. 2000

Kamp, et al.: Chosen postures during specific sitting activities. Ergonomics **54**(11), 1029–1042 (2011)

Karwowski, W., Yates, J.W., Pongpatana, N.: Ergonomic guidelines for design of a passenger car trunk. In: Automotive Ergonomics. Taylor & Francis, London (1993)

Kilincsoy, Ü., Wagner, A.-S., Bengler, K., Bubb, H., Vink, P.: In: Ahram, T., Karwowski, W., Marek, T. (Hrsg.) Comfortable Rear Seat Posture Preferred by Car Passengers Proceedings of the 5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics AHFE 2014, Kraków, Poland, 19-23 July 2014. (2014)

Klopp, E.: Die Kano – Methode (2014). http://www.eric-klopp.de/texte/angewandte-psychologie/18-die-kano-methode

Kolich, M.: Occupant Preferred Back Angle Relative to Head Restraint Regulations. SAE 2010-01-0779, Troy, MI (2010)

Kolling, J.: Validierung und Weiterentwicklung eines CADMenschmodells für die Fahrzeuggestaltung. München: Technische Universität München, Lehrstuhl für Ergonomie (LfE), Dissertation (1997)

Krist, R.: Modellierung des Sitzkomforts, eine experimentelle Studie. Dissertation Katholische Universität Eichstätt (1993)

Lange, C: Wirkung von Fahrerassistenz auf der Führungsebene in Abhängigkeit der Modalität und des Automatisierungsgrades, Dissertation, Technische Universität München (2008)

Lark, S.D., et al.: Knee and ankle range of motion during stepping down in elderly compared to young men. European journal of applied physiology **91**(2-3), 287–295 (2004)

Layer, J.: Untersuchung dynamischer Vorgänge am Menschen beim Einsteigen in einen PKW, unveröffentlichte Diplomarbeit, BMW, München, 1992 (1992)

Levitt, T.: Marking success through differentiation of anything. Harvard Business Review. January-February (1980)

Lorenz , S.: Assistenzsystem zur Optimierung des Sitzkomforts im Fahrzeug. Dissertation Technischen Universität München (2011)

Lorenz, D.: Äußere Einflussparameter auf Sitzpositionen im Fahrzeug. Dissertation an der Technischen Universität München. Audi Dissertationsreihe, Göttingen, Cuvillier (2013)

McGuire, N., Madley, S., Sevrence, S., Kostrzewa, J., Bilk, J., Gourd, D., Thyagarajan, R.: GENPAD – Ergonomic Packaging SAE Technical Paper, Bd. 2002-01-1241. Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale (2002)

Meldrum, J.F.: Automobil Driver Eye Position. Human Factors Research Dept., Ford Motor Company, Dearborn, MI (1965)

Mercedes-Benz (Daimler AG): Individuell ist bei uns Standard: Fahrhilfen und Sitzanpassungen – jetzt ab Werk (2010). http://www.mercedes-benz.de/content/media_library/germany/ mpc_germany/de/mercedes-benz_deutschland/sonderfahrzeuge_ng/spezielle_branchen-/limited_mobility/broschuerendownload/fahrhilfen_broschuere0.object-Single-MEDIA.download.tmp/Web_10009_Broschuere_Fahrhilfen_Sitzmodi_neu.pdf, Zugegriffen: 09.10.2012

Mergl C.: Entwicklung eines Verfahrens zur Optimierung des Sitzkomforts auf Automobilsitzen. Dissertation Technischen Universität München (2005)

Mergl, C., Bubb, H., Vogt, C., Kress, H.: Ergonomic Layout Process for a Driver Working Place in Cars Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale. Bd. 2006-01-2313. SAE Technical Paper, (2006)

Michel, B.: Ergonomische Analyse der Fahrerumgebung im Fernverkehrs-Lkw. Dissertation Technischen Universität München (2014)

Mies: Experimentelle Bestimmungen der Kopfhüllkurven im Fahrzeug mit einer photogrammetischen Methode. München: Technische Universität München, Institut für Ergonomie (1987)

Monnier, G.: Simulation de mouvements humains complexes et prédiction de l' inconfort associé: Application à l'évaluation ergonomique du bouclage de la ceinture de sécurité. L'institut national des sciences appliquées de Lyon, Lyon (2004)

Müller, A.: Systematische und nutzerzentrierte Generierung des Pkw-Maßkonzeptes als Grundlage des Interior- und Exterioordesigns. Dissertation an der Universität Stuttgart (2010)

National Aeronautics and Space Administration: Man-Systems Integration Standards, Rev. B, Vol. 1. NASA-STD-3000. Houston, Texas. National Aeronautics and Space Administration (1995)

Neuendorf, M.: Pilotstudie zur Ermittlung der komfortbestimmenden Parameter beim PKW-Ein- und Ausstieg. Studienarbeit – Berlin, Untertürkheim: Institut für Straßen- und Schienenverkehr der Technischen Universität Berlin, Mercedes Benz AG, 1996 (1996)

Nilsson, G.: Validity of Comfort Assessment in RAMSIS SAE Technical Paper, Bd. 1999-01-1900. Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale (1999)

Nordin, 2003

Peters, T.: Triving on Chaos. Harper & Row, New York (1987)

RAMSIS: RAMSIS 3.8 in CATIA V5 Handbuch - HUMAN SOLUTIONS GmbH (1990)

Reed, M.P., Manary, M.A., Flannagan, C.A., Schneider, L.W.: A Statistical Method for Predicting Automobile Driving Posture. Human Factors **4**(4), 4 (2002). Winter 2002

Rekittke, T., Brückner, B.: Mercedes-Benz Pkw RAMSIS Familie. Interne Unterlage. Daimler AG, Sindelfingen (2010)

Remlinger, W.: Analyse von Sichteinschränkungen im Fahrzeug. Dissertation, Technische Universität München (2013)

Richter, H.: Eine Testbatterie zur allgemeinen Beurteilung motorischer Leitparameter unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen des Freizeit- und Erholungssportes. Dissertation. Leipzig: DHfK (1974)

Rigel, S.: Entwicklung und Validierung einer Methode zur quantitativen Untersuchung der Ein- und Ausstiegsbewegung in einem Pkw, Dissertation Technischen Universität München (2005)

Sabbah, A. O.: Entwicklung eines dynamischen Diskomfortmodells am Beispiel des Ein- und Aussteigs. Dissertation Technischen Universität München (2010)

Schmidt, S., Seiberl, W., Schwirtz, A.: Influence of different shouder-elbow configurations on steering precision and steering velocity in automotive context. Applied Ergonomics (2014)

Schmidt, R.F., Lang, F.: Physiologie des Menschen: Mit Pathophysiologie, 30. Aufl. Springer-Lehrbuch. Springer Medizin Verlag, Berlin, Heidelberg (2007)

Schober, H.: Das Sehen Bd. 1. VEB Fachbuchverlag, Leipzig (1970)

Scholly, U.: Sicht im Pkw – Evaluationsmethoden in der Praxis, Tagungsunterlagen Herbstkonferenz der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA), Sindelfingen, 28.-29.10.2006. (2006)

Seidl, A.: Das Menschmodell RAMSIS: Analyse, Synthese und Simulation dreidimensionaler Körperhaltungen des Menschen. Dissertation Technischen Universität München (1994)

Viitasalo, J.T., Era, P., Leskinen, A.-L., Heikkinen, E.: Muscular strength profiles and anthropometry in random samples of men aged 31-35, 51-55 and 71-75 years. TERG **28**(11), 1563–1574 (1985)

Vogt, C.: Ergonomische Fahrzeuginnenraum-Auslegung und Erstellung eines Hochschulpraktikums. München. Technische Universität München, Lehrstuhl für Ergonomie (LfE), Diplomarbeit, 2003 (2003)

Vogt, C., Mergel, C., Bubb, H.: Interior Layout Design for Passenger Vehicles with RAMSIS. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing **15**(2), 197–212 (2005)

Wagner, P.-O.: Der Mensch als entscheidende Zielgröße im Produktentstehungsprozess. Vortrag auf der Tagung „Digital Humans in Application", Leipzig 12./13.11.2013 (2013)

Wallentowitz, H.: Aufbau von Kraftfahrzeugen. IKA, Aachen (1995)

Wang, X.: In: Duffy, V.G. (Hrsg.) Discomfort Evaluation and Motion Measurement, in Handbook of digital human modeling. Research for applied ergonomics and human factors engineering. CRC Press (Human factors and ergonomics), Boca Raton (2009)

Weineck, J.: Sportanatomie, 10. Aufl. Verlag PERIMED-spitta, Erlangen (2001)

Weineck, J.: Sportbiologie, 9. Aufl. Spitta-Verl., Balingen (2004)

Wilke, H.J.: Möglichkeiten zur Bestimmung der Wirbelsäulenbelastung und Konsequenzen für die Empfehlungen für das Sitzen. In: ergo mechanics, Interdisziplinärer Kongress Wirbelsäulenforschung, S. 78–103 (2004)

Wolf, H.: Ergonomische Untersuchung des Lenkgefühls an Personenkraftwagen. Dissertation Technischen Universität München (2009)

Xiaoxiang, S.: Evolution of Concept Vehicle Archetype Development – NX Automotive Product Update: Vortrag, 25.04.2007 (2007)

Zacher, I., und Bubb, H.: Strength Based Discomfort Model of Posture and Movement. In: Proceedings of the SAE DHMS 2004 (2004) Rochester, 04DHM-66.

Zaindl, A.: Simulation von Kreuzungskonflikten durch Sichtverdeckung der A-Säule. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2009 (2009)

Zenk R.: Objektivierung des Sitzkomforts und seine automatische Anpassung. Dissertation Technischen Universität München (2008)

Zenk, R., Franz, M., Bubb, H.: Spine load in the context of automotive seating 2007. SAE, Bd. 2007-01-2485. SAE, Washington (2007)

Zhang, L., Helander, M.G., Drury, C.G.: Identifying Factors of Comfort and Discomfort in Sitting. In Human Factors 38(3), S. 377-389 (1996)

Weiterführende Literatur

Andreoni, G., Rabuffetti, M., Pedotti, A.: New approaches to car ergonomics evaluation oriented to virtual prototyping EURO-BME Course on Methods & Technologies for the Study of Human Activity & Behaviour, Italy, 1997., S. 19–20 (1997)

Chatereaux, E., Wang, X., Tasbot, J.: A Database of Ingress/Egress Motions of elderly People SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering, Seattle, 2007. Technical Paper, Bd. 2007-01-2493 (2007)

Franz M.: Comfort, experience, physiology and car seat innovation - Theory, Design and Evaluation. Dissertation thesis Technical University Delft (2010)

Hirz, M., Göber, T., Lang, M.: Integrated 3D-CAD Design Strategies in Vehicle and Engine Development Processes. In: 8. Internationales Stuttgarter Symposium. Automobil- und Motorentechnik. Dokumentation. Vieweg und Sohn, Wiesbaden (2008)

Khan, S.M., Sundström, J.: Effects on vibration on sedentary activities in passenger trains. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control **26**(1), 43–55 (2007)

Meic-Sidic, T.: Entwicklung eines Bewertungsverfahrens zur Beurteilung der 360°-Rundumsicht aus dem Pkw. Diplomarbeit. Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart, DaimlerChrysler AG, Stuttgart, Sindelfingen (2005)

Parkinson, M.B., Reed, M.P.: Optimizing Vehicle Occupant Packaging Technical Paper, Bd. 2006-01-0961. Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale (2006)

Reed, M.P., Huang, S.: Modeling Vehicle Ingress and Egress Using the Human Motion Simulation Framework Technical Paper, Bd. 2008-01-1896. SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering, Pittsburgh (2008)

Reed, M.P., Manary, M.A., Flannagan, C.A., Schneider, L.W.: New Concepts in Vehicle Interior Design Using Aspect Technical Paper, Bd. 1999-01 0967. Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale (1999)

Reed, M.P., Manary, M.A., Flannagan, C.A., Schneider, L.W.: Automobile Occupant Posture Prediction for Use With Human Models Technical P per, Bd. 1999-01-0966. Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale (1999)

Rossbacher, P., Hirz, M., Harrich, A., Dietrich, W., Theiss, N.: The Potential of 3D-CAD based process – optimization in the automotive concept phase Technical Paper, Bd. 09IDM-0024. Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale (2009)

SAE J1100. 2005-09. Motor Vehicle Dimensions. Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc.. DIN 70020-1

Schmidtke, H., Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung (Hrsg.): Handbuch der Ergonomie (HdE) mitergonomischen Konstruktionsrichtlinie und Methoden. Bd. 1 -5. Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz (o. J.)

Schmidtke, H. und Fraczek, I.: EKIDES, Ergonomische Datenbank auf Microsofts Access Basis.

Siemens PLM Software: Occupant Packaging Toolkit for Jack: Design and test vehicle interiors with digital humans (2010)

Gestaltung der Konditionssicherheit

Heiner Bubb

8.1 Beleuchtung – 472
8.1.1 Lichttechnische Maße – 472
8.1.2 Außenbeleuchtung – 474
8.1.3 Innenbeleuchtung – 475

8.2 Schall – 478
8.2.1 Fahrgeräusche – 478
8.2.2 Kleine Geräusche – 483
8.2.3 Nutzsignale – 485

8.3 Schwingungen – 486
8.3.1 Schwingungsphänomene – 486
8.3.2 Wahrnehmung von Schwingungen – 487
8.3.3 Schwingungsbewertung – 488
8.3.4 Komfort und Fahrsicherheit – 492
8.3.5 Kinetose – 496

8.4 Klima – 497
8.4.1 Klima, Leistungsfähigkeit und Komfort – 497
8.4.2 Klimatische Behaglichkeit – 498
8.4.3 Umweltbedingungen – 503
8.4.4 Anforderungen an die Technik – 505

8.5 Geruch – 518

Literatur – 520

H. Bubb et al., *Automobilergonomie,* ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-8348-2297-0_8, © Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

Das allgemeine Strukturschema des Mensch-Maschine-Systems der Abb. 1.9 sowie die Beschreibung der Teilgebiete der Ergonomie in ▶ Kap. 1 weist die sog. Umweltergonomie als ein wichtiges Teilgebiet dieser Wissenschaft aus. Umgebungseinflüsse beeinflussen die Interaktion des Fahrers mit seinem Fahrzeug. Bei den Umgebungseinflüssen ist zu unterscheiden zwischen den physikalischen und sozialen Umwelteinflüssen. Letztere entziehen sich einer ergonomischen Gestaltung.[1] Die „klassischen" physikalischen Umweltfaktoren sind Beleuchtung, Schalleinwirkungen („Lärm"), mechanische Schwingungen („Federung"), Klima („Heizung und Klimaanlage") und Geruch. Die Beeinflussung des Fahrers durch diese Faktoren kann positiver und negativer Natur im Sinne von Anregung bzw. Belastung sein. Deshalb tragen sie ganz wesentlich zur sog. Konditionssicherheit bei, weil sie bei der richtigen Gestaltung bewirken können, dass der Fahrer wach und motiviert bleibt. Hinzu kommt, dass eigentlich nur die Faktoren Klima und Geruch den Informationsfluss zwischen Fahrer und Fahrzeug im Sinne einer regelungstechnischen Störgröße beeinflussen. Für die Faktoren Beleuchtung, Schall und mechanische Schwingungen gilt, dass sie neben dieser beeinflussenden Eigenschaft auch direkt Rückmeldung bezüglich des Fahrprozesses liefern. Am Beispiel der Geschwindigkeitswahrnehmung konnten in einem kombinierten Experiment aus Simulator- und Realversuchen die in Abb. 8.1 zusammengestellten Einflüsse herausgefiltert werden (Bubb 1977). Bei der Nutzung aller Sinneskanäle ist danach eine relativ gute Wahrnehmung des Geschwindigkeitsniveaus mit der Tendenz zum leichten Über- und Unterschätzen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsfolge gegeben. Stehen nur einzelne Sinneskanäle zur Verfügung, so kommt es dazu, dass teilweise Geschwindigkeitsdifferenzen zu gering bzw. überhaupt nicht wahrgenommen werden. Bei Kombinationen von Sinneskanälen kann es vereinzelt zu einer Verbesserung der Wahrnehmung von Geschwindigkeitsdifferenzen und -niveau kommen, aber auch zum Gegenteil (näheres siehe Abb. 8.1).

Bei allen Gestaltungsmaßnahmen ist also der Doppelcharakter dieser Umweltfaktoren als Rückmeldungs- und Belastungsfaktor zu berücksichtigen.

8.1 Beleuchtung

Wenn über 90 % der Information beim Autofahren über den optischen Sinneskanal aufgenommen wird, so ist es trivial festzustellen, dass die Beleuchtung einen primär rückmeldenden Charakter besitzt. Die in Abb. 3.72 dargestellte Komfortpyramide zeigt andererseits, dass nicht ausreichende Beleuchtung neben unangenehmem Geruch vor allen anderen Umweltfaktoren Diskomfort erzeugt. Der oben erwähnte Doppelcharakter spielt also gerade bei der Gestaltung der Beleuchtung eine wesentliche Rolle.

8.1.1 Lichttechnische Maße

Für die Beurteilung von Beleuchtungsbedingungen spielen die lichttechnischen Maße eine wichtige Rolle. Abbildung 8.2 zeigt dafür eine Zusammenstellung. Obwohl Licht eine Form der Energie darstellt und infolgedessen die adäquate Einheit der von einer Lichtquelle abgestrahlten Leistung Watt [W] wäre, wird die im Bereich des sichtbaren Lichtes (Wellenlänge zwischen 390 und 770 nm) abgestrahlte Leistung mittels der so genannten V(λ)-Kurve bewertet, welche berücksichtigt, dass das Auge im blauen und roten Bereich deutlich weniger empfindlich ist als in dem Bereich des Zentrums des Sonnenlichts bei 555 nm (siehe hierzu ▶ Abschn. 3.2.1.1). Die so bewertete Strahlungsleistung wird als Lichtstrom bezeichnet und in der lichttechnischen Einheit lumen [lm] quantifiziert. Den in den Raumwinkel f/r^2 ausgestrahlte Lichtstrom bezeichnet man als Lichtstärke (Maßeinheit candela [cd]). Der von der Lichtquelle ausgehende Lichtstrom fällt auf die interessierende beleuchtete Fläche. Der pro Flächeneinheit einfallende Lichtstrom wird als Beleuchtungsstärke (Maßeinheit lux [lx]) bezeichnet. In Abhängigkeit

1 Der Hinweis in öffentlichen Fahrzeugen (Omnibus, Straßenbahn) „Nicht mit dem Wagenführer sprechen" bezieht sich auf diese sozialen Umwelteinflüsse. Es soll dadurch sichergestellt sein, dass der Fahrer nicht durch die Verwicklung in ein Gespräch oder durch Ärger mit unangenehmen Zeitgenossen von seiner eigentlichen Aufgabe abgelenkt wird.

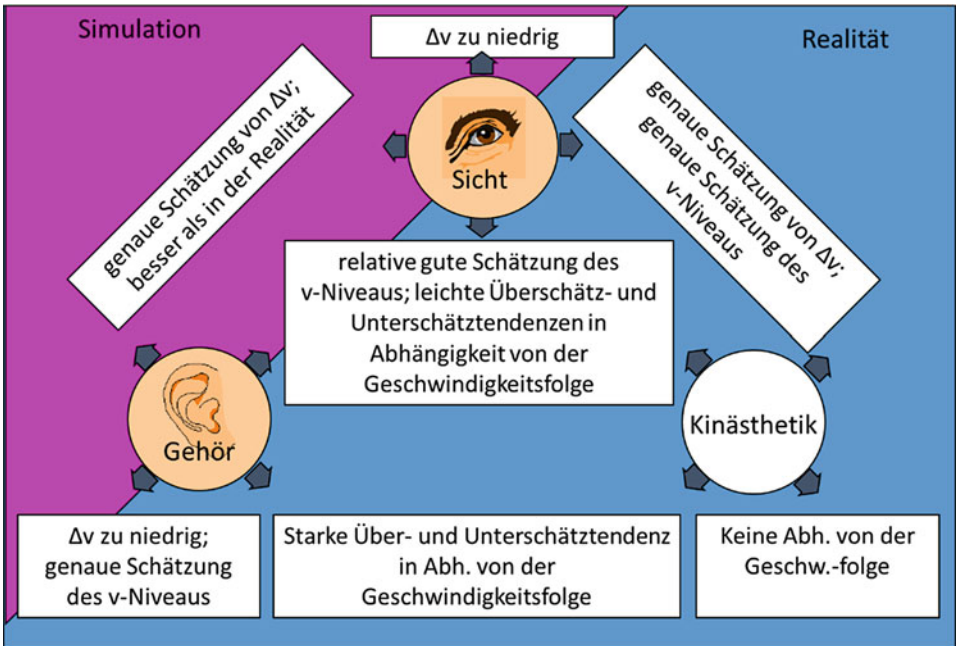


Abb. 8.1 Einflüsse der jeweiligen Sinneseindrücke auf die Geschwindigkeitswahrnehmung (Bubb 1977)

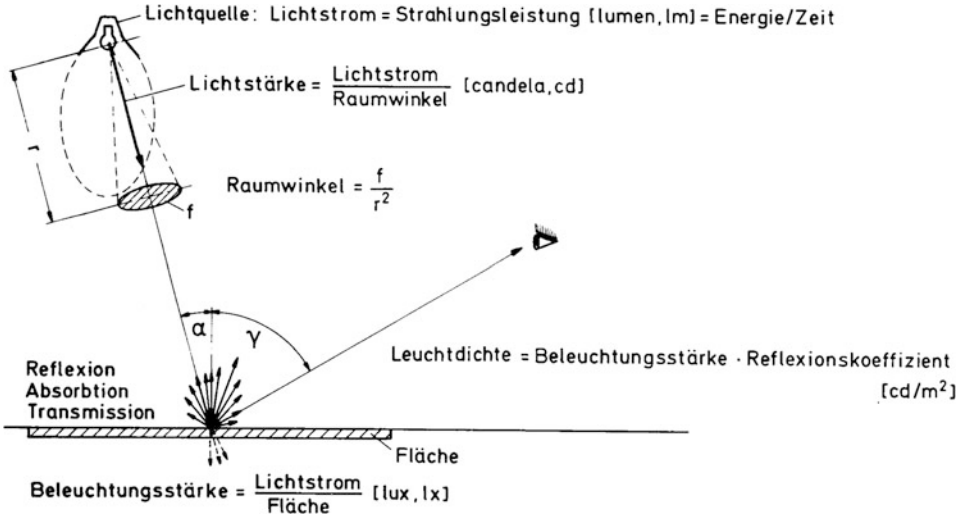


Abb. 8.2 Lichttechnischen Maße

von den optischen Eigenschaften (orts- und raumabhängige Absorptions- und Reflexionskoeffizienten) der beleuchteten Fläche wird das Licht nun in die verschiedenen Raumrichtungen reflektiert. Das in das Auge fallende Lichtbündel charakterisiert den jeweils gesehenen Ortspunkt. Die von diesem Punkt ausgehende Lichtmenge wird Leuchtdichte bezeichnet. Sie errechnet sich aus der Beleuchtungsstärke und dem ortsspezifischen Reflexionskoeffizienten. Die Maßeinheit die Leuchtdichte ist folglich cd/m^2.

Das Auge besitzt eine enorme Adaptationsfähigkeit für unterschiedliche Beleuchtungsbedingungen (ca. 1 : 10^{16}). Wie in ▶ Abschn. 3.2.1.1 dargestellt, geschieht diese Anpassung über verschiedene Me-

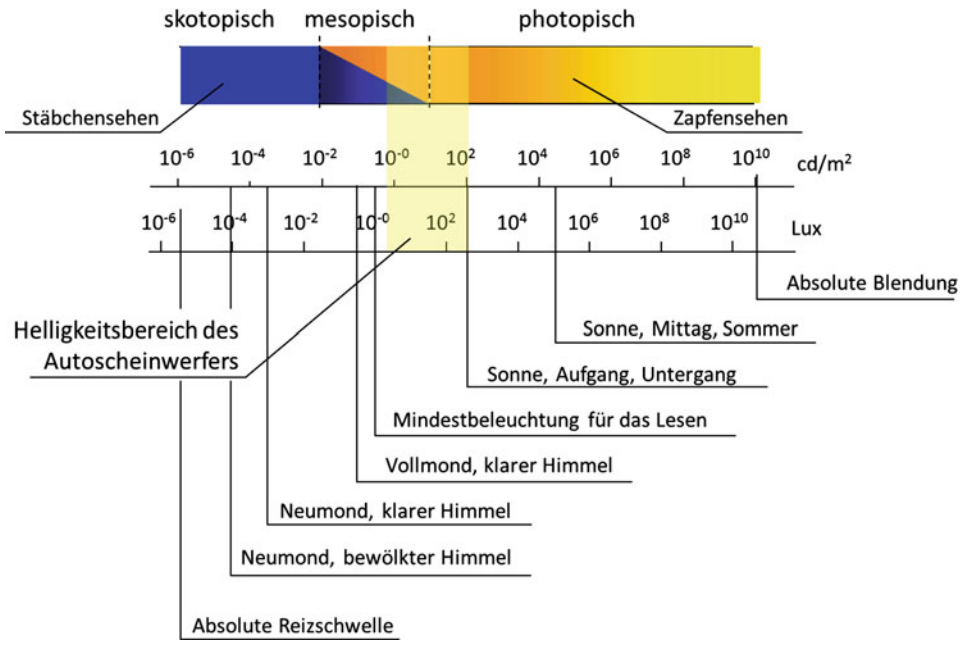


Abb. 8.3 Zapfensehen und Stäbchensehen in Abhängigkeit von Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke

chanismen. Eine schnelle Anpassung erfolgt durch Verengung und Erweiterung der Pupille, was aber nur eine Anpassung im Bereich von etwa 1 : 4 erlaubt. Die eigentliche Anpassung erfolgt einerseits durch veränderte Verschaltung der Rezeptoren auf den Augenhintergrund (Veränderung der rezeptiven Felder), was prinzipiell Zeit benötigt und bei Dunkelanpassung mit Verlust des örtlichen Auflösungsvermögens verbunden ist. Die bisher beschriebenen Anpassungseffekte geschehen alle im sog. photopischen Bereich des Zapfensehens, welches auch eine farbliche Auflösung der gesehenen Objekte erlaubt. Bei extremer Dunkelanpassung kann nur noch über die sehr lichtempfindlichen Stäbchen Licht wahrgenommen werden. Dieser Bereich des Sehens wird skotopisch genannt. Der Übergangsbereich zwischen dem Stäbchensehen und dem vollständigen Zapfensehen wird als mesopisch bezeichnet. Abbildung 8.3 zeigt eine Zuordnung dieser verschiedenen Sehbereiche an die oben genannten lichttechnischen Maßeinheiten mit einigen Beispielen aus der Praxis. Insbesondere kann aus dem Bild entnommen werden, dass der Helligkeitsbereich eines Autoscheinwerfers Sehen im unteren photoptischen Bereich ermöglicht.

8.1.2 Außenbeleuchtung

Es ist hier nicht der Rahmen, die verschiedenen gesetzlichen Zulassungsvorschriften für Fahrzeugbeleuchtung zu behandeln. In ▶ Abschn. 3.2.1.1 werden die einzelnen Bedingungen, die erfüllt sein müssen, damit Objekte erkannt werden können, detailliert dargestellt. Wesentliche Probleme des Nachtfahrens ist die Leuchtdichte des von der Straße und Objekten ins Auge reflektierten Lichtes, womöglich zu hohe Leuchtdichte von Eigenstrahlern, die gegebenenfalls auch Quellen für physiologische und psychologische Blendung sein können. Da das Auge extreme Anpassungsfähigkeit für unterschiedliche Beleuchtungsniveaus hat, spielt die Zeit, die für die Adaptation notwendig ist, dabei eine große Rolle. Obwohl es im normalen Straßenverkehr auch bei Nacht nur bis zur mesopischen Adaptation kommt (keine vollkommene Dunkeladaptation, welche noch nach Zeitabläufen von einer halben Stunde objektivierbare Verbesserungen zeigt, s. o.), ist doch zu berücksichtigen, dass der Adaptationsvorgang von hell nach dunkel deutlich langsamer verläuft (im Sekunden bis Minutenbereich) als in die umgekehrte Richtung (im 100 Milli- bis Sekundenbereich). Dies

spielt am Tag vor allem bei stark wechselnden Beleuchtungsverhältnissen (speziell Tunnel-Ein- und Ausfahrten) eine große Rolle, kann aber praktisch nicht durch fahrzeugseitige Technik aufgefangen werden. Nachdem allerdings die Helladaptation im Wesentlichen durch die Empfindlichkeit der Stäbchen im Augenhintergrund gesteuert wird und diese speziell für das kurzwellige blaue Licht empfindlich sind, sind im Fahrzeuginnenraum nach Möglichkeit blaue, insbesondere größerflächige Lichtquellen zu vermeiden, um eine unerwünschte Anpassung an scheinbar helle Lichtverhältnisse zu vermeiden[2]. Ansonsten werden Neuentwicklungen zur Außenbeleuchtung, durch welche die nächtlichen Sehverhältnisse wesentlich verbessert werden können, in ► Abschn. 9.2.1.3 behandelt.

Ein spezieller Fall der Außenbeleuchtung stellt die automatische Beleuchtung von bestimmten Bereichen der Fahrzeugumgebung (z. B. Beleuchtung der Türöffner) dar, wenn sich der Fahrer dem Fahrzeug bei Dunkelheit nähert. Um Missbrauch durch unbeteiligte Passanten zu vermeiden, kann diese Komfortfunktionen jedoch nur realisiert werden in Verbindung mit dem sog. Keyless-Entry-System, durch die das Fahrzeug mittels eines speziellen Transpondersystems die Nähe des berechtigten Fahrers erkennt.

8.1.3 Innenbeleuchtung

8.1.3.1 Instrumentenbeleuchtung

Nachdem sich viele Fahrer bei Nachtfahrten durch eine zu helle Instrumentenbeleuchtung gestört fühlen, ist es unbedingt notwendig, diese dimmbar zu gestalten. Das dafür vorgesehene Stellteil (meist in Form eines Drehknopfs oder eines Rändelrades) muss leicht erreichbar sein. Üblicherweise bringt man es in der Nähe des Lichtschalters an. Bei der konventionellen Instrumentenbeleuchtung (Auflicht) ist die Einrichtung der *Dimmbarkeit* kein Problem und Bestandteil der üblichen Ausstattung. Die Dimmbarkeit muss sich aber auch auf die heute mehr und mehr verbauten LED-Anzeigen beziehen. Insbesondere ist dies für das zentrale Display (CID) vorzusehen und für das Kombiinstrument, falls dieses in LCD-Form realisiert ist. Gerade bei den LCDs kann die Möglichkeit zwischen einer Tages- und einer Nachtanzeigeversion vorgesehen werden (Tagesanzeiger: heller Hintergrund – dunkle Sehzeichen; Nachtanzeige: dunkler Hintergrund – helle Sehzeichen). Ein automatisches Umschalten ist allerdings zu vermeiden, da es insbesondere bei wechselnden Lichtverhältnissen womöglich zu irritierenden Lichtreizen kommt.

Für gute Erkennbarkeit müssen sich Sehzeichen gegenüber dem Hintergrund mit einem *Kontrast* von 10 : 1 (hier definiert als das Verhältnis der Leuchtdichte des Sehzeichens zu der des Hintergrunds) abheben. Bei Fremdstrahlern wird dies durch die graphische Gestaltung erreicht – unabhängig von der Intensität der Beleuchtung bleibt der Kontrast erhalten (ungünstig sind also beispielsweise dunkelgraue Sehzeichen vor einem hellgrauen Hintergrund). Bei Eigenstrahlern hängt der effektive Kontrast allerdings von der Umgebungsbeleuchtung ab. Die Lichtemission beispielsweise von LED- Anzeigen müsste also in Abhängigkeit von der Außenbeleuchtungsstärke gesteuert werden.

Neben dem Helligkeitskontrast ist auch der Farbkontrast für die Erkennbarkeit von Sehzeichen von großer Bedeutung. Im Prinzip wird ein hoher Farbkontrast durch einen möglichst großen Abstand der Farborte des jeweiligen Sehzeichens und des Hintergrunds in dem Farbdreiecks der ◘ Abb. 3.19 erreicht. ◘ Abbildung 8.4 gibt dafür Beispiele. Die richtige Wahl des Farbkontrastes spielt vor allem in Verbindung mit großflächigen LCD-Anzeigen im zentralen Instrument (CID) oder neuerdings auch im Kombiinstrument eine Rolle. Es ist in diesem Zusammenhang zusätzlich zu beachten, dass aufgrund der wellenlängenabhängigen unterschiedlichen Brechungseigenschaften der Augenlinse das Auge für blaues Licht kurzsichtig und für rotes Licht weitsichtig ist. Das bedeutet, dass der unmittelbare Kontrast zwischen roten und blauen Sehzeichen möglichst vermieden werden soll (besonders ungünstig sind rote Sehzeichen vor einem blau beleuchteten Hintergrund und umgekehrt).

2 Um eine unerwünschte Helladaptation zu vermeiden, hat man früher im Innenraum von U-Booten eine Rotlichtbeleuchtung vorgesehen. Heute weiß man, dass sog. gefiltertes Weißlicht (der extreme Blaubereich ist weggefiltert) den besten Effekt bezüglich einer verhinderten Helladaptation bewirkt.

	schwarz	grau	weiß	magenta	blau	cyan	grün	gelb	rot
schwarz		3	2	3	4	2	2	2	3
grau	1		2	4	3	4	4	3	4
weiß	1	2		2	1	4	4	5	1
magenta	3	5	2		3	3	3	3	4
hellblau	1	3	3	5	2		1	3	3
mittelblau	4	5	2	4		3	2	1	5
dunkelblau	1	4	1	2	5	2	2	1	4
cyan	1	2	5	3	2		5	5	3
hellgrün	1	2	4	4	1	3	1	3	2
mittelgrün	2	3	3	4	2	5		5	3
dunkelgrün	3	5	1	3	1	1	5	1	4
gelb	1	2	5	3	1	4	4		2
hellrot	1	2	4	3	2	4	4	5	2
mittelrot	3	5	2	5	4	3	4	3	
dunkelrot	4	5	1	3	5	3	3	2	5

Beachte
Chromatische Aberration:
Das Auge ist für
blau kurzsichtig,
rot weitsichtig

Legende:

1 = sehr gut
2 = gut
3 = befriedigend
4 = ausreichend
5 = ungenügend
6 = mangelhaft

Abb. 8.4 Beispiele für guten (2), mittleren (1) und schlechten (0) Farbkontrast

8.1.3.2 Innenraumbeleuchtung

Die Innenraumbeleuchtung ist während einer nächtlichen Fahrt ist im Prinzip noch störender als irritierend helle Instrumentenbeleuchtung. Aus verschiedenen Gründen tritt gelegentlich der Wunsch nach einer Innenbeleuchtung dennoch auf (zum Beispiel Orientierung auf einer Landkarte durch den Beifahrer, der Wunsch der Mitfahrer, während der Fahrt zu lesen u. ä.). Deshalb bedarf die Gestaltung der Innenbeleuchtung besonderer Sorgfalt. Dabei ist insbesondere zu vermeiden, dass sich die Lichtquelle der Innenbeleuchtung im Gesichtsfeld des Fahrers befinden kann. Außerdem ist prinzipiell gerichtetes Licht (im Sinne eines Spot-Lights) zu verwenden (Abb. 8.5). Abbildung 8.6 zeigt Bereiche, wo im Fahrzeug gewinnbringend Innenbeleuchtung angebracht werden kann. Dabei ist auch dem von der Innenraumbeleuchtung ausgehenden und dann von Objekten reflektierten Licht Beachtung zu schenken. In diesem Zusammenhang wird speziell auf die Ausführungen in ▶ Abschn. 7.3.4 verwiesen. Der Schalter zum Aktivieren der Innenbeleuchtung sollte für den jeweiligen Nutzer leicht erreichbar sein. Es ist auch zu prüfen, ob es sinnvoll ist, dass der Fahrer die Innenbeleuchtung unter gegebenen Umständen aus eigener Initiative ausschalten kann.

Überhaupt stellt die nächtliche Betätigung von Bedienelementen im Fahrzeugcockpit gegebenenfalls ein Problem dar, das nicht immer durch die heute übliche Hinterleuchtung dieser Bedienelemente zufriedenstellend gelöst werden kann. Die Fa.Hella hat dazu in Form des bewegungsgeführten Lichtes eine innovative Lösung vorgestellt. Danach wird der entsprechende Bedienelementbereich für den Fahrer blendfrei (s. o.) beleuchtet, wenn er sich ihm mit seiner Hand nähert (siehe Abb. 8.7). Es ist dann sogar möglich, die nachfolgend zu betätigenden Bedienfelder adaptiv im Voraus zur besseren Orientierung zu beleuchten (z. B.: Klimaanlage – Lüftungsdüsen; Pietzonka 2004).

8.1.3.3 „Ambientebeleuchtung“

Für viele Personen ist das Sitzen in einem absoluten abgedunkelten Raum unangenehm. In diesem Zusammenhang wird erneut auf die herausragende Bedeutung des Lichtes für die Reduzierung eines Diskomfortempfindens hingewiesen. Durch eine dezente sog. Ambientebeleuchtung kann dieses unangenehme Gefühl kompensiert werden. Abbildung 8.8 zeigt ein Beispiel einer solchen Ambientebeleuchtung im Türblatt des Fahrzeugs. Es ist in diesem Zusammenhang besonders darauf zu achten, dass durch diese zusätzliche Innenraumbe-

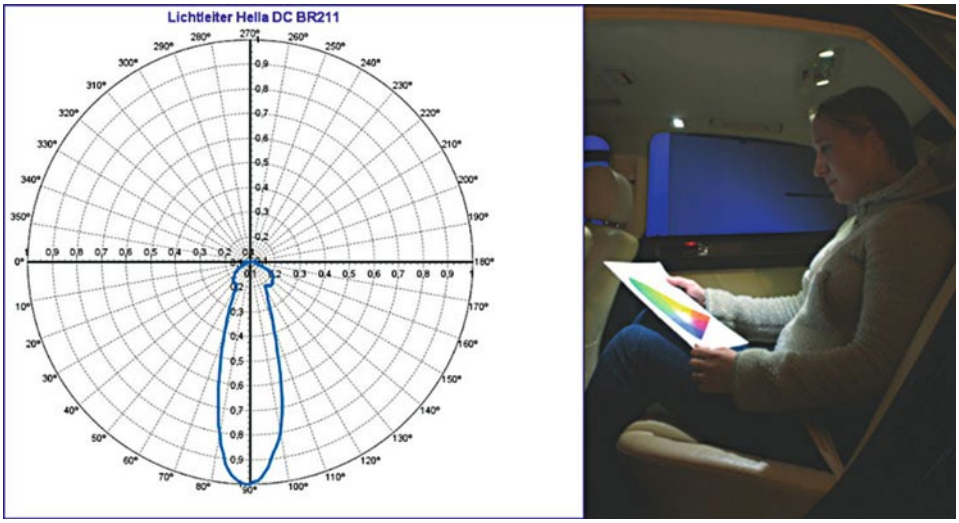


Abb. 8.5 Räumliches Emissionsspektrum eines Innenlichts mit Prismenoptik (Hella: Nachtigall 2007)

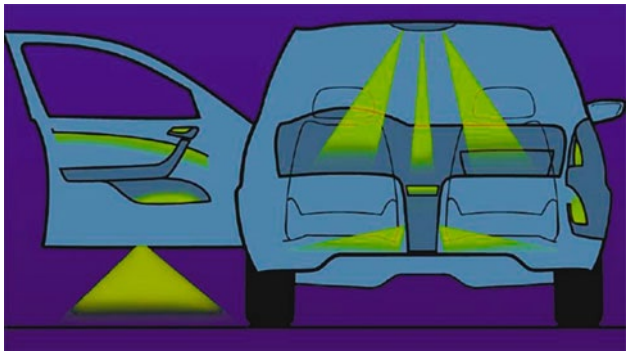


Abb. 8.6 Bereiche der Innenraumbeleuchtung (Hella: Nachtigall 2007)

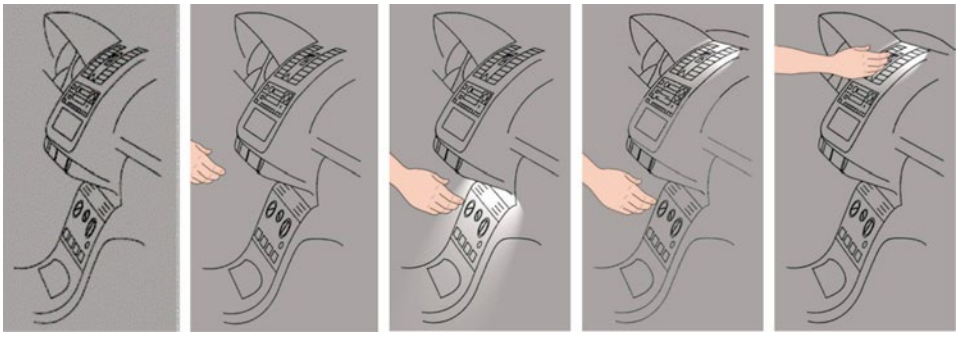


Abb. 8.7 „Bewegungsgeführtes Licht" (Hella: Pietzonka 2004)

Abb. 8.8 Ambientebeleuchtung in Türblatt. Für Ambientebeleuchtung sollte blaues Licht vermieden werden, da die Helladaptation im Wesentlichen durch die für blaues Licht empfindlichen Zapfen geschieht. (Quelle Hella)

leuchtung weder der Blick auf die Straße beeinträchtigt werden darf, noch irgendwelche irritierenden Spiegelungen in der Windschutzscheibe und in den Seitenscheiben erzeugt werden dürfen. Nachtigall (2007) berichtet, dass Probanden auf die Frage, worin sie den Hauptvorteil einer Ambientebeleuchtung sehen würden, jeweils etwa zu einem Viertel die verbesserte Orientierung und eine angenehme Atmosphäre nannten. 17 % nannten ein besseres Raumgefühl und 12 % glaubten sogar, dass dadurch Müdigkeit vorgebeugt werden könne.

8.2 Schall

8.2.1 Fahrgeräusche

Unabhängig von der Erfahrung mit technischen Systemen dürfte es ein grundsätzlicher Gegenstand menschlicher Erfahrung sein, dass zunehmende Geschwindigkeit immer mit zunehmender Lautstärke und zunehmender mittlerer Frequenz oder einzelner Frequenzanteile des damit einhergehenden Geräusches verbunden ist (eigene Bewegung, Beobachtung animalischer Bewegungen und natürlich auch die Erfahrungen mit technischer Geräuschentwicklung). Dazu kommt, dass Geräusche als angenehm (zum Beispiel Musik) und störend (die Bezeichnung ist dann: „Lärm“) empfunden werden. Die vom Fahrzeug erzeugten Geräusche verursachen somit ein komplexes Empfindungsspektrum: Sie geben Information über den Fahrzustand (z. B. Geschwindigkeitsniveau, s. o.; Rückmeldecharakter), sie können freudige Emotionen hervorrufen („toller Motorsound“) und sie können auch lästig empfunden werden (z. B. zischende Fugen, Klappergeräusche). Die Fahrzeugakustik ist ein komplexes und umfangreiches Gebiet. Sie kann im vorliegenden Rahmen auch nicht annähernd erschöpfend behandelt werden. Es wird in diesem Zusammenhang auf u. a. das ausführliche Werk von Zeller (2011) verwiesen.

8.2.1.1 Geräuschquellen und -wege

Unter Fahrgeräusches werden alle Geräusche im Fahrzeuginnenraum verstanden, welche direkt durch die Fortbewegung des Fahrzeugs zustandekommen. Die Geräuschquellen sind im Wesentlichen das Betriebsgeräusch des Antriebmotors, Windgeräusche an der Karosserie und Rollgeräusche, die durch die Räder und das Fahrwerk zustandekommen. Zeller (2011) stellt fest: „Bei komfortorientierten Mittelklasselimousinen dominiert im Bereich niedriger und mittlerer Fahrgeschwindigkeiten und geringer Motorlast im Fahrzeuginnenraum das Rollgeräusch. Dieses wird über den Unterboden und die Seitenwand (Scheiben) als Luftschall, sowie über das Fahrwerk als Körperschall eingetragen. Mit ansteigender Last werden die Komponenten des Motorgeräuschs zunehmend hörbar. Im Tieffrequenzbereich bis ca. 100 Hz handelt es sich dabei in erster Linie um Luftschall induzierte Motorordnungen[3],

3 Motorordnungen: Frequenzen, die durch die drehzahlabhängigen sog. Zündungspeaks und Motorschwingungen zustandekommen.

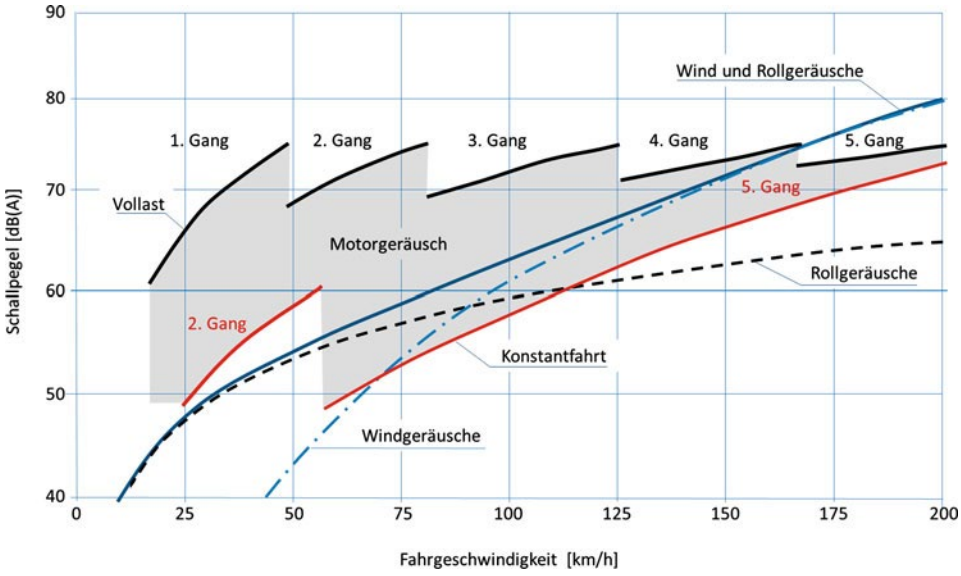


Abb. 8.9 Schallpegel im Fahrzeuginnenraum in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit und Fahrzuständen (schematisch, nach Zeller 2011)

welche vom Mündungsgeräusch der Abgasanlage herrühren, während im Frequenzbereich bis 400 Hz hauptsächlich Körperschallanteile hörbar sind, die durch die Gas- und Massenkräfte angeregt werden und über die Motorlagerung eingeleitet werden. Bei höheren Motordrehzahlen wird im Bereich oberhalb 400 Hz das mechanische Motorgeräusch dominant, welches als Luftschall über die Stirnwand eingeleitet wird. Erst bei Fahrgeschwindigkeiten oberhalb von 80–100 km/h werden zunächst das Rollgeräusch und später auch das Motorgeräusch zunehmend vom Windgeräusch maskiert". Das vom Motor erzeugte Geräusch hängt dabei erheblich von dessen Lastzustand ab. Beim Abrollen des Reifens auf der Fahrbahn kommt es infolge der Profilierung des Reifens (eher singendes, tonales Geräusch) und aufgrund von Unebenheiten der Fahrbahn (Poltergeräusche) zur Emission von Luft- und Körperschall. Die Windgeräusche sind aerodynamisch induzierte Geräusche infolge von Strömungsfluktuationen an der Fahrzeugaußenhaut. Sie verursachen ein breitbandiges, nicht direkt zu ortendes Rauschen. Um möglichst wenig Diskomforts zu erzeugen, sollte dieses Geräusch möglichst wenig tonale Anteile (zum Beispiel hochfrequente Pfeifentöne) enthalten. Abbildung 8.9 zeigt eine Zusammenfassung der beschriebenen Geräuschanteile in Form ihres Beitrags zu den im Fahrzeuginneren gemessenen Schallpegel.

8.2.1.2 Wahrnehmung

Vom Fahrer wird nicht nur die Lautstärke des Fahrgeräusches wahrgenommen, sondern auch dessen Zusammensetzung. Diese bezieht sich nicht nur auf die Aspekte der heraushörbaren einzelnen Geräuschquellen, sondern auch auf die örtliche Zuordnung. Insgesamt ist das Zustandekommen des Geräuschspektrums eine extrem komplexe Angelegenheit. Eine Ursache dafür ist der enge und komplex aufgebaute Fahrzeuginnenraum. Durch Reflexion der Schallwellen an den Wänden und an den verschiedenen Einrichtungsobjekten dieses Raums, die zudem schallhart und schallweich sein können, entstehen sog. stehende Wellen, wenn die entsprechende Distanz zufällig ein Viertel der Wellenlänge des jeweiligen Schallanteils ist. Somit ist der Fahrzeuginnenraum durch ein wirres Gemisch solcher stehender Wellen charakterisiert. Dies hat unter anderem zur Folge, dass man in Abhängigkeit von der Position des Mikrofons eines Schallanalysators in diesem Raum ganz unterschiedliche Spektren erhalten kann. Diese Beobachtung gilt natürlich auch für das menschliche Ohr. Wenn man nun aber bedenkt, dass der Hör-

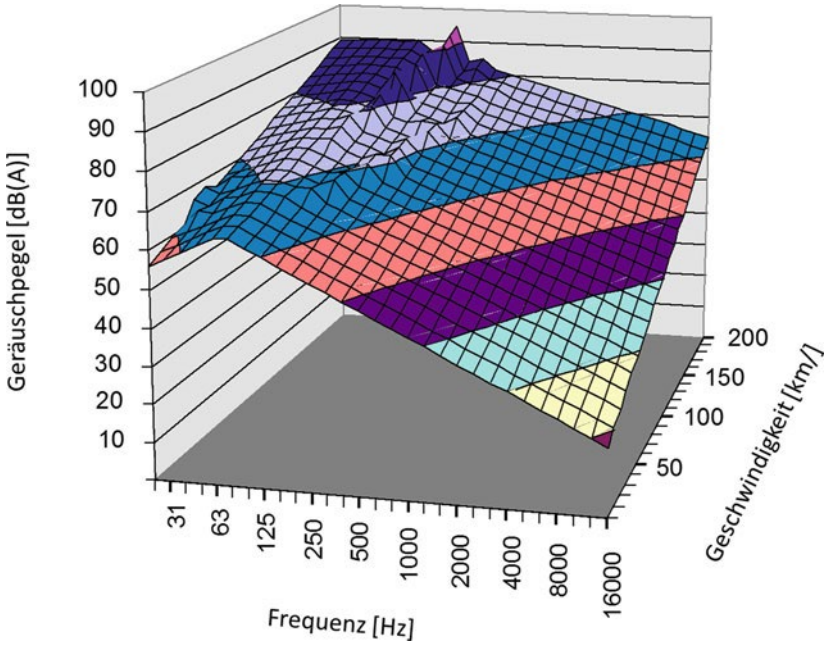


Abb. 8.10 Typische Frequenzzusammensetzung eines Pkw-Innengeräusches mit 4-Zylindermotor in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit (Bubb 1996)

prozess darin besteht, das örtlich zeitliche Muster der Wanderwellen auf der Basilarmembran quasi zu sehen, wodurch unter anderem auch Ähnlichkeiten in Geräuschen erkannt werden (siehe ▶ Abschn. 3.2.1.2), die sich nicht ohne weiteres aus dem Frequenzspektrum erklären, so wird verständlich, dass für die auditive Wahrnehmung – ähnlich wie in anderen Wahrnehmungsbereichen – eine Konstanzleistung in der Form existiert, dass ein Geräusch mehr oder weniger unabhängig von den Eigenschaften des Schallraums erkannt werden kann. Zugleich wird dabei aber durchaus auch die Art des Schallraums wahrgenommen. So kann ein Fahrer ohne weiteres – auch auf nur akustischem Wege – erkennen, ob er sich in einem größeren oder kleineren Fahrzeug befindet. Insbesondere ist er in der Lage, das Motorgeräusch eines Cabriolets als solches zu erkennen unabhängig davon, ob das Verdeck geöffnet ist oder nicht. Bei einiger Erfahrung ist er weiterhin in der Lage, die einzelnen Geräuschanteile unterschiedlichen Quellen zuzuordnen. So erkennt er beispielsweise das von den Reifen verursachte Geräusch unabhängig von dem aerodynamisch induzierten Geräusch infolge von Strömungsfluktuationen an der Fahrzeugaußenhaut. Diese Feststellungen berechtigen dazu, die Frequenzzusammensetzung eines Geräusches, das über ein Messmikrofon in Ohrnähe erfasst worden ist, zu interpretieren. Voraussetzung ist allerdings, dass bei wiederholten Messungen das Mikrofon immer an der gleichen Stelle positioniert ist. Im Einzelnen ist es aber schwierig, die oben angedeutete Leistung des menschlichen Ohres allein aus der Interpretation dieses Frequenzspektrums zu erklären.

Abbildung 8.10 zeigt die Frequenzzusammensetzung eines Pkw-Innengeräusches in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit (Bubb 1996)[4]. Das Bild zeigt die typische Abhängigkeit: mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt auch der Lautstärkepegel zu, d. h. das gesamte Rauschgebirge wird angehoben (siehe auch Abb. 8.9). Insgesamt zeigt das Spektrum einen dreiecksförmigen Verlauf mit einer Spitze bei ca. 70 Hz, deren Position auf der Frequenzachse unabhängig von Geschwindigkeit und Motordrehzahl ist. Dies ist wohl auf Resonanzeigenschaften der Fahrzeugkabine zurückzuführen. Unterhalb von 70 Hz wird der Geräuschpegel vor allem in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit angehoben, vor-

4 Die erwähnten Versuche wurden Mitte der Achtzigerjahre durchgeführt; die heutigen Innengeräuschpegel liegen gegenüber diesen Messungen um ca. 10 dB niedriger. Das bedeutet eine Halbierung der empfundenen Lautstärke.

nehmlich bedingt durch Poltergeräusche vom Fahrwerk. Der Bereich oberhalb der 70 Hz-Spitze wächst mit der Motordrehzahl an (was man separieren kann, wenn man die Messungen mit unterschiedlichen Gängen durchführt). Im oberen Frequenzbereich (> 4000 Hz) kommen bei höheren Geschwindigkeiten noch Zischgeräusche hinzu. Diesem Rauschgebirge überlagert sind einzelne Frequenzpeaks, deren Position von der Motordrehzahl abhängt. Mit zunehmender Motordrehzahl wandern sie zu höheren Frequenzen. Die niedrigste Frequenz n errechnet sich aus der Motordrehzahl N [1/min] zu

$$n = N/60\ [\mathrm{Hz}] \tag{8.1}$$

Bei einer Vierzylindermaschine zeigt der 2n-Peak entsprechend der Zündungsfolge den höchsten Lautstärkepegel. Bei einer Sechszylindermaschine gilt dies für den 3n-Peak. Darüber gibt es in Relation zunehmend schwächere Peaks an ganzzahligen Vielfachen des Grundpeaks. Je nach Auslegung der Abgasanlage können aber auch halbzahlige Ordnungen beobachtet werden. Speziell die ganzzahligen Motorordnungen ab der dritten Ordnung, wie sie insbesondere für Sechszylinderreihenmotoren charakteristisch sind, werden als „seidenweicher" Lauf wahrgenommen, während die 2. Ordnung bei Vierzylindermotoren für einen eher „brummigen" Klangeindruck verantwortlich ist. Die 1,5 fache Motorordnung ist bei Achtzylindermotoren für deren charakteristisches „Brabbeln" verantwortlich (Zeller 2011). Insgesamt machen diese Peaks höherer Ordnung und speziell deren Lautstärkeverhalten in Abhängigkeit von Drehzahl und Last die akustische Charakteristik eines Motors aus.

8.2.1.3 Interpretation der Fahrgeräusche

In der erwähnten Untersuchung (Bubb 1996) wurde die Beurteilung der Beschleunigung von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Motorcharakteristiken mit deren Geräuschcharakteristik verglichen. Dabei wurde speziell herausgefunden:

- Ein Fahrzeug, dessen Geräuschspektrum mit Geschwindigkeit, Motordrehzahl und Drehmoment nur wenig ansteigt, wird zwar als komfortabel, aber nicht besonders leistungsfähig eingeschätzt. Ein stärkeres Herausragen der Peak-Niveaus verbessert diese Beurteilung mehr als ein genereller Anstieg des gesamten Geräuschberges.
- Fahrzeuge, die beim Beschleunigungsvorgang durch ein Geräuschspektrum charakterisiert sind, welches speziell im Bereich höherer Frequenzen mit der Geschwindigkeit ansteigt, verursachen eine ähnliche Beschleunigungsbeurteilung wie Fahrzeuge mit ansteigenden Peak-Niveaus.

Auf der Grundlage dieser Erfahrungen wurde ein Geräuschsimulator entwickelt, der unterschiedliche Geräuschzusammensetzungen in einem Echtfahrzeug, das für die Versuche speziell gedämmt war, erzeugen konnte. Die im Folgenden zitierten Empfehlungen wurden also auf der Grundlage des immer gleichen objektiven Leistungsverhaltens des Fahrzeugs, bei dem nur der akustische Eindruck modifiziert wurde, gewonnen. Für ein gutes Beschleunigungsempfinden ergab sich dabei folgendes:

- mit zunehmender Motordrehzahl sollte die Frequenzflanke > 70 Hz ansteigen,
- mit zunehmender Last (= abverlangtes Drehmoment des Motors) sollte sich die Frequenzflanke > 70 Hz absenken, d. h. die Peaks sollten deutlicher hörbar sein,
- mit zunehmender Drehzahl und Last sollte der Lautstärkepegel insgesamt nur wenig ansteigen,
- die Frequenzflanke < 70 Hz sollte mit Geschwindigkeit und Drehzahl nur wenig ansteigen.

Als negativer Effekt wurde beobachtet, wenn einzelne Peaks aus dem Geräuschspektrum deutlich herausragen. Dies wird als unkomfortabel bezeichnet, kann aber einen sportlichen Eindruck vermitteln. Als besonders günstig hat es sich herausgestellt, wenn die Peaks nur während des Beschleunigungsvorgangs aus dem Geräuschberg herausragen. Ein zu niedriger Geräuschpegel (< 65 dB (A)) erwies sich als ungünstig, was auf den Rückmeldecharakter des Geräusches für den Fahrer hinweist.

8.2.1.4 Sound-Design

Die Bedeutung des Geräusches für das subjektive Gefallen eines Fahrzeugs hat in letzter Zeit enorme Bedeutung gewonnen. Sound-Design stellt das kre-

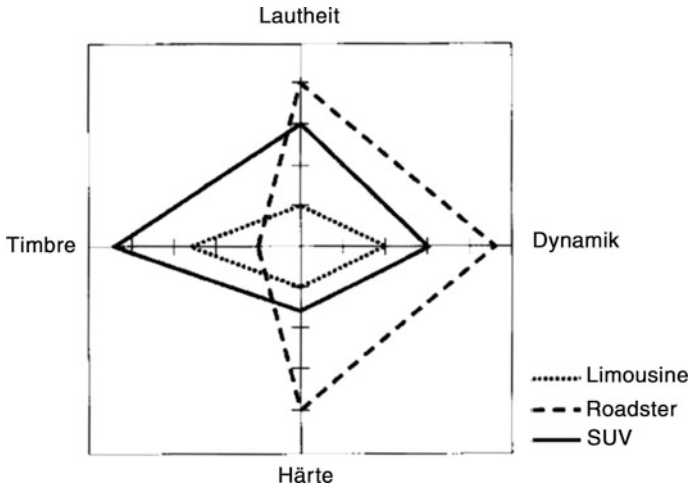


Abb. 8.11 Geräuschcharakterprofil für unterschiedliche Fahrzeugtypen (aus Zeller 2011).

ative Gestalten von Geräuschen dar, um dem Kunden gezielt einen bestimmten Höreindruck zu vermitteln. Auf der Grundlage von faktoranalytischen Verfahren, angewendet auf semantische Profile, mit welchen Probanden die akustische Ausprägung von Motorgeräuschen beurteilten, wurden vier voneinander weitgehend unabhängige beschreibende Faktoren gefunden. Es sind dies:

- Lautheit (z. B.: „laut – leise", „dröhnend – gedämpft"),
- Dynamik (z. B.: „sportlich – unsportlich", „schwach – kraftvoll"),
- Härte (z. B.: „rauh – glatt", „gleichförmig – impulsartig"),
- Timbre (z. B.: „tief – hoch", „stumpf – scharf").

Zeller (2011) legt dar, dass diese mittels statistischer Analysen gewonnenen orthogonalen Wahrnehmungsdimensionen ein weiterer Schritt zur psychoakustischen Modellierung seien, wobei noch Forschungsaufwand notwendig sei, um auf physikalischer bzw. elektroakustischer Ebene jene Parameter zu identifizieren, die dem jeweiligen Hörphänomen zu Grunde liegen. Zumindest lassen sich auf der Grundlage dieser Wahrnehmungsdimensionen Sollprofile für unterschiedliche Fahrzeugtypen, dargestellt in Form der Spinnendiagrammtechnik, definieren (siehe Abb. 8.11).

Der akustische Komforteindruck im Fahrzeuginnenraum wird maßgeblich durch das Geräusch bei gleichbleibender Geschwindigkeit und damit vom Wind-Roll-Geräusch bestimmt (siehe auch Abb. 8.9). Der Fahrzeugdynamikeindruck bei Längsbeschleunigung wird aber wesentlich durch das hervortretende Motorgeräusch beeinflusst. Ein Maß dafür ist der Pegelsprung vom Geräuschniveau bei Konstantfahrt zu dem beim Beschleunigen unter Volllast. Der Pegel von Wind-Roll-Geräusch und Motorgeräusch ist also so aufeinander abzustimmen, dass bei Konstantfahrt im Wesentlichen nur Erstere zu hören sind und gleichzeitig beim Beschleunigen der Pegelsprung des Motorgeräuschs hinreichend hervortreten kann. Dabei darf der maximal vertretbare Gesamtpegel nicht überschritten werden (Zeller 2011).

Mittels der aktiven Beeinflussung von Schall (Active Noise Control, ANC) ist es durch Messung des Schallspektrums in Ohrnähe und Anwendung verschiedener Techniken (siehe Zeller 2011, Seite 209 ff.) möglich, insbesondere die störenden tiefen Frequenzen durch Überlagerung mit einem entsprechenden Gegenspektrum zumindest partiell zu kompensieren.[5] Diese Methode könnte genutzt werden, um beispielsweise die in ▶ Abschn. 8.2.1.2 dargestellten die empfundene Dynamik positiv beeinflussenden Geräuscheffekte über die Fahrzeuglautsprecher einzuspielen. Auf diese Weise könnte ein bei konstanter Fahrt komfortabel leises Fahrzeug erreicht

5 Prinzipiell funktioniert diese Methode nur für eingeschränkte Bereiche innerhalb der Fahrzeugkabine. Aus Energieerhaltungsgründen muss durch das zusätzliche Einbringen des Kompensationsschalls die Amplitude der entsprechenden Frequenzen an anderen Stellen verdoppelt sein.

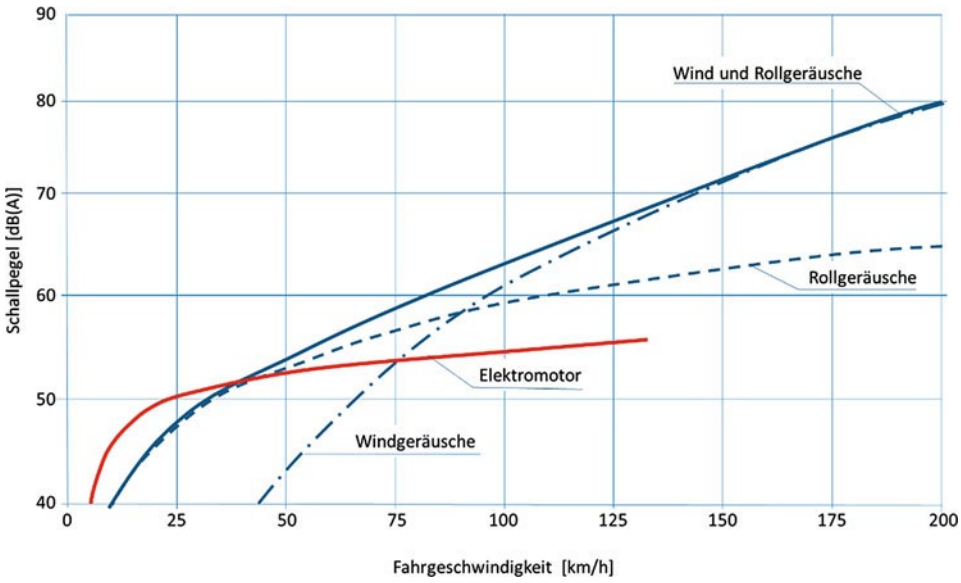


Abb. 8.12 Schallpegel im Fahrzeuginnenraum in Abhängigkeit von Fahrgeschwindigkeit und Fahrzuständen bei einem Elektroantrieb (nach Vogl 2010)

werden, das speziell bei Beschleunigungsvorgängen den emotionalisierenden Sound zu erzeugen vermag. Es wäre auch denkbar, unterschiedlichen Fahrerwünschen durch auswählbare Soundprogramme zu entsprechen. Insbesondere ist es auf diese Weise möglich, was heute zum Teil schon geschieht, die eher nüchterne Geräuschcharakteristik eines aus Verbrauchsgründen vorzuziehenden Vierzylindermotors entsprechend aufzuwerten.

Die zukünftige Verwendung von Elektromotoren als generelle Antriebsquelle im Fahrzeug stellt an die Innenraumakustik ganz neue Anforderungen. Wie Abb. 8.12 zeigt, wird bei einem Elektrofahrzeug schon ab einer Geschwindigkeit von etwa 40 km/h das Motorgeräusch vollkommen von Wind- und Rollgeräuschen maskiert. Von vielen Personen, die erste Erfahrung mit Elektrofahrzeugen gemacht haben, wird zwar deren spontanes Ansprechen auf geänderte Fahrpedalstellung positiv berichtet, aber gleichzeitig auch das „straßenbahnähnliche" Fahrgeräusch moniert. Die gleichmäßige Zunahme von Lautstärkepegel und Frequenzumfang mit der Geschwindigkeit ist zumindest gegenüber dem gewohnten Klangbild eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor gewöhnungsbedürftig. Offensichtlich wirkt sich hier auch die Einteilung des gesamten Geschwindigkeitsspektrums in mehrmaliges Hochdrehen des Motors auf das subjektive Gefühl, „dass sich etwas bewegt" positiv aus (vergleiche Abb. 8.9 mit Abb. 8.12)[6]. Es ist allerdings auch fraglich, ob es sinnvoll sein kann, in dem an sich leisen Elektrofahrzeug künstlich das Geräusch eines Verbrennungsmotors einzuspielen. Aus alledem wird ersichtlich, dass bezüglich des subjektiven Erlebens des Fahrgeräusches bei Elektrofahrzeugen noch erheblicher Forschungsbedarf existiert.

Bezüglich der zusätzlichen Probleme, die bei Hybridfahrzeugen entstehen, wenn sich während des Fahrbetriebs der Verbrennungsmotor sich zu- bzw. abgeschaltet, wird auf die Abhandlung in Zeller (2011, S. 214), verwiesen.

8.2.2 Kleine Geräusche

Mit der Reduzierung der Geräuschpegel in modernen Kraftfahrzeugen wurde das Problem störender Klapper-, Knarz- oder Schabegeräusche immer bedeutender, da diese nun gegenüber dem Ge-

6 Auch die gleichbleibende Motordrehzahl während des Beschleunigungsvorgangs bei den ersten Auslegungen der CVT-Getriebe wurde von den meisten Fahrern negativ beurteilt.

Tab. 8.1 Klassifizierung Mechatronik der Betriebsgeräusche (nach Zeller 2011). Grau hinterlegt: mit großer Wahrscheinlichkeit als lästig empfunden

	Störgeräusch	Bestätigungsgeräusch
Betriebsdauer niedrig	– Lenkhilfe – Niveauregulierung – sekundäre Luftpumpe – Bremsgeräusche (Rubbeln, Quietschen u. ä.)	– Fensterheber/Schiebedach – Sitzverstellung – Spiegelverstellung – Defrostanlage
Betriebsdauer hoch	– Motorlüfter – Kraftstoffpumpe – Wankstabilisierung	– Klimagebläse – Scheibenwischer – Sitzlüfter

samtgeräuschpegel hervortreten und somit immer dominanter geworden sind. Dazu kommt: wird ein störendes Geräusch einmal bewusst wahrgenommen, so bleibt es im Vordergrund der Aufmerksamkeit und wirkt dadurch verstärkt belästigend[7]. Dabei ist Lästigkeit ein weitgehend subjektives Phänomen, das in Abhängigkeit von der Auftretenshäufigkeit, der Intensität, der Lokalisierbarkeit, den persönlichen Assoziationen und dem Geräuschcharakter extrem variieren kann. Weiterhin muss man in diesem Zusammenhang unterscheiden zwischen Störgeräuschen, die nichts mit dem Fahrvorgang oder sonstigen Funktionen des Fahrzeugs zu tun haben und solchen die in Verbindung mit bestimmten Funktionen stehen und gegebenenfalls als Bestätigungsgeräusch auch Rückmeldung über den Einsatz der entsprechenden Funktion geben. Tabelle 8.1 gibt dazu beispielhaft eine Zusammenstellung. Alle Geräusche, die für den Fahrer quasi zufällig und nicht direkt von ihm beeinflusst in Erscheinung treten, werden als lästige Störgeräusche empfunden. Das gilt umso mehr, je länger die entsprechenden Geräusche wahrnehmbar sind. Für viele eigeninitiativ induzierte Aktionen können die entsprechenden Geräusche jedoch als Rückmeldung für die erfolgte Aktion verstanden werden. Allerdings hat dies nur Gültigkeit, wenn die Betriebsdauer entsprechend niedrig ist (also beispielsweise sich nur auf die entsprechende Dauer der Bedienelementbetätigung erstreckt). Wenn die Betriebsdauer hoch ist, so schlägt die Wahrnehmung des entsprechenden Geräusches schnell in Lästigkeit um.

Im Gegensatz zu diesen einer Funktion zuzuordnenden Geräuschen werden speziell Kontaktstellengeräusche, die durch Relativbewegungen von Bauteilen zueinander entstehen, als extrem unangenehm wahrgenommen. Technisch können diese Geräusche in Anschlag- (Klappern, Schwirren), Stick-Slip- (Knarzen, Knacken, Quietschen) und andere Geräusche (z. B.: Lösen von Klebe- und Haftverbindungen, Schmatzen) unterschieden werden. Angeregt werden sie durch Schwingungen im Antriebsstrang, Unebenheiten der Fahrbahnoberfläche und durch spezifische akustische Frequenzen in der Hi-Fi-Anlage. Hinsichtlich der Bewertung dieser lästigen Geräusche steht zunächst die einfache Forderung: „Störgeräusche muss man nicht bewerten, sondern abstellen!“ (Moosmayr 2011). Eine Priorisierung der Maßnahmen nach Auftretenswahrscheinlichkeit und Lästigkeit im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Betrachtung ist jedoch notwendig. Höreindrücke verschiedener Kundengruppen werden jedoch nur wenig einheitlich bewertet (Moosmayr 2008). Während einige Probanden ein bestimmtes Störgeräusch als „sehr lästig“ einstufen, wird das gleiche Geräusch von anderen Probanden überhaupt nicht wahrgenommen. Darauf aufmerksam gemacht, stufen sie es ebenfalls als „sehr lästig“ ein (siehe hierzu auch Fußnote 7). Zudem hängt die Bewertung als Störgeräusch sehr stark von den situationsbezogenen Erwartungen ab. Aus den entsprechenden Untersuchungen von Moosmayr (2008) lässt sich zusammenfassend festhalten, dass bei geringer Fahrzeuganregung (z. B. Stadtfahrt mit konstanter Geschwindigkeit auf Asphalt) die Akzeptanz von Störgeräuschen deutlich geringer ist als bei starker Anregung (z. B. Kopfsteinpflaster oder

7 Ein bekanntes Beispiel dafür ist das Ticken der Uhr, das den Schlaf stört, wenn man einmal die Aufmerksamkeit darauf gelenkt hat.

Schlaglöcher). Das weist erneut darauf hin, dass Verdeckungseffekte des Fahrgeräusches Nutz- und Störschalle verbergen können (Grimm et al. 2007). Das Verfahren zur Lautheitsbestimmung nach Zwicker (Zwicker und Fastl 1990) ermöglicht eine Objektivierung dieses Effektes. Für das Auffinden der Störschallquellen stellt Moosmayr (2008) ein neues Verfahren vor, welches in Verbindung mit einer Hydropuls-/Shakeranlage die auftretenden Störgeräusche bewertet, gleichklingende Geräusche zu Clustern zusammenfasst und automatisch eine einheitliche Problem-Dokumentation erstellt.

Eine Besonderheit hinsichtlich der Geräuschbewertung stellt das mit dem Öffnen und Schließen der Fahrzeugtür verbundene akustische Erlebnis dar. Bewusst oder unbewusst vermittelt es bereits einen Soliditätseindruck, anhand dessen oftmals Rückschlüsse auf die Qualität des gesamten Fahrzeugs gezogen werden. Nach Liebing (2009) bevorzugen Probanden für Schließgeräusche deutlich höhere Schallpegel (bevorzugt 58 bis 62 dB (A)) als für Öffnungsgeräusche (bevorzugt 50 bis 54 dB (A)). Darüber oder darunter liegende Pegel werden unabhängig vom Fahrzeugtyp vermehrt abgelehnt. Dabei ist ein eher dunkles Klangbild (Betonung des Bassbereiches < 100 Hz) ohne hörbares Klicken (kurzes nach dem Hauptgeräusch einsetzendes Geräusch mit Frequenzen > 3 kHz) mit allenfalls geringem Ploppen (ähnlich Sektkorken) erstrebenswert. Jede Art von Nachschwingen wird abgelehnt (wirkt „blechern“) und mindert den Qualitätseindruck des Türschlaggeräusches (näheres hierzu Zeller 2011).

8.2.3 Nutzsignale

Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen kleinen Geräuschen, die sich nach Möglichkeit hinter dem Rauschberg des Fahrgeräusches „verstecken“ sollten, müssen Nutzsignale deutlich aus diesem Rauschberg hervorragen, damit sie sicher wahrgenommen werden können. Nutzsignale in diesem Sinne sind alle akustischen Rückmeldungssignale (siehe hierzu auch ▶ Abschn. 6.2.1.1), Signale aus dem fahrzeugseitig verbauten Infotainment-Systemen (Hi-Fi-Anlage, Sprachhinweise des Navigationssystems, Telefonanlage, Vorlesen von E-Mails und Internetnachrichten u.v.a.m.), Verstehen mobiler Infotainmentsysteme (Smartphones) und nicht zuletzt die Möglichkeit des Gesprächs mit Passagieren des Fahrzeugs.

Um das Herausragen von Nutzsignalen gegenüber dem Rauschberg des Fahrgeräusches zu objektivieren, kann man die zur Messung der Sprachverständlichkeit entwickelten Verfahren heranziehen. Alle gebräuchlichen Verfahren gehen dabei von der Annahme aus, dass der gesamte Hörfrequenzbereich in verschiedene Frequenzbänder aufgeteilt wird. Üblicherweise verwendet man dazu die Terzgruppenbänder, da sie weitgehend den von Zwicker gefundenen 24 Frequenzgruppen (Bark) entsprechen, in welchen die Bildung des Lautstärkeeindrucks im Innenohr erfolgt (siehe hierzu Zwickler und Fastl 1990). Jedes dieser Frequenzbänder k trägt mit einem Gewichtungsfaktor g_k zur Verständlichkeit bzw. Hörbarkeit bei. g_k ist dabei maximal, wenn im jeweiligen Frequenzband nur das ungestörte Nutzsignal vorliegt und null, wenn es vom Fahrgeräusch vollkommen überdeckt wird. In jedem Frequenzband wird aus dem gemessenen Signalpegel S[dB(A)] und dem Geräuschpegel N[db(A)] der Signal-Rausch-Abstand $(S\text{-}N)_k$ bestimmt. Werte $> +15$ dB oder < -15 dB werden auf diese Zahlen begrenzt, da Signalrauschabstände von 15 dB bereits volle Sprachverständlichkeit und −15 dB absolute Unverständlichkeit repräsentieren. Für einfache Signaltöne, die nur in einem engen Frequenzband präsentiert werden, gelten natürlich die gleichen Grenzwerte. Im Allgemeinen geht man davon aus, dass sich der Signalton um mindestens +6 dB gegenüber dem bewerteten Lautstärkepegel in dem entsprechenden Frequenzband abheben muss. Der Artikulationsindex AI bzw. der Speech-Transmission-Index STI[8] wird als gewichtete Summe über alle Frequenzbänder bestimmt:

$$\text{AI bzw. STI} = \sum_k g_k (S - N)_k \qquad (8.2)$$

Die Gewichtungsfaktoren g_k stellen eine sprachmaterialabhängige Frequenzgewichtung dar. Beispiels-

8 AI und STI unterscheiden sich lediglich bei der Ermittlung des Signalrauschabstandes (näheres siehe Zeller 2011, Abschn. 8.4).

weise weisen bei ganzen Sätzen und mehrsilbrigen Wörtern die tiefen Frequenzen eine relativ höhere Wichtigkeit auf als bei einsilbigen Sprachmaterial, das sich durch weniger Redundanz auszeichnet. Der resultierende Index ist eine auf den Bereich von 0 bis +1 normierte Größe, die ein Maß für die Verständlichkeit darstellt und streng monoton mit der Sprachverständlichkeit für das jeweils verwendete Sprachmaterial zusammenhängt.

Aus der Abhängigkeit der Sprachverständlichkeit wie auch des Erkennens von Signaltönen geht schon hervor, dass der Lautstärkepegel des Nutzsignals in Abhängigkeit von dem Lautstärkepegel des Fahrgeräusches unter Berücksichtigung obiger Prämissen angehoben bzw. gesenkt werden muss. Das gilt im Prinzip auch für im Fahrzeug verbaute Hi-Fi-Anlagen.

Gerade bei Premiumautomobilen mit hochwertigen Hi-Fi-Anlagen stellt die Wiedergabe von Audiosignalen bei Kundenbefragung einen besonders herausragenden Beanstandungspunkt dar. Wie Zeller ausführt, sind dafür in der Regel nicht Störungen im elektrischen Teil der Audioanlage verantwortlich, sondern in vielen Fällen mechanische Störgeräusche, die durch die leistungsstarke Audioanlage resonatorisch angeregt werden. Die akustische Ankopplung der Lautsprecher an die Karosseriestruktur stellt dabei die Hauptursache für Fehlerquellen dar[9]. Ansonsten ist es Angelegenheit von Spezialisten, die richtige Auswahl von Lautsprechern und deren Lokalisation im Fahrzeuginnenraum zu gestalten. Dabei spielt der individuelle Geschmack bezüglich des entstehenden Raumklangs eine herausragende Rolle.

8.3 Schwingungen

Sowohl im technischen Bereich wie auch im Bereich der Ergonomie werden Bewegungsphänomene unter dem Oberbegriff „Schwingungen“ behandelt. Ebenso wie die akustischen Einwirkungen haben auch die Fahrzeugschwingungen einen Doppelcharakter: einerseits tragen sie gegebenenfalls erheblich zum Diskomfort bei, wenn sich der Fahrer bzw. die Passagiere durch das Fahrzeug „durchgeschüttelt“ fühlen. Andererseits benötigt der Fahrer eine hinreichend genaue Wahrnehmung der Fahrzeugbewegung, um eine sichere Fahrzeugführung zu gewährleisten (siehe u. a. ◘ Abb. 8.1). Akustik- und Schwingungsdiskomfort sind somit in mehrfacher Hinsicht eng miteinander verknüpfte Disziplinen, da in beiden Fällen die adäquaten Reize durch Körperschall induziert werden, allerdings in verschiedenen Frequenzbereichen. Während die Schwingungsempfindlichkeit des Menschen von 0 Hz bis maximal ca. 500 Hz (Vibrationsempfinden, siehe ▶ Abschn. 3.2.1.3) reicht, beginnt ein akustisches Empfinden erst deutlich über 20 Hz und reicht bis mindestens 10 kHz für ältere Personen und 20 kHz für junge Personen.

8.3.1 Schwingungsphänomene

Die Passagiere in einem Fahrzeug werden auf unterschiedlichem Wege Fahrzeugbewegungen bzw. Schwingungen ausgesetzt. Aufgrund von Fahrbahnunebenheiten wird das gesamte Fahrzeug in Bewegung versetzt, die sich wesentlich als Hubbewegung (translatorisch in z-Richtung), Nick- (rotatorisch um die y-Achse) und Roll- bzw. Wankbewegung (rotatorisch um die x-Achse) darstellt. Die genannten Bewegungen werden durch das Federungssystem gedämpft, aber im Eigenfrequenzbereich gegebenenfalls auch verstärkt. Dazu kommen Vibrationen, die vom Motor und der Kraftübertragung auf die Fahrzeugkarosserie übertragen werden sowie aerodynamische Effekte, die ebenfalls den gesamten Karosseriekörper zu Schwingungen anregen können. Auf den Fahrer werden diese Vibrationen im Wesentlichen über die Kontaktflächen Fußboden, Lenkrad, Sitzfläche und -lehne übertragen. Auch sonstige Kontaktflächen, wie beispielsweise Armlehnen, sind Übertragungselemente für Vibrationen. Mit Ausnahme des Lenkrads gelten die zuletzt genannten Übertragungswege auch für die übrigen Passagiere des Fahrzeugs. ◘ Abbildung 8.13 zeigt die genannten Schwingungsquellen und Übermittlungswege.

Analog zu der akustischen Kategorisierung Ton, Klang und Geräusch sowie Impulsschall („Knall“)

9 Befestigung von Lautsprechern an biegeweichen Verkleidungsteilen kann diese zu mechanischen Schwingungen anregen und verringert dabei auch den akustischen Wirkungsgrad des Lautsprechers.

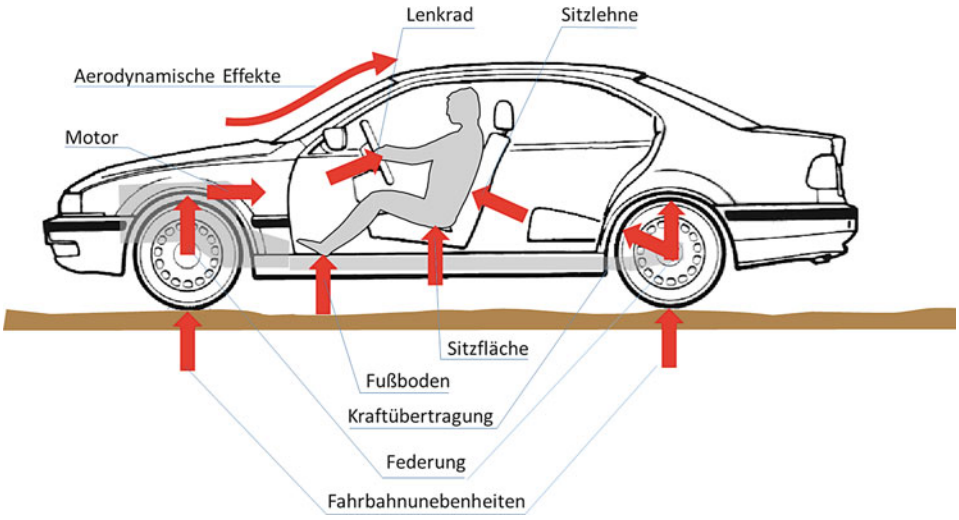


Abb. 8.13 Schwingungsquellen und Übermittlungswege an einem Fahrzeug, das sich auf einer unebenen Fahrbahn bewegt (nach Mansfield 2013)

kann man auch im Bereich der Schwingungen zwischen rein sinusförmigen Anregungen, periodischen Anregungen (Überlagerung mehrerer Sinusschwingungen), stochastischen und impulsartigen Anregungen („Stoß“) unterscheiden. Sinusförmige und periodische Anregungen im niedrigen Frequenzbereich sind in jedem Fall zu vermeiden, um Resonanzeffekte mit menschlichen Organen vorzubeugen (s. u.). Stochastische Anregungen und impulsartige Anregungen unterscheiden sich von ihrer Empfindungsqualität grundsätzlich.

Nachdem sich die Frequenzbereiche des akustischen und des Vibrationsempfinden überschneiden, gibt es bestimmte Phänomene, die sowohl gehört als auch gefühlt werden. Abbildung 8.14 gibt einen Überblick über verschiedene charakteristische Frequenzbereiche im Fahrzeug, die Knauer (2010) durch Auswertung unterschiedlicher Literaturangaben zusammengestellt hat.

8.3.2 Wahrnehmung von Schwingungen

Der menschliche Organismus nimmt Schwingungen über verschiedene Sinnesorgansysteme wahr. Insbesondere sind daran das Vestibularorgan, verschiedene Nervenendungen in der Hautoberfläche sowie die gesamte Propriozeption bezüglich der Körperstellung beteiligt (Griffin 1990; siehe auch ▶ Abschn. 3.2.1.3). Jedes dieser Systeme hat sein Maximum der Empfindlichkeit bei spezifischen Frequenzen. Dazu kommt, dass das Schwingungsurteil von Probanden in einem Fahrzeug durch die Wahrnehmung aus anderen Sinnesorganen insbesondere aus dem optischen und akustischen Kanal, signifikant beeinflusst wird. Es ist deshalb schwierig eine einzige bestimmende Größe zu definieren, welche den Einfluss von Schwingungen im Fahrzeug beschreibt (Mansfield et al. 2007). Die menschliche Reaktion auf Schwingungen wurde umfangreich im Labor getestet. Danach ist die Wahrnehmung von Schwingungen besonders empfindlich für solche Frequenzen, in denen der menschliche Körper biomechanische Resonanzen zeigt (Mansfield 2013). Um dies zu objektivieren, benutzt man das in Abb. 8.15 dargestellte menschenbezogene Koordinatensystem. Als Kennzahl für den Schwingungseinflusses verwendet man den Effektivwert a_{eff} der Beschleunigung, der als quadratische Mittelung der gemessenen Beschleunigung a(t) über die Einwirkungszeit T definiert ist:

$$a_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T a(t)^2 dt} \tag{8.3}$$

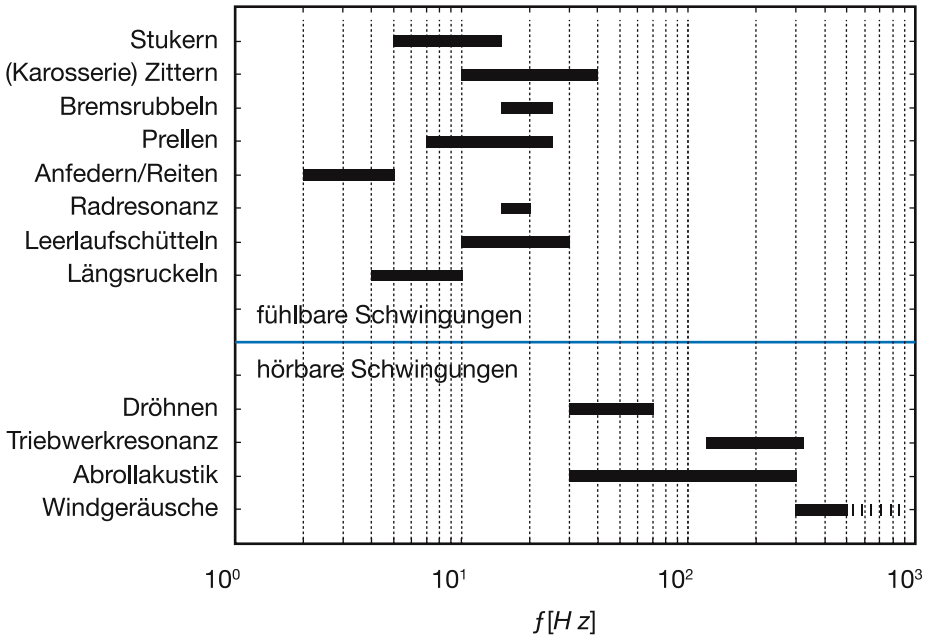


Abb. 8.14 Charakteristische Frequenzbereiche im Fahrzeug (Knauer 2010)

Abb. 8.15 Menschbezogenes Koordinatensystem

Dupuis und Zerlett (1984, 1986) stellten Kurven gleicher Wahrnehmungsstärke für Schwingungseinwirkungen auf den sitzenden Menschen in z-Richtung zusammen (Abb. 8.16).

Aus diesen Ergebnissen geht hervor, dass unabhängig von der Schwingungsbelastung a_{eff} ein Empfindungsmaximum zwischen 4 Hz und 8 Hz liegt, das aber auch auf sehr niedrige Frequenzen (< 0,4 Hz) empfindlich reagiert wird. Knauer (2010) stellt aus Untersuchungen von Dupuis (1969); Dupuis et al. (1974); Hennecke (1994); Recknagel (1995) und Scheibe (1979) Resonanzbereiche des menschlichen Organismus zusammen (Abb. 8.17). Dupuis (1993) zeigt in einer weiteren Literaturzusammenstellung, dass die Übertragung in z-Richtung zwischen Rumpf und Kopf eine Resonanz bei etwa 4 Hz besitzt und dass das Auge eine Resonanzfrequenz von ca. 20 Hz aufweist.

Aus alledem kann zunächst entnommen werden, dass extrem niedrige Frequenzen vermieden werden sollten (siehe hierzu ▶ Abschn. 8.3.5), dass der Frequenzbereich um 4 Hz besonders kritisch ist, dass auch Frequenzen um 20 Hz technisch absorbiert werden sollten, um Sehstörungen zu vermeiden und dass, wie in ▶ Abschn. 3.2.1.3 näher ausgeführt, Frequenzen um 200 Hz möglichst gut weggedämmt werden sollten, damit kein unangenehmes Vibrationsgefühl entsteht. Im Fahrzeug ist aber in all diesen Bereichen mit Schwingungen zu rechnen ist (siehe Abb. 8.14).

8.3.3 Schwingungsbewertung

In VDI Norm 2057-1 bzw. ISO 2631-1 sind die heute gültigen Bewertungsverfahren für mechanische Schwingungen veröffentlicht. In dem in der Fahrzeugtechnik üblichen Anwendungsbereich wird dafür mittels flach bauender Beschleuni-

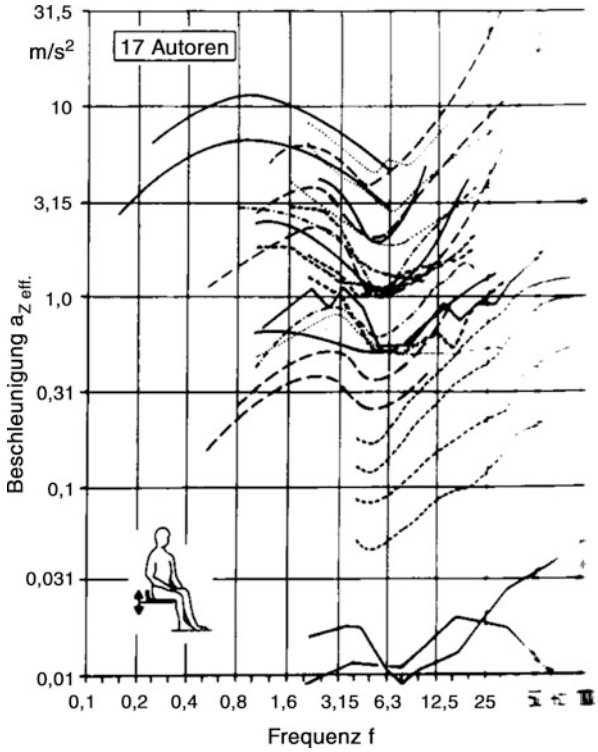


Abb. 8.16 Frequenzabhängige Kurven gleich starker Schwingungswahrnehmung – Untersuchungsergebnisse von 17 Autoren (Dupuis 1993)

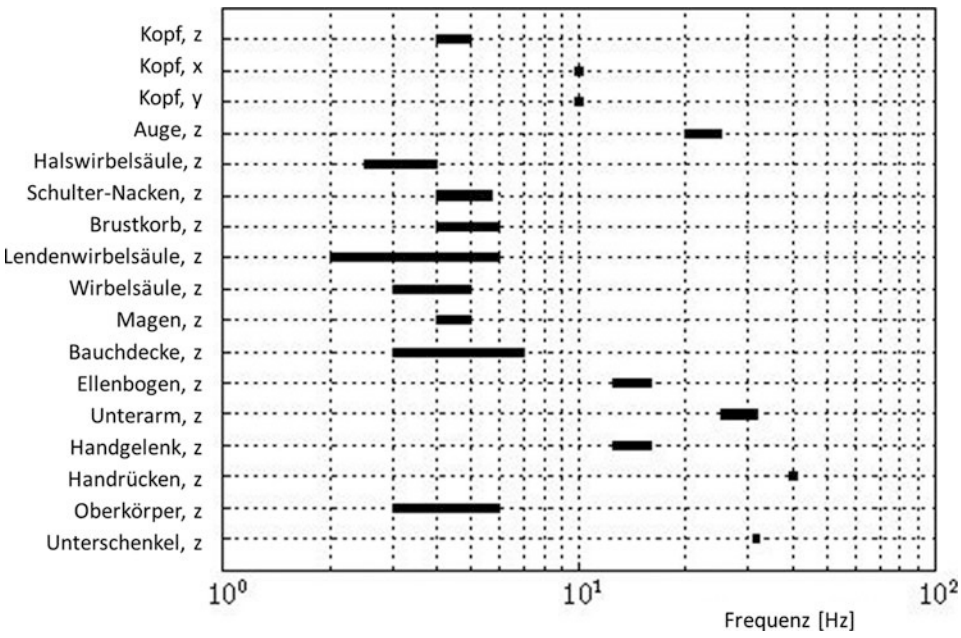
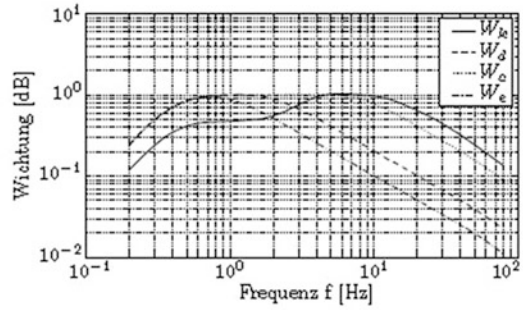


Abb. 8.17 Resonanzbereiche verschiedener Organe und Körperteile des menschlichen Organismus zusammengestellt von Knauer (2010) aus verschiedenen Literaturquellen

Tab. 8.2 Berechnungen der bewerteten Schwingungsstärke nach VDI 2057 (aus Knauer 2010)

einachsige Einpunktanregung

$$\bar{a}_w = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T a_w^2(t)\,dt}$$



Messort	Richtung	Filter
Sitzfläche	z	W_k
	x,y	W_d
Rückenlehne	x	W_c
Fußplattform	x,y,z	W_k
Rotation	r_x, r_y, r_z	W_e

mehrachsige Einpunktanregung

$$\bar{a}_{wv} = \sqrt{k_x^2\bar{a}_{wx}^2 + k_y^2\bar{a}_{wy}^2 + k_z^2\bar{a}_{wz}^2}$$

Messort	Richtung	Faktor
Sitzfläche	x,y,z	1,00
Rückenlehne	x	0,80
	y	0,50
	z	0,40

mehrachsige Mehrpunktanregung

$$\bar{a}_{wv_{ges}} = \sqrt{\bar{a}_{wv_1}^2 + \bar{a}_{wv_2}^2 + \ldots + \bar{a}_{wv_n}^2}$$

$\bar{a}_{wv_{ges}}$ [m/s^2]	Diskomfortlevel
< 0,315	nicht unkomfortabel
0,315 bis 0,63	etwas unkomfortabel
0,5 bis 1	merklich unkomfortabel
0,8 bis 1,6	unkomfortabel
1,25 bis 2,5	sehr unkomfortabel
> 2	extrem unkomfortabel

gungsaufnehmers, die zwischen Gesäß und Sitzfläche des Probanden oder an anderen zu untersuchenden Stellen angebracht werden, die auf den menschlichen Körper übertragene Beschleunigung $a_w(t)$ gemessen. In Abhängigkeit von der Raumrichtung der Schwingungseinwirkung wird der so gemessene Wert frequenzabhängig gewichtet, wodurch Abhängigkeiten der Empfindung, wie sie in Abb. 8.16 dargestellt sind, berücksichtigt werden. Von den so gewonnenen Werten werden nun jeweils die Effektivbeschleunigungen $\bar{a}_{wx}$, $\bar{a}_{wy}$ und $\bar{a}_{wz}$, berechnet. In nächsten Schritt wird die sog. mehrachsige Einpunktanregung $\bar{a}_{wv}$ bestimmt. Man erhält sie durch quadratische Mittelung der gewichteten Effektivwerte in den einzelnen Raumrichtungen (vektorielle Addition). Durch einen weiteren Faktor wird dabei berücksichtigt, ob die Anregung über die Sitzfläche oder die Rückenlehne erfolgt. Nachdem die Anregungen auf den menschlichen Körper aber über mehrere Kontaktpunkte geschehen, wird im letzten Schritt daraus die mehrachsige Mehrpunktanregung $\bar{a}_{wvges}$ berechnet. Der Ablauf diese Berechnung sowie die einzelnen Formeln dafür sind in Tab. 8.2 zusammengestellt. Neben

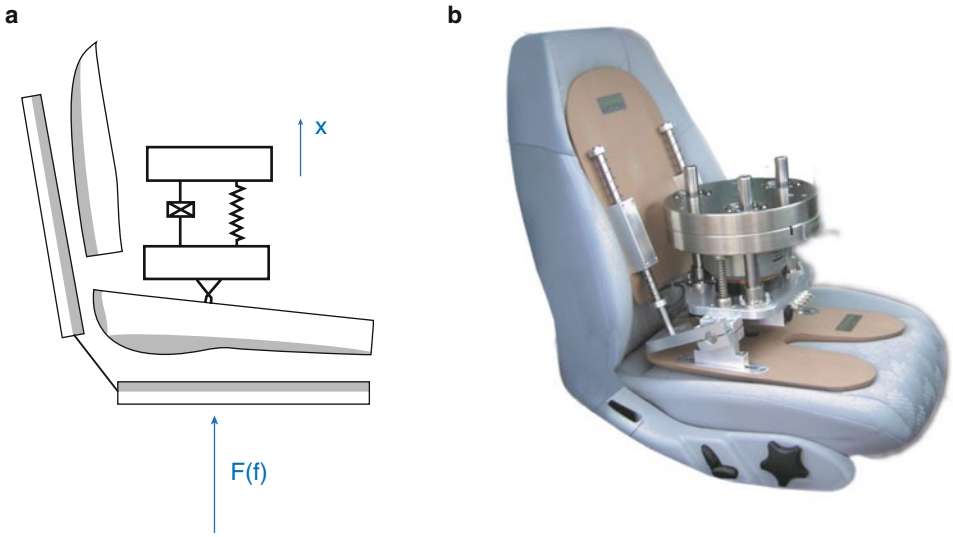


Abb. 8.18 Prinzipskizze (**a**) und **b** Aufbau des Prüfkörpers Memosik (nach Wölfel)

der Berechnungsformel für die mehrachsige Mehrpunktanregung findet sich dort auch eine tabellarische Zuordnung der gewonnenen Werte zu verbal definierten Diskomfortwerten. Als Orientierung kann dabei ein Wert $\tilde{a}_{eff} > 0{,}5\,m/s^2$ dienen, welcher den Auslösegrenzwert für gesundheitliche Schädigung bei ganztägiger Einwirkung darstellt. Dieser Wert wird im normalen PKW-Fahrbetrieb jedoch praktisch nie erreicht.

Wie Knauer (2010) kritisiert, lässt sich die Bewertung von stochastischen Anregungen nach VDI 2057-1 nicht unter allen Umständen mit Urteilen von Testpersonen in Einklang bringen. Außerdem ist die Beurteilung stoßhaltiger Schwingungsphänomene durch ein derartiges rein spektrales Verfahren nicht möglich. Weder die Anzahl der Stöße noch deren Verteilung im Zeitsignal finden dabei Eingang. Eine große Anzahl korrelativer Ansätze wurde entwickelt, um mit verschiedenen frequenzabhängigen Gewichtungsfaktoren eine Verbesserung der durch die VDI-Norm gewonnenen Kennwerte zu erreichen. Unter diesen ist besonders das Verfahren von Hennecke (1994) hervorzuheben, das eine Korrektur über einen sog. Instationaritätsfaktor vorsieht. Dadurch wird eine wesentlich verbesserte Korrelation zu subjektiven Bewertungen erreicht. In der Literatur werden darüber hinaus zahlreiche Ansätze geschildert, die das Komforturteil unter Zuhilfenahme künstlicher neuronaler Netze bestimmen. Eine Betrachtung der bekannten Anwendungen neuronaler Netze auf die Objektivierung der Bewertung von Schwingungen zeigt das stark experimentelle Vorgehen bei der Auswahl der Netzparameter. Es können damit zwar sehr gute Ergebnisse erzielt werden, die Übertragbarkeit auf neue unbekannte Datensätze ist aber schwer überprüfbar (eine Zusammenstellung all dieser Arbeiten findet sich in Knauer 2010).

Im Zusammenhang mit Schwingungseinflüssen wird traditionsgemäß dem Sitz eine hohe Bedeutung zugemessen, da man annimmt, dass durch eine gute Sitzfederung in Verbindung mit entsprechenden Dämpfungseigenschaften die Übertragung harter Stöße auf den Menschen aufgefangen werden kann. Da Versuche mit realen Personen auf vielfältige Schwierigkeiten stoßen und insbesondere wegen der genannten individuellen Abweichungen eine Objektivierung des Verhaltens der Sitze schwierig zu beurteilen ist, versucht man auf technische Lösungen auszuweichen. In vielen Fällen verwendet man dazu sog. „Wasserdummys“ (die Form eines sitzenden Menschen grob nachahmende Kunststoffgefäße bestehend aus Oberschenkel und Rücken, die mit Wasser gefüllt werden, so dass die Sitzbelastung in etwa der eines Probanden entspricht) und misst das

Übertragungsverhalten zwischen der an der Sitzschiene gemessenen Schwingungseinleitung und an dessen Kontaktfläche zum Sitz. Da dieses einfache Verfahren das komplexe Schwingungsverhalten des Menschen keineswegs wiedergeben kann, hat man versucht, entsprechende mechanische Nachbildungen des Menschen dafür einzusetzen. Das gängigste und zugleich sehr praktikable Verfahren ist der von Wölfel entwickelte Prüfkörper Memosik (◘ Abb. 8.18) . Durch ein aktives Regelsystem ist es dabei möglich, die so genannte mechanische Impendanz $I = F(v)/\dot{x}(v)$ der des Menschen anzugleichen. Damit existiert ein Mittel, das Schwingungsverhalten des Sitzes zu objektivieren.

Die Untersuchungen von Bitter et al. (2005) zeigen allerdings eine hohe Korrelation zwischen den Schwingungseinflüssen, wie sie an der Sitzschiene, am Fahrzeugboden und am Lenkrad gemessen werden zu denen auf der Sitzoberfläche. Zudem zeigt sich in dieser Untersuchung, dass offensichtlich eine Art Konstanzleistung bezüglich des statischen Sitzdrucks und des Schwingungsverhaltens existiert, d. h. zumindest in dem für Personenkraftwagen relevanten Bereich sind Insassen klar in der Lage, zwischen dem statischen Sitzdruck und den dynamischen Eigenschaften, die durch die Fahrzeugbewegung zu Stande kommen, zu unterscheiden. Diese Beobachtung widerspricht dem von Ebe und Griffin (2000) postulierten Modell, wonach sich auf den statischen Faktor ein dynamischer Faktor aufsetzt, der mit zunehmender Schwingungsamplitude (und zunehmender Zeit) ein Anwachsen des Gesamtdiskomforts verursacht.

Bei allen bisher beschriebenen Verfahren muss auf Probanden zurückgegriffen werden, deren Einfluss auf das Ergebnis aufgrund der individuellen biomechanischen Eigenschaften nicht unerheblich ist. Zudem erlauben diese Verfahren alle keine prospektive, d. h. bereits in der Planungsphase mögliche Bewertung des Schwingungseinflusses. In der Anwendung von biomechanischen Menschmodellen kann deshalb dafür der größte Fortschritt erwartet werden. Knauer (2010) gibt einen Überblick über die in Frage kommenden Modelle (◘ Tab. 8.3) . Speziell das Modell CASIMIR vermag die Übertragungsfunktion zwischen Sitz und Mensch gut vorhersagen, eine Bewertung hinsichtlich des subjektiven Diskomforts steht allerdings noch aus.

Einige Untersuchungen von Knauer (2010) können für die prospektive Diskomfortbewertung von Schwingungen aber eine Grundlage liefern. Die Erfahrung mit der Unwucht eines Rades, die man auf ebener Straße deutlich wahrnehmen kann, dessen Wahrnehmung auf einer Schlechtwegstrecke aber „im Rauschen untergeht“, zeigt beispielsweise, dass es auch im Bereich der Schwingungswahrnehmung einen Maskierungseffekt gibt. Zumindest bezüglich harmonischer Schwingungen lässt sich auch im Versuch feststellen, dass der gerade wahrnehmbare Pegelunterschied kaum von der Frequenz abhängt, der gerade wahrnehmbare Frequenzunterschied jedoch mit steigender Referenzfrequenz größer wird. Auch im Bereich der Schwingungen gilt der aus der Beurteilung von akustischen Signalen bekannte Effekt der Aufmerksamkeitszuwendung. So wird immer wieder beobachtet, dass erst, wenn der Beurteiler sich bewusst auf die entsprechende Anregung konzentriert, er in der Lage ist, einen überschwelligen Reiz auch zu detektieren. Die Wahrnehmbarkeitsschwelle scheint deshalb ein sinnvolles Kriterium für die Diskomfortrelevanz zu sein. Das gilt auch für die Beurteilung transienter Ereignisse, wie sie beispielsweise beim Überfahren eines Schlaglochs in Form eines Impulses auftreten. Bei Versuchen dazu hat Knauer auf die Übertragung durch das Lenkrad verzichtet, da dort wahrgenommene Impulse eher als Lenkungsstößigkeit bezeichnet würden. Es zeigt sich recht eindeutig, dass ein Beschleunigungssignal in der Sitzfläche mindestens um den Faktor 3,50 und in der Sitzlehne mindestens um den Faktor 3,24 größer sein muss als der Effektivwert des Grundrauschens, um als Impuls wahrgenommen zu werden. Das Ergebnis erscheint recht plausibel, wenn man bedenkt, dass bei weißem Rauschen, dem man keine herausragenden Einzelimpulse zuordnen würde, bereits 2 % der Signale um den Faktor 2,5 über dessen Effektivwert liegen. Auch der Ausschwingvorgang eines Impulses hat Auswirkung auf das Komfortempfinden. Dieser Nachschwingvorgang sollte möglichst kurz sein.

8.3.4 Komfort und Fahrsicherheit

Durch eine komfortorientierte Fahrwerksauslegung sollen die auf den Menschen übertragenen

Tab. 8.3 Übersicht über biomechanische Menschmodelle für die Berechnung von Sitzkontakt und Schwingungseinflüssen (aus Knauer 2010)

	Umfang	wesentliche Punkte
Moes 2000	Detailliertes FE-Modell eines Oberschenkels und der Hälfte des Beckens	– Modell zur Untersuchung des Sitzkomforts – Abbildung der Weichteile und der Knochenstruktur – die gemessene Druckverteilung konnte mit unterschiedlichen Materialgesetzen nicht nachvollzogen werden – Modell nicht validiert
Brosh und Arcan 2000	2D-FE-Modell des sitzenden Menschen	– Weichteilverhalten durch Eindrückversuche an Testpersonen ermittelt und auf Modell übertragen – guter Abgleich zwischen Berechnungsergebnissen und Versuchsdaten – Modell zur Untersuchung von Gewebeeigenschaften, weniger für den Sitzkomfort geeignet
Schmale 2002	MKS-Modell des Menschen und FE-Modell des Sitzes	– Mensch als starrer Körper auf weichem Sitz modelliert – Gesäß nicht deformierbar – Druckverteilung auf Sitzen ist somit nicht ermittelbar
Verver 2004	MKS-Gesamtkörpermodell und FE-Modell des Gesäßes	– Knochen und Weichteile als FE-Modell basierend auf der Analyse eines postmortalen männlichen Körpers – auf Realsitz und auf Holzplatte validiertes Modell für die Bewertung von Sitzkomfort – dyn. Sitzkomfort auf Basis des MKS-Modells im Bereich 0–15 Hz untersucht – FE-Modell wurde unter statischen Bedingungen validiert
Siefert 2013	Casimir, FE-Modell des sitzenden Menschen	– Abbildung der kompletten Skelettstruktur – Abbildung der Weichteile der Oberschenkel, des Gesäßes und des Rückens – Abbildung der Bauch und Ruckenmuskulatur – variabel in Perzentil und Haltung – Sitzdruckverteilung berechenbar – Sitzübertragungsfunktionen bestimmbar

Beschleunigungen so gering wie möglich gehalten werden und zugleich Eigenschwingungen so weit wie möglich vermieden werden, d. h. der durch Beschleunigungskräfte verursachte Diskomfort soll minimiert werden. Bereits eine einfache geometrische Überlegung zeigt, dass durch große Räder und einen langen Radstand quasi eine geometrische Mittelung der auf das Fahrzeug übertragenen Fahrbahnunebenheiten erreicht wird. Weiter weisen elementare physikalische Überlegungen darauf hin, dass eine weiche Feder (niedrige Federkonstante) in Verbindung mit einer hohen Masse (schweres Fahrzeug) die Eigenfrequenz des Systems zu gewünschten niedrigen Werten (aus dem Bereich menschlicher Eigenresonanzen heraus, siehe Abb. 8.17) verschiebt. Zugleich wird durch eine richtig ausgelegte Dämpfung das Überschwingen bei Anregung im Resonanzbereich reduziert. Tatsächlich stellt das Fahrzeug aber ein komplexes Schwingungsgebilde dar, das schon bei einer einfachen Beschreibung die Federeigenschaften der vier Reifen und die Feder-Dämpferanbindung der vier Räder an dem Fahrzeugkörper berücksichtigen muss. Bootz et al. (2011) zeigen auf der Grundlage eines vereinfachten Modells, dass im Frequenzbereich um ca. 1,5 Hz mit zunehmend weicher werdender Federung c_2 die Aufbaubeschleunigung $\Phi(\hat{z}_2)$ abnimmt, wobei eine zweite Resonanzspitze bei 10 Hz davon nicht beeinflusst wird. Auch die Radlastschwankungen nehmen in dem 1,5 Hz-Bereich ab, in dem Bereich bis 10 Hz allerdings leicht zu (Abb. 8.19).

Bei allen Versuchen, die von Bitter et al. (2005) berichtet werden, war bezüglich des Übertragungsverhaltens in z-Richtung von Sitzschiene zu Sitzfläche eine Resonanzüberhöhung bei ca. 4 Hz zu beobachten (Abb. 8.20). Nachdem in diesem Frequenzbereich

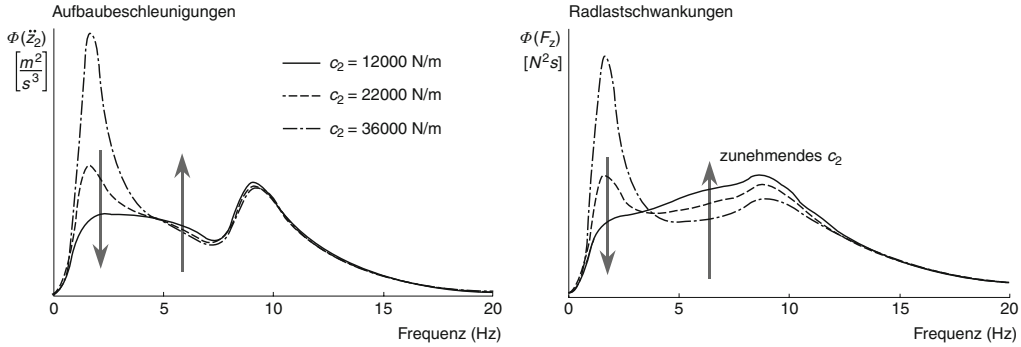


Abb. 8.19 Einfluss der Federsteifigkeit c_2 auf die Leistungsspektren von Aufbaubeschleunigung und Radlastschwankungen (aus Bootz et al. 2011)

viele Eigenenresonanzen des menschlichen Organismus liegen, muss eine Anregung seitens des Fahrzeugkörpers in diesem Bereich vermieden werden. Insofern stellt die in Abb. 8.19 gezeigte Abnahme der Aufbaubeschleunigung mit weicher werdender Federung eine anzustrebende Maßnahme dar.

Allerdings sind in diesem Zusammenhang auch die Effekte von Nick- & Rollschwingungen zu berücksichtigen. Zudem spielt es eine große Rolle, ob das Fahrzeug eher komfortabel für den Fahrer oder für Passagiere nahe der Hinterachse ausgelegt wird, so dass schließlich ein Kompromiss gefunden werden muss zwischen der Forderung nach geringem Diskomfort durch unerwünschte Aufbaubewegung einerseits und Fahrsicherheit anderseits, welche nur durch guten und gleichmäßigen Kontakt der Räder zur Fahrbahn erreicht wird. So kann man beispielsweise das Optimum für die Auslegung des Fahrwerks von Sportfahrzeugen auf Kosten des Komforts auf kleine Wankwinkel und geringere Lastschwankungen legen, was zu deutlich härteren Federn, geringerem Federweg und entsprechend straffer Schwingungsdämpfung führt.

Abbildung 8.21 zeigt links die Leistungsspektren der vertikalen Aufbaubeschleunigung des Fahrzeugs für unterschiedliche Dämpferkennlinien beim Befahren einer mittleren Landstraße. Es ist erkennbar, dass im Frequenzbereich von ca. 2–30 Hz die weiche Kennlinie des Dämpfers die Aufbaubeschleunigung zurücknimmt. Von 0,3 bis ca. 1,5 Hz reduziert jedoch die harte Kennlinie die Beschleunigungsamplituden und damit den Schwingungsdiskomfort. Im Hinblick auf die Fahrstabilität sind speziell die Radlastschwankungen zu berücksichtigen, die mit zunehmender Dämpfung zwar eine Reduktion im Frequenzbereich um 1,2 Hz und um 12 Hz bewirken, aber zugleich eine Erhöhung im Bereich um 5 Hz (Abb. 8.21 rechts). Durch verstellbare Dämpfersysteme kann man im Prinzip diese unterschiedlichen Anforderungen angleichen. Im Rahmen der technischen Entwicklung wurden verschiedene verstellbare Dämpfersysteme entwickelt, die heute bei den Fahrzeugen der höheren Leistungsklassen fast durchgängig im Einsatz sind (siehe hierzu weiteres bei Bootz et al. 2011). Eine noch bessere Anpassung an unterschiedliche Anforderungen ist durch die Kombination mit aktiven Federn möglich, durch die – je nach technischer Ausführung – auch unterschiedliche Beladungszustände berücksichtigt werden können. Von all den möglichen Ausführungsformen dafür hat sich die Luftfeder als besonders günstig erwiesen, weil durch sie auch bei unterschiedlichen Beladungszuständen des Fahrzeugs eine fast gleichbleibende Aufbaueigenfrequenz erreicht werden kann. Bootz et al. (2011) stellen fest, dass heute aus Kostengründen noch die meisten Fahrwerke konventioneller Natur, d. h. aus passiven Komponenten aufgebaut sind, man dennoch den nächsten technischen Evolutionsschritt auf dem Sektor der geregelten Fahrwerke bis hin zu den sog. „Previewing"-Fahrwerken, welche eine zeitliche und räumliche Vorausschau für Fahrspurführung und Fahrbahnunebenheiten beinhalten, zu suchen hat. Das von Mercedes vor kurzem in der S-Klasse eingeführte Magic-Body-Control stellt eine erste Serienentwicklung für das zuletzt genannte System dar. Bis zu einer Geschwindigkeit von 130 km/h ist es in der

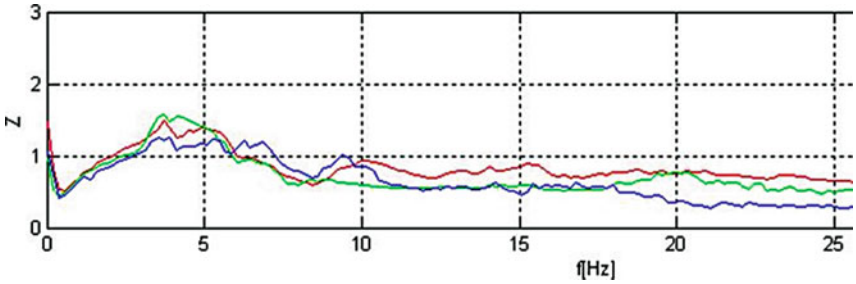


Abb. 8.20 Übertragungsverhalten Sitzschiene – Sitzfläche für drei unterschiedliche Fahrzeugsitze (Bitter et al. 2005)

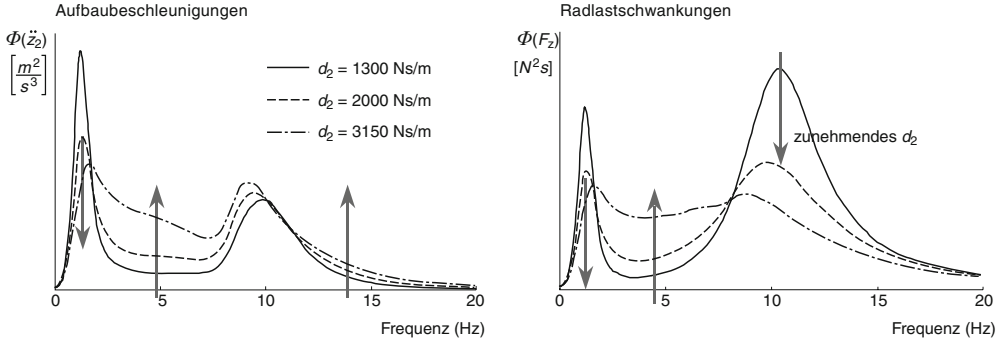


Abb. 8.21 Einfluss der Dämpfer d_2 auf die Leistungsspektren von Aufbaubeschleunigung und der Radlastschwankungen (aus Bootz et al. 2011)

Lage, Feder- und Dämpferrate auf die über eine Stereokamera erfassten Fahrbahnunebenheiten einzustellen und somit Aufbauschwankungen der Karosserie zu minimieren, ohne dabei einen Verlust der Fahrsicherheit eingehen zu müssen. Da das System auf der optischen Erfassung durch eine Kamera basiert, schaltet es sich bei schlechten Lichtverhältnissen (nachts, Regen, Schnee und Nebel) selbstständig auf die reaktive Aktivfederung zurück.

Die auf den Fahrer durch den Fahrzeugaufbau übertragenen Schwingungen haben nicht nur Einfluss auf den Diskomfort, sondern möglicherweise auch auf die Fahrerleistung. Baker und Mansfield (2010) stellten in ihren Untersuchungen keine signifikanten Differenzen zwischen der Steuerleistung ohne Schwingung und Schwingungseinwirkung ähnlich der bei einer Off-road-Fahrt fest. Wenn man allerdings die subjektive Beanspruchung mittels des NASA TL-X-Fragebogens untersucht, zeigt sich eindeutig eine Zunahme der Beanspruchung unter Schwingungseinfluss. Ähnliches wurde auch für die objektive Leistung bei der Geschwindigkeitseinhaltung beobachtet. Ein besonderes Problem stellt die Handhabung eines Touchscreens unter dem Einfluss von mechanischen Schwingungen dar. Wie Moseley und Griffin (1986) feststellen, wird die visuelle Wahrnehmung am meisten beeinflusst, wenn sich das Display relativ zum Beobachter bewegt und am wenigsten, wenn Beobachter und Display sich in Phase bewegen. Im Fahrzeug sind zwar das Ziel (Touchscreen) und Fahrer beide in Bewegung, aber die Relativbewegung hängt von der jeweiligen Frequenz ab. Bei der Resonanzfrequenz beispielsweise des Fahrerarms kann es zu bedeutenden Relativbewegungen zwischen dem Fahrer und den Bedienelementen kommen. Gerade bei Deuteaufgaben kann es dabei zu mehr als der doppelten Bewegung gegenüber der des Sitzes kommen (Griffin 1990). Eine wirksame Methode, um die Leistung des Fahrers zu verbessern, ein kleines Ziel auszuwählen, ist der Hand bei der Bedienung Kontakt zu einem Umgebungsobjekt zu ermöglichen. Bei der Bedienung von Stellteilen auf einem traditionellen Armaturenbrett ist dies ohne weiteres möglich, bei

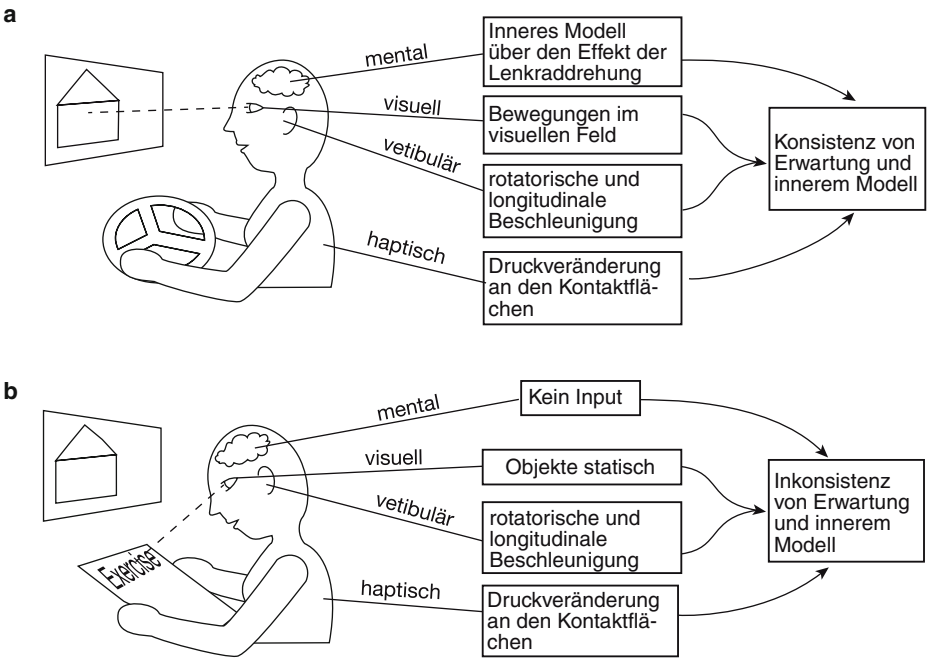


Abb. 8.22 Illustration der Informationswege für die Bewegungswahrnehmung (aus Mansfield 2013 bzw. 2005)

einem großen Touchscreen aber kaum durchführbar (ein Effekt, der übrigens bei der Überprüfung im Stand oder in Show-Room eines Fahrzeugverkäufers kaum auffällt).

8.3.5 Kinetose

Mitfahrer in einem Fahrzeug leiden häufig unter Symptomen der sog. Bewegungskrankheit (Kinetose). Die häufigsten Symptome sind dabei: Hitzegefühle, trockener Mund, Kopfweh, Benommenheit, Lethargie, unangenehme Gefühle im Magen, Seekrankheit und häufig – Sich-übergeben. Die allgemein akzeptierte Theorie für das Zustandekommen von Kinetose ist die Wahrnehmungskonflikttheorie („sensory conflict theory" oder auch „sensory rearrangement theory"). Diese Theorie gründet auf der Vorstellung der in ▶ Abschn. 3.1.3 dargestellten kombinierten Verarbeitung aus verschiedenen Sinnesorganen (siehe auch Abb. 3.11). Danach baut der Organismus optische Informationen (foveal und peripher) und Informationen aus der kinästhetischen, haptischen und propriozeptive Wahrnehmung zu einer einzigen in sich konsistenten Bewegungswahrnehmung zusammen. Für das Bestehen der Alltagsanforderungen ist Bewegungswahrnehmung auch immer verbunden mit der Erwartung: „welche Informationen werde ich erhalten, wenn ich eine bestimmte Handlung initiieren?" (siehe das ▶ Abschn. 3.2.2.4 und speziell Abb. 3.47). Mansfield (2005) hat diese Theorie durch die in Abb. 8.22 wiedergegebenen Bilder am Beispiel des Fahrers und eines in dem gleichen Fahrzeug mitfahrenden Passagiers, der sich aber nicht um den Fahrprozess kümmert (z. B. indem er ein Buch liest) illustriert. Während die vom Fahrer optisch, kinästhetisch (vestibulär) und haptisch (somatisch) wahrgenommenen Informationen mit seiner Erwartung, was passieren wird, wenn er am Lenkrad dreht, völlig konsistent sind, ergeben sich für den mitfahrenden lesenden Passagier zwischen der zwar konsistent wahrgenommenen Bewegung über den vestibulären Kanal und der Kraft über den haptischen Kanal Inkonsistenzen zu seiner optischen Wahrnehmung, die auch nicht durch eine bewusste Verarbeitung kompensiert werden. Das Beispiel ist typisch für viele Beobachtungen der Kinetose (Probst et al. 1982). Es gehört auch zu der allgemeinen Erfahrung, dass die gleichen Personen, die zu Kinetose als Beifahrer nei-

gen, keinerlei Beschwerden dieser Art haben, wenn sie selber als Fahrer agieren.

Als Ursache für diese Beobachtungen vermutet Mansfield (2013) einen Nebeneffekt der Abwehr des Körpers gegen gefährdende Gifte. Viele möglicherweise gefährliche, sogar tödliche Substanzen beeinflussen das Sinnesorgansystem, bevor sie bleibende Schädigungen verursachen. Es sei dann eine sinnvolle Reaktion des Organismus, die Ursache für diesen Effekt möglichst schnell wieder aus dem Nahrungstrakt auszuscheiden. Übermäßiger Alkoholgenuss ist ein bekanntes Beispiel für diese Reaktion des Organismus. Dieser über eine lange Entwicklungsphase in der Evolution entstandene Reaktionsmechanismus verliert aber in Verbindung mit modernen Verkehrsmitteln seinen Sinn.

Um der Kinetose vorzubeugen, ist es also sinnvoll, auch den mitfahrenden Passagieren eine möglichst gute Sicht auf die Straße zu ermöglichen (auf den Konflikt, der sich für die Rücksitzpassagiere aufgrund der Vorschriften zur passiven Sicherheit ergibt, wird in ► Abschn. 7.2.5.1 eingegangen). Neben dem erwähnten Wahrnehmungskonflikt und womöglich gerade in Verbindung damit wurde sowohl im Laborstudien als auch Feldstudien herausgefunden, dass speziell Frequenzen im Bereich von 0,2 Hz Kinetose hervorrufen (Lawther und Griffin 1987). Das sind Frequenzen, die vor allem durch die Formation der Straße zustande kommen. Nick-, Roll- und Hubbewegungen in diesem Frequenzbereich sollten also so gut wie möglich vermieden werden. Allerdings könnte eine besonders weiche – scheinbar „komfortable“ Federung, welche die Resonanzfrequenz des Fahrzeugaufbaus zu niedrigeren Frequenzen hin verschiebt, ein Aufschaukeln der Karosseriebewegung in dieser Region eher implizieren als eine harte Federung. Viele Passagiere, die eine Neigung zur Kinetose haben, berichten, dass sie weich gefederte Fahrzeuge[10] weniger tolerieren als eher hart gefederte Fahrzeuge. Nachdem man unterstellen kann, dass gerade für diese langsamen Bewegungen wenig Erfahrung mit der Koordination zu Sicht und Eigeninitiative existiert, sind weitere wissenschaftliche Erfahrungen abzuwarten, inwieweit z. B. die Previewing-Federung (Macic-Body-Control von Mercedes) für empfindliche Personen Abhilfe bereitstellt oder womöglich das Gegenteil bewirkt.

10 Ein besonders kritisches Fahrzeug in diesem Zusammenhang war der mit seiner hydropneumatischen Federung weich ausgelegte Citroën DS 19.

8.4 Klima

Das ganze komplexe Thema „Klima“ betreffend wird auf die exzellenten Zusammenfassungen in Temming (2003); Großmann (2013) und Hodder (2013) verwiesen.

8.4.1 Klima, Leistungsfähigkeit und Komfort

Im Gegensatz zu den Umweltfaktoren Beleuchtung, Schall und Schwingungen besitzt das Klima (Sammelbegriff für die thermische Umgebung des Menschen) keinen Rückmeldecharakter über den Fahrprozess. Da der Mensch aber als homöostatisches Lebewesen unter allen äußeren Temperaturbedingungen in relativ engen Grenzen eine Körperkerntemperatur von 37 °C aufrechterhalten muss, tragen die klimatischen Bedingungen erheblich zu dessen Wohlbefinden und damit auch zu seiner Leistungsfähigkeit bei. In der Geschichte der Fahrzeugentwicklung wurde dem Klima in der Fahrzeugkabine relativ spät Beachtung gezollt. Verbunden mit höherer Geschwindigkeit wurden zunächst geschlossene Fahrzeugkabinen eingeführt, um die Passagiere vor widerlichen Witterungseinflüssen zu schützen. Um der Beschlagneigung der Fensterscheiben in diesen Kabinen zu begegnen und um die Bedürfnisse der Passagiere bei höherer Außentemperatur[11] zufriedenzustellen, wurden verschiedene einfache Maßnahmen, speziell Fenster zum Öffnen (Kurbelfenster, hochzuklappende Windschutzscheibe, Ausstellfenster, bei sehr einfachen Fahrzeugen auch Schiebefenster) eingeführt[12]. In Europa wurde es erst in den 50-iger Jahren allge-

11 Bis in die 40er Jahre war es üblich, ein Fahrzeug im Winter stillzulegen.

12 Im Zubehörhandel gab es auch eine auf die Frontscheibe aufzuklebende mit elektrischen Drähten versehene Zusatzscheibe, durch die in diesem Bereich eine freie Sicht erzeugt werden sollte.

mein üblich, die Abwärme des Verbrennungsmotors zu nutzen, um das Fahrzeug im Winter zu heizen. Seit 1963 ist die Existenz einer Heizung vom Gesetzgeber vorgeschrieben. Aufgrund der relativ gemäßigten Temperaturverhältnisse in Europa war es bis um die Jahrtausendwende üblich, Fahrzeuge serienmäßig nur mit dieser vorgeschriebenen Heizung auszuliefern. Ab den achtziger Jahren wurde aber der Wunsch nach einer besseren Klimatisierung speziell unter sommerlichen Bedingungen immer größer, womöglich auch mit dem Blick auf die USA, wo Klimaanlagen bereits seit 1953 serienmäßig angeboten worden sind (die Firma Packard Motor Car stellte in den USA schon im Jahre 1939 eine komplette Klimaanlage für das Fahrzeug vor).

Eine große Zahl von Versuchen im Bereich der Arbeitswelt beschäftigte sich mit dem Zusammenhang von Klima und Leistung. Es besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen körperlicher Leistungsfähigkeit und Klimabedingungen, der aber hier mit Rücksicht auf den praktisch keine körperliche Leistung vollbringenden Fahrer keine Rolle spielt. Von Interesse sind aber die motorischen und kognitiven Fähigkeiten des Fahrers in Abhängigkeit vom Klima. Für Kältebedingungen kann man davon ausgehen, dass bei einer Lufttemperatur < 10 °C die Bewegungsgeschwindigkeiten der Extremitäten zunehmend abnehmen. Auch die Nervenleitgeschwindigkeit wird bei niedrigen Temperaturen reduziert, so dass zumindest der Output von Denkleistungen verlangsamt ist. Eine exzellente Übersicht über Hitzebedingungen bietet Temming (2003; FAT Studie Nr. 177). Danach sind insbesondere kognitive Fähigkeiten bei Temperaturen > 30° C_{eff} (siehe ▶ Abschn. 8.4.2) eingeschränkt, wobei hier jüngere Personen offensichtlich weniger betroffen sind als ältere. Ein Zusammenhang mit Verkehrsunfällen und Bedingungen, die nur auf das Klima zurückzuführen sind, konnte in dieser Studie nicht nachgewiesen werden. Auch die Erwartung, dass die Aggressivität mit den klimatischen Bedingungen zusammenhängt, ist wissenschaftlich nicht eindeutig belegbar. Aufgrund allgemein arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse kann man allerdings festhalten, dass jede Belastung, die zu Diskomfort führt, unter bestimmten Bedingungen zumindest die kognitive Leistungsfähigkeit allein dadurch beeinträchtigt, dass gedankliche Ressourcen an die Unannehmlichkeit gebunden werden und damit Kapazität für die eigentliche Fahraufgabe verloren geht.

8.4.2 Klimatische Behaglichkeit

8.4.2.1 Thermoregulation

Wie bereits in ▶ Abschn. 3.2.1.4 dargestellt, erfolgt die Thermoregulation des menschlichen Organismus über die vor allem im Hypothalamus befindlichen Warmrezeptoren und die auf der Hautoberfläche verteilten Kaltrezeptoren. Ein klimatisch neutrales Gefühl (Behaglichkeit = kein spürbarer Diskomfort) wird erreicht, wenn sich auf der Hautoberfläche eine Temperatur zwischen 33 und 34 °C einstellt. Dass die als behaglich empfundene Temperatur deutlich darunter liegt, hängt im Wesentlichen an der Wirkung der Kleidung, welche im Bereich der Hautoberfläche ein Mikroklima schafft, welches diese Temperatur bereitstellt. Aufgrund aller wissenschaftlichen Befunde kann man unterstellen, dass sich Behaglichkeit dann einstellt, wenn der Aufwand des Organismus, die genannte Hautoberflächentemperatur zu halten, minimiert ist. Dieser Aufwand hängt von den klimatischen Bedingungen maßgeblich ab. Diese sind zu allererst bestimmt durch die *Lufttemperatur*. Normalerweise gibt der Körper dabei durch Konvektion (Austausch der auf der Hautoberfläche erwärmten Luft durch kältere Luft) und Körperkontakt (Berühren von niedertemperaturigen Objekten; z. B. kalter Fahrzeugsitz – über diesen Weg kann natürlich umgekehrt auch Wärme auf den Körper übertragen werden z. B. Sitzheizung) Wärme an die Umgebung ab. Bei zu niedriger Lufttemperatur kann er durch Körperbewegung (wegen des schlechten Wirkungsgrades der Muskulatur, u. a. Kältezittern) Wärme erzeugen. Bei zu hoher Lufttemperatur kann die Wärmeabgabe über den Weg der Konvektion durch Erhöhung der *Luftgeschwindigkeit* verbessert werden (Zufächern von Luft). Eine weitere Steigerung der Wärmeabgabe ist durch Ausschüttung von Schweiß möglich. Die für die Verdunstung dieser Flüssigkeit notwendige Wärme wird der Umgebung, also speziell der Hautoberfläche entzogen. Auch der Effekt der Verdunstung kann durch Luftbewegung deutlich verbessert werden. Allerdings hängt er erheblich

davon ab, wie viel Feuchtigkeit die Luft überhaupt aufnehmen kann (bei 100 % Luftfeuchtigkeit kann keine weitere Feuchtigkeit mehr aufgenommen werden. In diesem Fall bringt die Schweißbildung also keinen Effekt.) Damit ist neben der bereits erwähnten Luftbewegung auch die *relative Luftfeuchtigkeit* ein wesentlicher das Behaglichkeitsklima definierender Faktor. Wie jeder Körper steht auch der menschliche Körper im Strahlungsaustausch mit der Umgebung (jeder Körper sendet entsprechend seiner Oberflächentemperatur elektromagnetische Strahlung aus, bei den üblichen Umgebungstemperaturen im Wesentlichen im langwelligen infraroten Bereich). Wenn die Oberflächentemperatur der umgebenden Flächen mit der Oberflächentemperatur des Körpers (hier spielt die Oberflächentemperatur auf der Kleidung die entscheidende Rolle) übereinstimmt, so herrscht Strahlungsgleichgewicht, das heißt über *Strahlung* erfolgt kein Wärmeaustausch. Ist die Oberflächentemperatur der umgebenden Flächen deutlich höher als die des Körpers, so wird über diesen Weg Wärme auf den Körper übertragen, die dann gegebenenfalls über die oben angesprochenen Mechanismen wieder abgegeben werden muss. Umgekehrt kann auch der Körper über den Weg der Strahlung Wärme abgegeben, wenn diese deutlich niedrigere Temperatur als die Körperoberfläche haben (speziell im Winter geschieht dies durch kalte Karosserieteile).

Der beschriebene physikalische Prozess hängt aber erheblich davon ab, wie viel Wärme tatsächlich vom Körper produziert wird und wie dem Körper individuell die Möglichkeit gegeben wird, die produzierte Wärme zu halten oder abzugeben. Damit wird die empfundene Behaglichkeit zusätzlich zu den oben genannten Bedingungen erheblich beeinflusst durch den individuellen Energieumsatz (sog. Metabolismus) und durch die getragene Kleidung. Dazu besitzt der Organismus die Fähigkeit – wie auch bei anderen Umwelteinflüssen – sich an längerfristig existierende Bedingungen zu akklimatisieren (anpassen).

Der ***Energieumsatz*** hängt vom Alter, dem Geschlecht und den Körperabmessungen (Größe und Gewicht) ab. Wegen des großen Einflusses der Körperabmessungen wird der Energieumsatz [W] häufig bezogen auf die Körperoberfläche [m^2] angegeben [W/m^2]. Ein mittlerer erwachsener Mann (70 kg, 1,75 m Körperhöhe) mit einer Oberfläche von etwa 1,8 m^2 hat unter normalen Fahrbedingungen etwa eine Wärmeabgabe von 70 W/m^2. Bei schlechteren Fahrbahnbedingungen kann sich wegen der dann notwendigen körperlichen Aktivität dieser Energieumsatz leicht erhöhen (Hodder 2013). Diese Angabe hat Gültigkeit für gemäßigte Klimazustände. In heißer Umgebung kann aufgrund erhöhter Pulsfrequenz und verstärktem Schwitzen mit einem Ansteigen um 5 bis 10 W/m^2 gerechnet werden (DIN EN 28996, 1993).

Die ***Kleidung*** kann erheblich zum Erhalt thermischen Komforts beitragen. Die Isolationswirkung der Kleidung bewirkt einerseits, dass bei entsprechend niedriger Temperatur die effektive Wärmeabgabe des Körpers die Bedingungen der behaglichen Oberflächentemperatur der Haut einhält. Durch Anpassung der Bekleidung an die Temperaturverhältnisse kann dieser Effekt zudem weitgehend reguliert werden. Unter extremen Bedingungen kann sogar dafür gesorgt werden, dass die Wärmeübertragung von außen auf den Körper (insbesondere Strahlungswärme) in Grenzen abgehalten wird. Die Wirkung der Kleidung wird durch die international übliche Maßeinheit „clothing unit" (Kurzbezeichnung clo) definiert. Der Bezugswert von 1 clo gilt definitionsgemäß für den „typischen Büroanzug". Schätzwerte für typische Bekleidungskombinationen können aus ◘ Tab. 8.4 entnommen werden.

Temming (2003) stellt bezüglich der klimatischen ***Akklimatisation*** verschiedene Literaturergebnisse zusammen. Danach kann zwar nach mehr als acht Tagen damit gerechnet werden, dass bei einer dem Hitzeklima ausgesetzten Person ein nennenswerter Akklimatisationseffekt zu beobachten ist. Allerdings beziehen sich alle gefundenen Literaturstellen auf Beobachtungen zu schwerer körperlicher Arbeit unter Hitzeklima. Nach übereinstimmender Meinung der meisten der zitierten Autoren ist die Akklimatisierung auf das Ausmaß der Schweißbildung zurückzuführen, die selbst wieder durch die erhöhte Körpertemperatur gesteuert wird. Die Dauer der Hitzeexposition müsse dabei mindestens 1 Stunde täglich betragen, um eine erhöhte Körpertemperatur und die damit verbundene vermehrte Schweißbildung zu bewirken. Auch für ältere Personen können vergleichbare Akklimatisierungsgewinne beobachtet werden. Für ruhig sit-

Tab. 8.4 Isolationswerte von Bekleidungskombinationen nach DIN ISO 7730 (1987)

Art der Bekleidungskombination	Isolationswert	
	$m^2 \cdot °C/Watt$	clo
Unbekleidet	0	0
Kurze Hose (Shorts)	0,015	0,1
Typische Kleidung in tropischen Gebieten: Unterhose, Shorts, kurzärmliges Hemd mit halsfernen bzw. offenem Kragen, leichte Strümpfe und offene Schuhe	0,045	0,3
Leichte Sommerbekleidung: Unterhose, lange, leichte Hose, kurzärmliges Hemd mit halsfernen bzw. offenem Kragen, leichte Strümpfe und Schuhe	0,08	0,5
Leichte Arbeitskleidung: Unterwäsche, Baumwollarbeitshemd mit langen Ärmeln, Arbeitshosen, Wollsocken und Schuhe	0,11	0,7
Typische Winterkleidung für Innenräume: Unterwäsche, Hemd mit langen Ärmeln, Hosen, Jacke oder Pullover mit langen Ärmeln, dicke Strümpfe und Schuhe	0,18	1,0
Schwere, traditionelle, europäische Bürokleidung: Baumwollunterwäsche mit langen Beinen und Ärmeln, Hemd, Anzug bestehend aus Hose, Weste und Jacke, Wollstrümpfe und schwere Schuhe	0,23	1,5

zende Personen und Expositionszeiten von mindestens 6 Stunden ist allerdings nur eine Anhebung der Toleranzgrenze um ca. 2 K[13] zu beobachten. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die genannten Akklimatisierungseffekte keine Auswirkung für das Diskomfortempfinden im Fahrzeug haben.

8.4.2.2 Zusammenfassende Klimamaße

Wegen der Komplexität der einzelnen die Klimawahrnehmung beeinflussenden physikalischen Größen hat es immer wieder Versuche gegeben, diese zu einer einzigen das Klimaempfinden beschreibenden Größe zusammenzufassen. Der Vorteil eines solchen Vorgehens ist, zu erkennen, welche Wirkung die gestalterische Änderung einer physikalischen Größe hat und daraus dann entsprechende Maßnahmen abzuleiten. Es gibt dafür zwei vom Ansatz her verschiedene Vorgehensweisen. Die eine Methode versucht, Klimakombinationen zu finden, die jeweils zu dem gleichen Temperaturempfinden führen (etwa im Sinne der Kurven gleicher Wahrnehmungsstärke im akustischen Bereich). Der bekannteste und älteste Vertreter dieser Variante ist die Effektivtemperatur nach Yaglou (1927). Dem schließen sich eine Reihe modifizierter Verfahren an, die unter dem Begriff Klimasummenmaße zusammengefasst werden. Die zweite Methode besteht darin, auf der Basis einer Art Energiebilanz den Anteil der Personen abzuschätzen, welche die jeweilige Klimakombination als behaglich empfinden. Das bekannteste System dieser Version wurde von Fanger (1967 u. ff.) entwickelt. Auch hier schließen sich eine Reihe von modifizierten Verfahren an, durch welche besondere Einflussaspekte berücksichtigt werden sollen. Eine umfassende Zusammenstellung und Diskussion all dieser Verfahren findet sich in Temming (2003).

Klimasummenmaße

In den zwanziger Jahren wurde in den USA von Yaglou (1927) ein integrierendes Klimamaß ent-

13 Die Celsius-Skala stellt ein Maß auf Intervallskalenniveau dar und hat deshalb nur Bedeutung, wenn man durch sie den Temperaturzustand beschreiben möchte. Wenn man die Differenz von Temperaturwerten angeben will, ist es deshalb korrekt, die Temperaturskala nach Kelvin zu verwenden (K = 273 + x °C). Es ergeben sich dabei natürlich die gleichen Zahlenwerte.

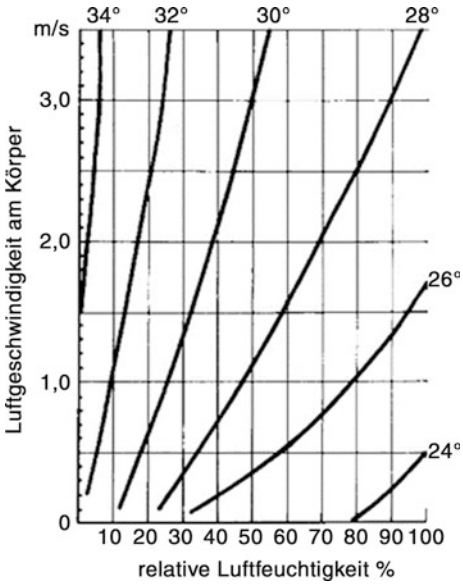


Abb. 8.23 Die zum Erreichen einer effektiven Temperatur von $t = 23\,C_{eff}$ notwendige Luftgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur (aus: Bubb & Schmidtke 1984)

wickelt, welches alle Kombinationen aus Lufttemperatur, psychometrischer Feuchttemperatur (ein Maß für die relative Luftfeuchtigkeit[14]) und Strömungsgeschwindigkeit der Luft durch eine Maßzahl bezeichnet, die bei den Versuchen übereinstimmendes Wärmeempfinden der Probanden bewirkte. Aus den Versuchsergebnissen wurden zwei Nomogramme (eines für bekleidete und eines für unbekleidete Personen) entwickelt, mit denen zeichnerisch aus beliebigen Kombinationen der genannten drei Klimafaktoren ein einziger das Wärmeempfinden beschreibender Wert, die sog. „Effektivtemperatur t_{eff}" ermittelt werden kann. Die Diagramme sind unter anderem in DIN 33 403, Teil 3 (2000) enthalten. In der Zwischenzeit sind Arbeiten bekannt geworden, die den Inhalt der Nomogramme in Form von Gleichungen darstellen, so dass die Effektivtemperatur für konkrete Klimakombinationen auch numerisch berechnet werden kann (Müller und Gebhart 1999; Gebhardt et al. 1999). Die Effektivtemperatur kennzeichnet das Wärmeempfinden, das sich bei der entsprechenden namensgebenden Trockentemperatur, keiner Luftbewegung und 0 % relativer Luftfeuchte einstellt. Für sitzende, praktisch nicht-körperliche Arbeit verrichtende Tätigkeit wird für neutrales Temperaturempfinden von einem Bereich von $t_{eff} = 19°C_{eff}$ bis $23°C_{eff}$ ausgegangen. Unter Anwendung der oben genannten Nomogramme haben Bubb und Schmidtke (1984) die zum Erreichen eines neutralen Temperaturempfindens von $23\,°C_{eff}$ notwendige Luftgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit in einem Diagramm zusammengestellt (Abb. 8.23).

Das von Yaglou ursprünglich entwickelte Nomogramm enthält nicht den Einfluss der Strahlungstemperatur. Es wurden verschiedene Vorschläge gemacht, diesen Nachteil zu berücksichtigen. Weitgehend durchgesetzt hat sich die Empfehlung, anstelle der Trockentemperatur die so genannte Globetemperatur zu messen und diese anstelle der Trockentemperatur im Yaglou's Nomogramm zu verwenden. Der Messfühler des Globethermometer befindet sich im Zentrum einer schwarz lackierten Kupferkugel mit einem Durchmesser von 150 mm. Der so ermittelte Wert wird „korrigierte Effektivtemperatur" genannt. Auch was die Größe und Definition dieses Globethermometer anlangt werden in der Literatur unterschiedliche Varianten geschildert.

Wie bereits erwähnt, wurde eine Vielzahl von weiteren Summenmaßen entwickelt. Es wird diesbezüglich auf die Zusammenstellung in Hodder (2013) und speziell Temming (2003) verwiesen.

Komfortgleichung nach Fanger

Die von Fanger (1970) entwickelte Komfortgleichung geht zunächst von der Wärmebilanz des Körpers aus: Die vom Körper aufgrund seines Grundumsatzes erzeugte Wärme $\dot{q}_{met}$ abzüglich der über die verschiedenen Mechanismen (Wärmeleitung, Konvektion, Strahlung, Diffusion, Verdampfung

14 In einer als Psychrometer bezeichneten Apparatur wird die Temperatur mit einem Thermometer gemessen, dessen Messfühler mit einem befeuchteten Wattebausch umgeben ist und der mit vorgeschriebener Luftbewegung befächert wird. Durch die Verdunstungskälte wird dem Thermometer Wärme entzogen, so dass es eine niedrigere Temperatur anzeigt als die parallel gemessene sog. Trockentemperatur. Die Differenz ist umso größer, je geringer die relative Luftfeuchtigkeit ist. Der so gewonnene Wert wird als „Feuchttemperatur" bezeichnet.

Tab. 8.5 Empfinden und Skala der PMV nach DIN EN ISO 7730

Empfinden	*PMV*	Unzufriedene [%]
Heiß	3	100
Warm	2	78
Leicht warm	1	26
Neutral	0	5
Leicht kühl	–1	26
Kühl	–2	78
Kalt	–3	100

von Schweiß und Atmung) abgegebenen Wärmeströme $\dot{q}_{ab,n}$ stellt den Aufwand des Organismus dar, die Körperkerntemperatur von 37 °C zu halten.

$$\dot{q}_{met} - \sum_{n=1}^{n} \dot{q}_{ab,n} = \sum \dot{q} \tag{8.4}$$

Aufgrund von aufwändigen psychophysischen Experimenten mit Probanden (siehe hierzu auch ▶ Abschn. 11.3.1.2) hat er untersucht, welcher Aufwand welcher Empfindung zuzuordnen ist. Mittels regressionsanalytischer Verfahren hat er daraus ein „vorhergesagtes durchschnittliches Gesamtempfinden" der klimatischen Bedingungen, die PMV (Predicted Mean Vote) entwickelt:

$$PMV = 0{,}303 \cdot e^{(-0{,}036 \cdot \dot{q}_{met} + 0{,}028)} \cdot \sum \dot{q} \tag{8.5}$$

Das Verfahren von Fanger ist in vielen Normen (u. a. DIN EN ISO 7730) enthalten und stellt somit den „Stand der Technik" der Klimabewertung dar. Für die Berechnung der Wärmeströme gibt es dort viele detaillierte Angaben. Eine übersichtliche Darstellung dazu findet sich auch bei Großmann (2013). Tabelle 8.5 gibt die verbale Zuordnung zu den *PMV*-Werten sowie den zu erwartenden Prozentsatz der Unzufriedenen in den einzelnen Kategorien nach Fanger wieder.

Nach Erfahrungen von Großmann (2013) kann statt der Gl. 8.5 im automobilrelevanten Bereich von Stoffwechselraten bis 150 W/m² auch die folgende vereinfachte Version genutzt werden:

$$PMV = \frac{3{,}8}{\dot{q}_{met}} \cdot \sum \dot{q} \tag{8.6}$$

In jedem Fall wird ersichtlich, dass für den Fall der ausgeglichenen Wärmebilanz $\sum \dot{q} = 0$ auch der *PMV*-Wert zu 0 wird. Nach den Erfahrungen von Fanger sind dabei aber immer noch 5 % der Probanden mit dem Temperaturverhältnissen unzufrieden (siehe Tab. 8.5). Mayer (1998) hat bei einem eigenen Pkw-bezogenen Versuch sogar herausgefunden, dass der Prozentsatz der Unzufriedenen selbst bei $PMV = 0$ noch bei 15 % liegt. In einer weiteren Veröffentlichung stellt er übrigens fest, dass sich im Fahrzeug die meisten Menschen bei einem $PMV = 0{,}5$ wohl fühlen, wobei dann immer noch 18 % der Personen unzufrieden sind (Mayer et al. 2007).

Der von Fanger entwickelte *PMV*-Wert bezieht sich eigentlich auf die Klimatisierung in immobilen Arbeits- und Aufenthaltsräumen. Wegen der engen Verhältnisse im Fahrzeug muss das Modell für diese Anwendung jedoch erweitert werden. Dazu wird die Oberfläche des Menschen in Flächenelemente aufgeteilt und speziell die Absorption der direkten Sonneneinstrahlung berücksichtigt, um so die lokalen einzelnen Wärmeströme zu beurteilen. Auf der Basis der Fanger'schen Behaglichkeitsuntersuchungen wurden spezifische Bewertungsmethoden entwickelt, die anstelle des globalen Komforts den lokalen Komforts in einzelnen Körperteilen mit dem LMV (Local Mean Vote) bewerten (Bureau et al. 2003; Frühauf 2002; Kühnel et al. 2003; Beispiel siehe Abb. 8.24). Einer einfachen Summation der Wärmeströme sind dabei übrigens Grenzen gesetzt: z. B. könnte ein kalter linker und zugleich heißer rechter Fuß ein neutrales Empfinden in der Berechnung vortäuschen. Auch deshalb sind lokale Bewertungen wichtig (weiteres dazu in Großmann 2013). Eine Vielzahl von Veröffentlichungen beschäftigt sich mit der Modifikation dieser Komfortgleichungen, um sie den Gegebenheiten hoher thermischer Belastung besser anzupassen. Es wird in diesem Zusammenhang auf die ausführliche Darstellung in Temming (2003) verwiesen. Wegen der Unsicherheit der Beurteilung durch Probanden werden für die Beurteilung des Klimas im Pkw immer häufiger Klimamesspuppen eingesetzt, um eine Objektivierung der lokalen Bewertung zu ermöglichen (Abb. 8.25).

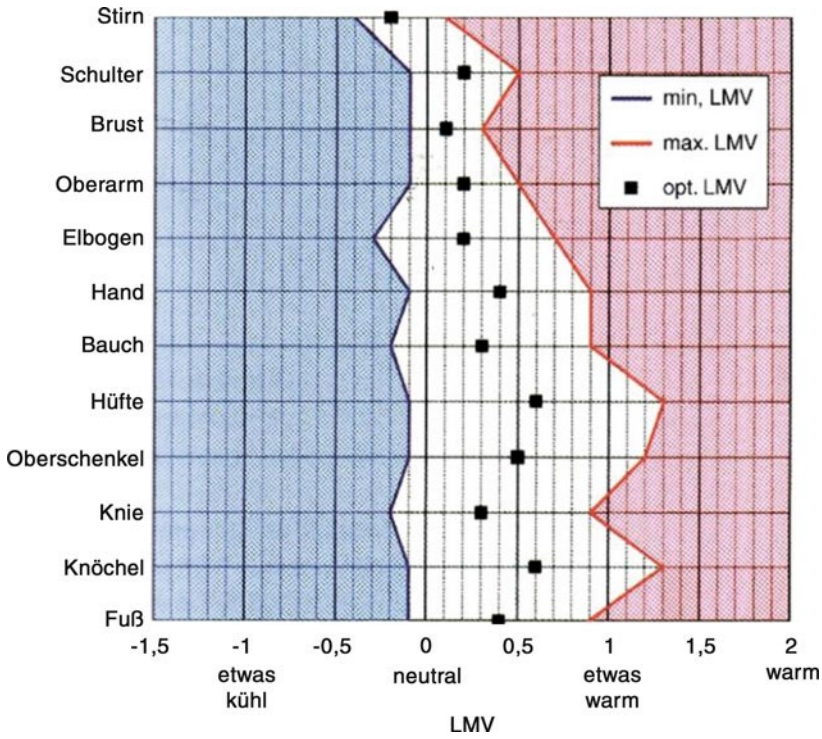


Abb. 8.24 Komfortbewertung an Körperteilen mit LMV (aus Wawzyniak 2011)

8.4.3 Umweltbedingungen

Fahrzeuge werden weltweit unter extremen klimatischen Bedingungen eingesetzt. Temming (2003) und seine Arbeitsgruppe stellen einige interessante Außenklimadaten zusammen, wobei sie sich schwerpunktmäßig auf die Verhältnisse in Deutschland beziehen. In diesem Zusammenhang wird auch auf das „Handbook of Fundamentals" (ASHRAE 1997) verwiesen, das von der American Society of Heating, Refrigeriating and Air Conditioning Engineers alle vier Jahre aktualisiert herausgegeben wird. Dieses Grundlagenwerk enthält zwar überwiegend Klimadaten für die USA, darüber hinaus aber für praktisch alle interessierenden Länder der Welt Orientierungsdaten. Nach DIN 1946-3 (2006–2007) können die Temperaturen der Außenluft weltweit zwischen −45 und 55 °C betragen. In DIN 4710 (2003) sind umfangreiche meteorologische Daten für Deutschland zusammengestellt. Die Klimadatenrichtlinie VDI 4710,1 (2008) beschreibt außereuropäische Klimadaten für die Gebäudetechnik. Als Beispiel gibt Großmann (2013) die in Tab. 8.6 wiedergegebenen Werte an.

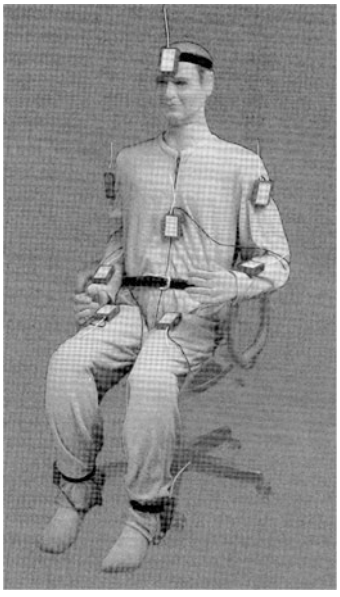


Abb. 8.25 Klima Messpuppe DRESSMAN (Mayer et al. 2007, Quelle Fraunhofer-Institut für Bauphysik)

Fahrzeuge werden im Allgemeinen so ausgelegt, dass sie in einem Temperaturbereich zwischen −20 und 40 °C betriebsbereit sind. Das entspricht auch

Tab. 8.6 Beispiele für Lufttemperaturen und relative Feuchte an verschiedenen Standorten (aus Großmann 2013)

Standort	Lufttemperatur °C	Relative Luftfeucht %
Phoenix (USA)	43	15
München	30	50
Tokyo	30	75

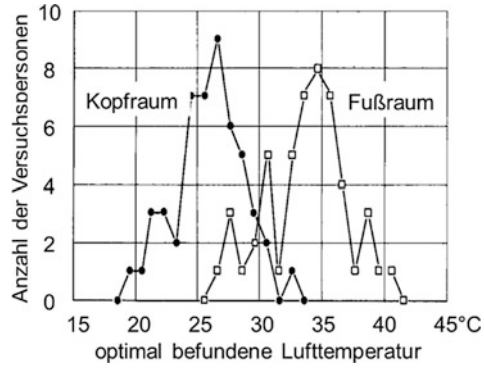


Abb. 8.26 Als behaglich empfundene Kopf und Fußtemperatur im Pkw (nach Amano und Imai 1971)

den in Europa gemessenen Temperaturverhältnissen (z. B. Russland Kotlas: −18 °C, 30 Frosttage; Granada: 35 °C). Allerdings gibt es davon auch extreme Abweichungen, so wurden im Winter 2013/14 an der Ostküste der USA −45 °C gemessen und im selben Zeitraum in Südamerika +40 °C. Auch in Deutschland sind Extremwerte möglich: Großmann (2013) berichtet, dass am 27. Juli 1983 in Manching (Nähe Ingolstadt) eine Lufttemperatur von 38,7 °C gemessen wurde und in Gärmersdorf bei Amberg am selben Tag sogar 40,2 °C. In München bewegt sich die am Airport gemessene Temperatur normalerweise über das Jahr zwischen −4 °C im Januar und 25 °C im Juli.

Wenn man von extremen winterlichen Bedingungen absieht, so ist zumindest für die gemäßigten klimatischen Bedingungen in Europa der winterliche Betrieb durch eine ausreichende Heizung, die bis zu einer Außentemperatur von −10 °C noch angenehme Innentemperaturen zu erzeugen vermag, ggf. unterstützt durch eine Zusatzheizung, gut abzudecken. Eine besondere Herausforderung stellen aber die sommerlichen Klimabedingungen dar. Sie spielen deshalb in den verfügbaren Veröffentlichungen eine besondere Rolle. Temming (2003) stellt eine Vielzahl von Datenblättern für sommerliche Außentemperaturen zusammen. Unter anderem stellt er fest, dass sich speziell lokale Unterschiedlichkeiten nicht nur großräumig aufgrund von verschiedenen Höhenlage oder Auswirkung von See- und Landklima ergeben, sondern auch durch kleinflächige Besonderheiten wie die Bebauungsdichte und die Vegetation. Er zitiert in diesem Zusammenhang Völksch (1978), der aufgrund einer umfangreichen Literaturrecherche festgestellt hat, dass bei austauscharmen nächtlichen Wetterlagen in Großstädten Differenzen bis zu 10 °C gegenüber dem umgebenden Freiland beobachtet werden können.

Entsprechend der physikalischen Zusammenhänge, dass Luft mit höherer Temperatur eine größere Feuchtigkeitsmenge aufzunehmen vermag, werden die höchsten Feuchtigkeitsgehalte der Außenluft (9 g/kg) an heiteren Tagen im Juli im Gegensatz zu den niedrigsten im Januar (ca. 3,5 g/kg) beobachtet. Nach Dufner et al. (1993) liegen die Feuchtigkeitsgehalte der Luft in ländlichen Bereichen im Sommer typischerweise um 8 % höher als in städtischen Gebieten. Die Unterschiede sowohl hinsichtlich der Lufttemperatur als auch hinsichtlich des Feuchtigkeitsgehaltes zwischen städtischen und ländlichen Gebieten werden dabei im Wesentlichen auf die Wasserdampfabgabe der Vegetation sowie auf die Unterschiede der Taubildung zurückgeführt.

Der Wärmeeintrag durch die Sonne stellt, neben extremer Kälte für die Klimatisierung des Fahrzeugs die größte Herausforderung dar. Die Intensität der Sonnenstrahlen hängt dabei von der Jahreszeit, der Tageszeit, dem Breitengrad auf der Erde und dem Wolkenbehang ab. Großmann (2013) macht dazu detaillierte Angaben und gibt Berechnungsbeispiele. Im Allgemeinen kann man davon ausgehen dass die maximale Sonnenintensität in den Sommermonaten in Mitteleuropa zwischen 800 und 1000 W/m² beträgt. Die langwelligen Wärmestrahlen der Sonne gelangen durch die Fensterscheiben des Fahrzeugs in das Fahrzeuginnere und heizen die Oberflächen der dort befindlichen Gegenstände (Armaturenbrett, Lenkrad, Sitze, Hutablage usw.) auf. Die von den

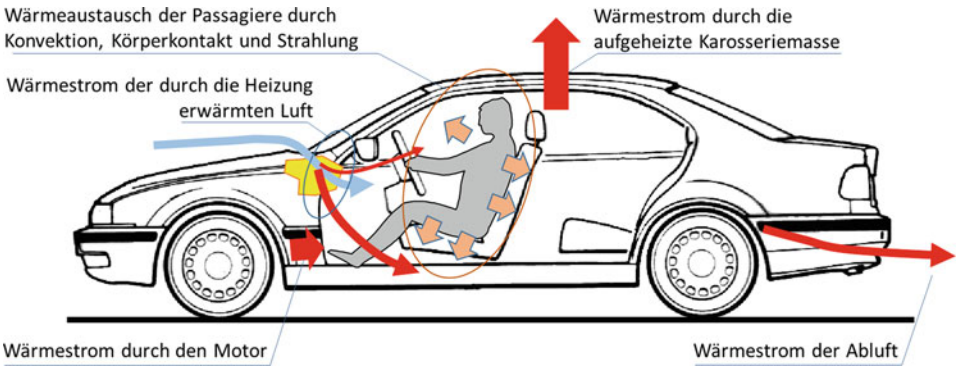


Abb. 8.27 Wärmestrom durch den Fahrgastraum im Winterbetrieb.

erwärmten Gegenständen abgegebene Strahlung kann nur zum Teil durch die Fensterscheiben, welche die Wärmestrahlung teilweise absorbieren, nach außen abgegeben werden. Zum größten Teil wird aber die in dem Fahrzeug befindliche Luft durch Konvektion von den heißen Oberflächen aufgeheizt. Im stehenden Fahrzeug besteht kein Luftaustausch mit der Umgebung, so dass auf diese Weise sehr hohe Lufttemperaturen entstehen (sog. Treibhauseffekt). Temming (2003) berichtet von Temperaturen zwischen 42–51 °C im Fußraum, 55–67 °C im Kopfraum und Temperaturen bis zu 100° auf den Blechoberflächen, die in einem Fahrzeug gemessen wurden, das jeweils 2 Stunden in der mittäglichen Sonne einmal bei 26 °C in 52° nördlicher Breite (Kassel) und zum anderen Mal bei 43 °C in 33° nördlicher Breite (Phoenix, Arizona, USA) stand. Diese extremen Temperaturen können zwar durch den Betrieb des Fahrzeugs mehr oder weniger schnell (Zeiträume von mehreren Minuten) reduziert werden, da nun ein Austausch der Fahrzeuginnenluft über das Lüftungssystem bzw. geöffnete Fenster erfolgen kann. Wegen des beschriebenen Treibhauseffektes kommt es aber dennoch immer – auch im Betrieb – zu einer sommerlichen Temperaturüberhöhung von mehreren Grad Celsius (zwischen 5 und 10 °C je nach technischer Voraussetzung) in der Fahrgastkabine. Im Hinblick auf die Wärmebelastung im Innenraum ist dabei zusätzlich von Bedeutung, dass die genannten Temperaturüberhöhung nicht die direkte Wirkung der Wärmestrahlung enthalten, weil die zitierten Werte zumeist mit einfachen Thermometer gemessen wurden (Temming 2003).

8.4.4 Anforderungen an die Technik

8.4.4.1 Fahrbetrieb

Nach Großmann (2013) ist es üblich, die mittlere Innenraumlufttemperatur in einem Fahrzeug als arithmetisches Mittel aus der mittleren Temperatur in Höhe des Fußraums und in Kopfhöhe zu bestimmen. Während nach DIN 1946-2 (1994–2001) in Wohnräumen von Gebäuden eine mittlere Innenraumtemperatur von 22 °C empfohlen wird, ist nach den Erfahrungen von Großmann die mittlere Temperatur im Fahrzeug sowohl im Winter als auch im Sommer höher. Das hat verschiedene Gründe.

Winterbetrieb

Speziell im Winter geben die Fahrgäste Wärmestrahlung an die kalten Scheiben ab. Da der Abstand der Seitenscheiben im Vergleich zu entsprechenden Wänden und Scheiben in Gebäuden sehr gering ist, muss für ein behagliches Klima im Fahrzeug die Luft im Fußraum deutlich wärmer sein als in Kopfhöhe. Großmann empfiehlt eine Lufttemperaturschichtung von 5–12 K. Temming (2003) gibt aufgrund einer Literaturzusammenstellung dafür Temperaturdifferenzen von 4–8 K an (siehe auch Abb. 8.26). Nach Großmann (2013) muss bei einer Außenlufttemperatur von −20 °C daher im stationären Zustand eine mittlere Innenraumlufttemperatur von 28 °C erreicht werden.

Abbildung 8.27 zeigt schematisch den Wärmestrom in einem Fahrzeug im Winterbetrieb. Die von der Heizungsanlage erwärmte Luft strömt in den Innenraum. Nach Angaben von Großmann

(2013) liegt dabei der Luftmassenaustausch unter Gebläseeinsatz zwischen 7–9 kg/min. Weible und Kern (1984) geben dazu Maximalwerte im Bereich von 8–10 kg/min an. Er ist zudem stark von der Fahrgeschwindigkeit abhängig. Die gesamte Karosseriemasse steht in einem Wärmeaustausch mit dieser warmen Innenluft, zusätzlicher Aufheizung durch die Motorwärme und abgeführter Wärme an die kalte Außenluft[15]. Die Passagiere geben Wärme durch Strahlung an die Karosserieteile mit niedriger Oberflächentemperatur und durch Kontakt, vor allem an den Sitz, aber auch an andere Objekte, die berührt werden (Lenkrad, Armstütze), ab. So gesehen, stellt es einen Komfortgewinn dar, wenn ein Fahrzeug mit Sitzheizung ausgerüstet ist (sinnvollweise gilt das auch für die Fondsitze; siehe auch Brooks und Parson 1999). Für die Auslegung ist dabei zu berücksichtigen, dass im Winter viele das Fahrzeug mit Winterkleidung nutzen, welche u. U. einen hohen Isolationswert besitzt. Dazu kommt auch noch der Isolationswert der Sitze, der nach Hodder (2013) mit 0,2 Clo angesetzt werden kann. Nachdem für eine längere Fahrt ggf. aber auch auf die Winterkleidung verzichtet wird, ist also eine Regulierung der Leistung der Sitzheizung unabdingbar.

Technisch bedingt hängt die Heizleistung eines Fahrzeugs von vielen Umständen wie z. B. Fahrzustand (Geschwindigkeit, Berg/Talfahrt) Oberflächentemperatur der Straße, Lufttemperaturschwankungen, Sonneneinstrahlung ab. Eine Regulierung der Heizwirkung ist deshalb in jedem Fall notwendig. Nach Petzold (1975) liegt die Wahrnehmungsschwelle für Temperaturschwankungen im Bereich von etwa 1 K. Nach DIN 1946 (2006–2007) sollte die zeitliche Abweichung vom Sollwert der Raumtemperatur einen Wert von 2 K nicht über- bzw. unterschreiten. Dies macht eine technische Regulierung der Austrittstemperatur des Heizungssystems notwendig.

Wie es für den im Folgenden beschriebenen Sommerbetrieb relevant ist, gilt auch für den Winterbetrieb, dass die individuellen thermischen Behaglichkeitsansprüche sehr stark unterschiedlich sind (siehe ◘ Tab. 8.5). Das bedeutet, dass eine individuelle Regulierung der Heizleistung für die einzelnen Sitzplätze notwendig ist. Heute wird – meist in Verwendung mit einer Klimaanlage – zumindest für die Vordersitze eine getrennte Regelung für den Fahrer- und Beifahrersitzplatz angeboten. Eine Luftzuführung an den Rücksitzraum und eine von dem Frontraum unabhängige Regulierung ist zusätzlich notwendig, um auch den Fondpassagieren individuelle thermische Behaglichkeit zu gewährleisten.

Ein Problem des winterlichen Fahrbetriebs für die Insassen ist die durch die niedrige Außentemperatur bedingte geringe Luftfeuchtigkeit (siehe auch ▶ Abschn. 8.4.3). Indem diese Luft durch die Heizungsanlage erwärmt wird, ist die resultierende relative Luftfeuchtigkeit im Fahrzeuginnenraum entsprechend niedrig. Nach verschiedenen Empfehlungen wird eine Luftfeuchtigkeit zwischen 30 und 50 % als optimal dargestellt (u. a. Sterling et al. 1985; zitiert nach Temming 2003, siehe auch Deyhle und Bienert 2011). Eine technische Befeuchtung der Fahrzeuginnenluft wäre also sinnvoll, insbesondere, da ab einer Luftfeuchte von ca. 40 % auch die störende elektrostatische Aufladung weitgehend reduziert werden kann (McIntyre 1980). In diesem Zusammenhang ist allerdings auch auf die in ▶ Abschn. 8.4.4.3 beschriebenen Anforderungen zu verweisen, da letztlich durch niedrige Luftfeuchtigkeit ein Beschlagen der Scheiben vermieden werden kann.

Sommerbetrieb

In den gemäßigten Klimazonen Europas und auch vielen anderen Teilen der Welt kann nicht von einer generellen Akklimatisierung an die sommerlichen Klimaverhältnisse ausgegangen werden und selbst wenn dies erfolgt, ist der entsprechende Effekt relativ gering (siehe hierzu auch ▶ Abschn. 8.4.1). Folglich ist davon auszugehen, dass für sommerliche Fahrbedingungen an die Behaglichkeitsverhältnisse im Fahrzeuginnenraum ähnliche Anforderungen zu stellen sind wie unter winterlichen Fahrbedingungen.

◘ Abbildung 8.28 zeigt schematisch die Wärmeströme durch den Fahrgastraum im Sommerbetrieb. Ohne Klimaanlage tritt die Außenluft mit nahezu unveränderter Temperatur in den Innenraum ein. Das erwärmte Blechgehäuse bewirkt unter anderem, dass die über das Lüftungssystem angesaugte Luft zusätzlich erwärmt wird, was als „Sommerluft-

15 Für die detaillierten Berechnungen dieser Daten wird auf die ausführliche Abhandlung von Großmann (2013) verwiesen.

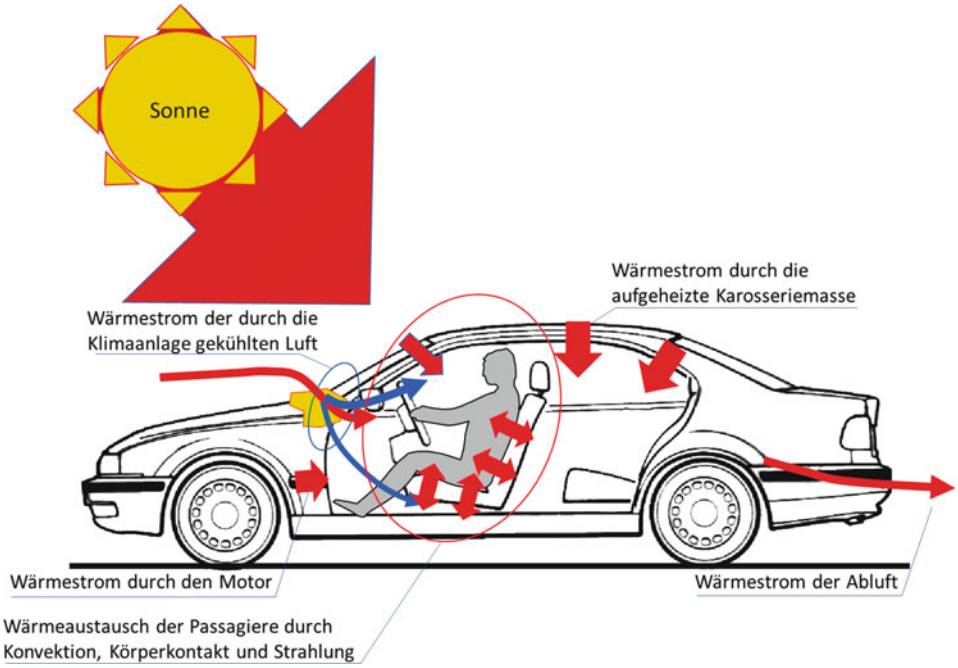


Abb. 8.28 Wärmestrom durch den Fahrgastraum im Sommerbetrieb

aufheizung auf der Motorhaube“ bezeichnet wird. Nachdem die Absorption der Sonnenstrahlung auch erheblich von der Lackfarbe abhängt, zeigen sich hier unterschiedliche Effekte, die sich insbesondere im langsamen Stop-and-Go-Betrieb auswirken (Großmann 2013). Wenn man von dem marginalen Kühlungseffekt durch den Fahrtwind absieht, so hat die Karosseriemasse im stationären Fahrbetrieb ohne Sonneinstrahlung in etwa die gleiche Temperatur wie die Außenluft. Dazu kommt die Erwärmung der Blechgehäuse durch den Motor im vorderen Fußraum und insbesondere am Getriebetunnel. Durch eine Klimaanlage kann im Allgemeinen erreicht werden, dass trotz höherer Außenlufttemperatur die Innenraumtemperatur in den Bereich der Behaglichkeit verschoben wird[16].

Die Verhältnisse ändern sich gravierend, wenn durch die thermische Strahlung der Sonne ein zusätzlicher Wärmestrom hinzukommt. Der Strahlungsaustausch mit der Sonne bewirkt in jedem Fall eine entsprechende Erwärmung der Karosseriemasse, welche selbst wieder zu einer Aufheizung der Innenluft beiträgt. Damit verbunden ist aber auch Wärmestrahlung (detaillierte Angaben und Überlegungen dazu finden sich in Temming 2003). Großmann (2013) berichtet, dass bei einer Außenlufttemperatur von 40 °C, eine Sonnenbestrahlung von 1000 W/m^2 und einer relativen Luftfeuchte von 30 % an den Düsen der Klimaanlage 8 °C gemessen wurde. Infolge der Sonneneinstrahlung und anderer Effekte erwärmte sich die Luft bei der Durchströmung des Fahrgastraumes von diesen 8 auf 27 °C, wobei die mittlere Lufttemperatur in Kopfhöhe bei 21 °C lag.

Der entscheidende Einfluss geschieht aber durch die Direkteinstrahlung der langwelligen elektromagnetischen Sonnenstrahlung durch die Fenster. Diese bewirkt nicht nur den oben dargestellten Treibhauseffekt, der wegen des Luftaustauschs im fahrenden Fahrzeug weniger bedeutungsvoll ist als die direkte Bestrahlung der Körperpartien der Passagiere. Dieser Einfluss hängt natürlich erheblich von den Witterungsbedingungen, der Position der Sonne und damit der Tageszeit und in Relation dazu

16 In Abb. 8.23 wurde bereits dargestellt, welche teilweise extremen Luftgeschwindigkeiten ohne Klimaanlage notwendig sind, um eine Behaglichkeit garantierende Effektivtemperatur von 23 C_{eff} zu erreichen.

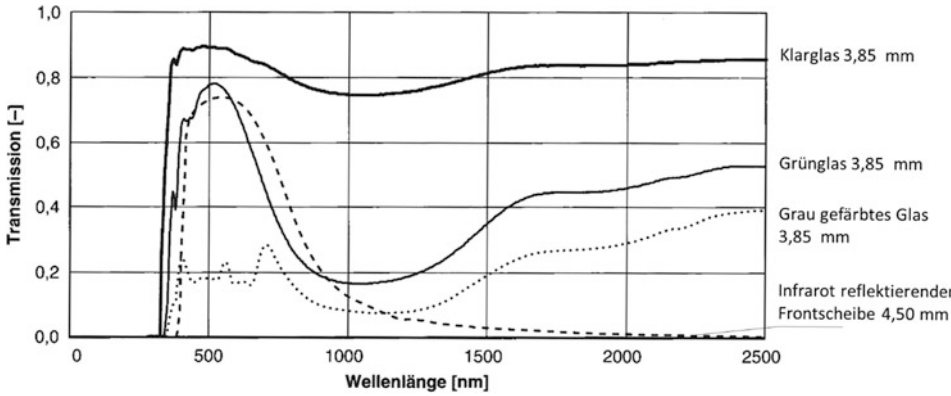


Abb. 8.29 Transmission verschiedener Glassorten in Abhängigkeit von der Wellenlänge (Quelle: NSG Group Pilkington Automotive, nach Großmann 2013)

8

der Fahrtrichtung des Fahrzeugs ab (näheres dazu siehe Großmann 2013). Durch die großen flachstehenden Fensterflächen ist dieser Einfluss gegenüber historischen Fahrzeugen deutlich gestiegen.

Wärmeschutzverglasung, welche das Eindringen der thermischen Strahlung reduzieren soll, wurde daher inzwischen zum Standard. Es werden dafür absorbierende und reflektierende Scheiben sowie Mischformen davon verwendet. Die absorbierenden Scheiben enthaltenen Partikel (z. B. Eisenoxid beim klassischen Grünglas), welche die Wärmeeinstrahlung der Sonne aufnehmen. Durch den Fahrtwind wird diese Wärme an die Umgebungsluft abgegeben. Bei den reflektierenden Scheiben ist eine dünne Schicht (z. B. Zinnoxid) auf die Außenseite aufgedampft. Somit kann auch ohne Fahrtwind vermieden werden, dass ein Teil der Sonneneinstrahlung in die Fahrerkabine eindringt (Großmann 2013). Abbildung 8.29 zeigt als Beispiel die Wirkung verschiedener Gläser. Auffällig ist die hohe Absorptionswirkung des Infrarot reflektierenden Glases für die langen Wellenlängen. Verschiedene Autoren weisen aber auch darauf hin, dass man durch die Wahl der Kleidung (zum Beispiel weiße Kleidungsstücke statt schwarzer) den Einfluss der Strahlungswärme stark reduzieren kann (Schwab 1994). Roller und Goldman (1968) fanden sogar, dass durch die Dicke des Bekleidungsmaterials die Transmission solarer Energie auf den Körper reduziert werden kann. Wenn der Körper direkter Bestrahlung ausgesetzt ist, kann die Haar- und Kleidertemperatur um 15–18 K ansteigen, während bei entsprechend ausgesetzter blanker Haut nur einen Temperaturanstieg zwischen 5 und 6 K zu verzeichnen ist (Clark 1981).

Die wirksamste Methode, den Effekt thermische Strahlung zu kompensieren, besteht darin, die entsprechenden Körperpartien mit durch die Klimaanlage abgekühlter Luft zu befächern. Wie Temming (2003) feststellt, werden von Pkw-Insassen mit steigender Außentemperatur abnehmende Lufteintrittstemperaturen in den Fahrgastraum gewünscht. Abbildung 8.30 zeigt das Ergebnis von Messungen über mehrere Monate in einem klimatisierten Fahrzeug bei längeren Erprobungsfahrten durch 8 individuelle Fahrer. Es zeigt sich deutlich, dass bei niedrigen Außentemperaturen (winterliche Bedingungen) hohe Eintrittstemperaturen des Heizungssystems bis zu 40 °C verlangt werden, dass bereits bei Außentemperaturen unterhalb von 20 °C die Klimaanlage im Betrieb war und dass mit zunehmender Außentemperatur die Austrittstemperatur an den Luftdüsen auf Werte bis zu 10 °C und darunter eingestellt wurden. Auch Deyhle und Bienert (2011) empfehlen für die Fahrzeugklimatisierung eher geringe Luftgeschwindigkeiten verbunden mit niedrigen Ausblastemperaturen. Das bedingt relativ große Austrittsöffnungen, da im Fahrzeug hohe Luftmengen über verhältnismäßig wenige Luftaustrittsquerschnitte ausgetauscht werden müssen, um den unterschiedlichen thermischen Anforderungen gerecht zu werden. Hinz et al. (1983) verlangen für einen großen Pkw im Sommer einen Luftdurchsatz von bis zu 10 m^3/min, um die geforderte maximale hohe Luftgeschwindigkeit von 2–3 m/s im Innen-

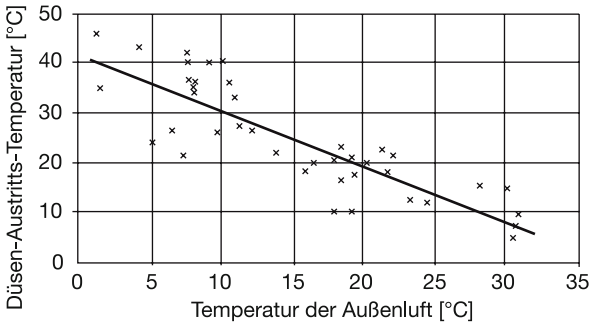


Abb. 8.30 individuell eingestellte Lufteintrittstemperaturen in einem klimatisierten PKW (aus Temming 2003)

raum erreichen zu können (siehe auch Berechnungen von Großmann 2000). Asakai und Sakai (1974) bezeichnen Werte zwischen 1,5–2,1 m/s in Körpernähe für notwendig, um im Sommer einen Kühleffekt durch die Fahrzeuglüftung zu gewährleisten. Andererseits werden Geschwindigkeiten oberhalb etwa 3 m/s als unbehaglich verworfen. Zipp et al. (1977) haben festgestellt, dass die Belüftung des Brust-Schoßbereiches, sowohl was die objektiv messbaren Effekte als auch was die subjektive Beurteilung anlangt, dabei die besten Ergebnisse zeigt. Der Luftstrom sollte möglichst gleichmäßig verteilt sein, was durch eine größere Düsenzahl bzw. Düsen mit großer Austrittsöffnung und durch eine größere Entfernung der Düse vom Passagier erreicht werden kann. In diesem Zusammenhang ist allerdings auch zu bedenken, dass es bezüglich der Vorlieben durchaus unterschiedliche Ansprüche gibt. So bevorzugen Europäer und Asiaten überwiegend eine eher indirekte, diffuse Klimatisierung mit niedrigen Luftgeschwindigkeiten, während Nordamerikaner direkt gerichtete große Luftmassenströme verbunden mit entsprechender Kälteleistung der Klimaanlage vorziehen (Deyhle und Bienert 2010). Diesen unterschiedlichen Anforderungen versucht man durch spezielle Ländervarianten der Klimaregelung und durch sog. Komfortausströmer gerecht zu werden, welche eine Anpassung an die individuellen Komfortbedürfnisse durch Stellungen zwischen „diffus“ (zugfrei), „konventionell“ und „spot“ (direkter Luftstrom) zulassen (Fritsche und Feith 2007). Asakai und Sakai (1974) vertreten zudem die Meinung, dass durch eine pulsierende Strömung vorzugsweise bei etwa 1,2 Hz eine angenehme Kühleempfindung hervorgerufen werden könne. In neueren Bewertungsansätzen (zum Beispiel DIN 1946 Teil 2, 2006–2007) wird bei höheren Turbulenzgrad eine geringere mittlere Luftgeschwindigkeit gefordert, um Zugempfindungen zu vermeiden. Nach Angaben von Temming (2003) bleibt vorerst offen, ob die durch erhöhte Turbulenzgrade gesteigerte Wärmeabgabe nicht gerade bei hohen Umgebungstemperaturen auch positive Auswirkungen haben könnte. Eine Anwendung solcher Überlegungen im Fahrzeug ist noch nicht bekannt geworden.

Gerade durch den Kontakt mit dem Sitz ergibt sich für die Insassen des Fahrzeugs eine weitere das klimatische Empfinden beeinflussende Problemzone. Der Körper tritt mit dem Sitz in einen Kontaktwärmeaustausch. Madsen (1994) fand in einer Studie mit einer Klimamesspuppe, dass ein ventilierter Sitz die Abfuhr von Hitze verbessern kann. Das eigentliche Problem liegt aber wesentlich darin, dass in einem erhitzten Fahrzeuginnenraum die Passagiere Schweiß absondern, um durch Verdunstungskälte ihre Körperkerntemperatur aufrechtzuerhalten. Das geschieht natürlich auch im Rücken- und Gesäßbereich, wo der Körper in Kontakt mit dem Sitz ist. Wenn der Sitz die Feuchtigkeit nicht aufzunehmen kann, entsteht ein unangenehmes Gefühl unter anderen auch dadurch, dass der Schweiß selbst wenig wärmeleitfähig ist und es folglich zwischen der Haut und der Kontaktfläche zu einem Hitzestau kommt. Fung und Parson (1993) haben ausgedehnte Untersuchungen mit verschiedenem Sitzmaterial gemacht. Ihre Probanden wurden einer Hitzeumgebung (34 °C, Luftfeuchtigkeit 35 %) ausgesetzt und sollten das thermische Empfinden bewerten. Am schlechtesten wurden dabei die Sitze bewertet, die aufgrund ihres Oberflächenmaterials oder des benutzten Schaumstoffs undurchlässig für Feuchtigkeit waren. Spätere Untersuchungen von Fung (1997) ließen aber erkennen, dass der

Einfluss von Kleidung, die Dauer der Versuchszeit und intraindividuelle persönliche Bevorzugungen es unmöglich machten, ein ideales Sitzmaterial herauszufinden. Cengiz & Babalik (2007) bewerteten den thermischen Komforts dreier unterschiedliche Fahrzeugsitze in einem Feldversuch und fanden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Sitzen unter Realbedingungen (zitiert nach Hodder 2013).

Elektrofahrzeuge

Eine besondere Herausforderung stellt die Klimatisierung (Heizen und Kühlen) von Elektrofahrzeugen dar, weil einerseits vom Elektromotor keine überschüssige Prozesswärme zur Verfügung steht und andererseits jeder Energieaufwand zur Herstellung eines behaglichen Innenraumklimas von den mitgeführten Energieressourcen zehrt und damit die Reichweite der Fahrzeuge reduziert. Auch eine bessere Wärmeisolierung des Innenraums, durch welche Wärmeabfuhr nach außen im Winter und Wärmeeintrag von außen im Sommer vermindert werden könnte, bringt keinen durchschlagenden Effekt, weil die Forderung nach hohen Luftdurchsatz in dem kleinen Volumen der Passagierkabine nach wie vor erhalten bleibt. Die technisch an sich mögliche Nutzung von Verbrennungssystemen für die Klimatisierung konterkariert die umweltschonende Wirkung des Elektroantriebs. Es bleibt eine Aufgabe zukünftiger ergonomischer Forschung, die klimatischen Behaglichkeitsbedürfnisse des Menschen unter diesem besonderen Aspekt neu zu untersuchen, um festzustellen, durch welche Maßnahmen man bei minimalem Energieeinsatz optimale Effekte erzielen kann. Man könnte sich dabei z. B. die Tatsache zu Nutze zu machen, dass sich klimatische Behaglichkeit bei einer Hautoberflächentemperatur zwischen 33 und 34 °C einstellt. Nahe am Körper angebrachte Heiz- bzw. Kühlelemente, die nicht den gesamten Raum klimatisieren müssen, scheinen hier einen Erfolg versprechenden Weg zu weisen. Eine sehr extreme Idee wäre in diesem Zusammenhang eine „Klimakleidung", in welcher in dem Stoff Peltier-Elemente als Heiz- bzw. Kühlelemente in Verbindung mit Thermosensoren eingewebt sind, bei der ein mitgeführter Regler (Mikroprozessor) für die genannte Hauttemperatur sorgt. Der Energieaufwand für diese Art der Klimatisierung dürfte relativ niedrig sein, so dass für den Straßenbetrieb eine handelsübliche Batterie als Stromversorgung genügen dürfte. Für das Fahren würde man die Kleidung an die Stromversorgung des Fahrzeugs anschließen.

8.4.4.2 Fahrbeginn

Unter klimatischen Gesichtspunkten stellt der Einstiegs-(Dis)-Komfort ein wesentliches Kriterium für die Akzeptanz des Fahrzeugs dar. Im Winter nimmt das Fahrzeug nach längerem Parken im Freien die Außentemperatur an. Bei entsprechender kalter Witterung entsteht so eine hohe Diskrepanz zwischen der subjektiven Erwartung eines „anheimelnden" Innenraums und den tatsächlichen Gegebenheiten. Im Sommer heizt sich das Fahrzeug gerade bei Sonneneinstrahlung nach längerem Parken durch den beschriebenen Treibhauseffekt beträchtlich auf. Im Innenraum herrscht dann gegebenenfalls eine Lufttemperatur, die weit oberhalb jeglicher Behaglichkeitsansprüche liegt. Zudem erreichen durch den thermischen Strahlungsaustausch mit der Sonne die Oberflächen im Innenraum partiell Temperaturen, die im schlimmsten Fall sogar zu Verbrennungen führen können.

Winterbedingungen

Nach Großmann (2013) erwärmt sich der Verbrennungsmotor nach 10–20 Minuten soweit, dass die Insassen die übertragene Wärme im Fahrgastraum empfinden. Abbildung 8.31 zeigt den Verlauf der mittleren Innenraumtemperatur bei einer kontrollierten Messung in einer Klimakammer mit Rollenprüfstand (näher beschrieben bei Großmann 2013). Eher praxisbezogene Messungen wurden von der Zeitschrift Auto-Motor-und-Sport im Januar 2013 (Übler 2013) vorgenommen. Die untersuchten Testfahrzeuge standen eine Nacht bei −15 °C im Freien. Zu Testbeginn war die Außentemperatur −11 °C. Es wurden die Temperaturen im Kopfraum (Innenspiegel) und im Fußraum (Beifahrer Fußraum) gemessen. Die Fahrzeuge wurden in Kolonne in gleichmäßiger, verhaltener Fahrt (max. 80 km/h) bewegt. Abbildung 8.32 zeigt die Temperaturverläufe für das Fahrzeug mit dem schnellsten Temperaturanstieg (links) und dem langsamsten

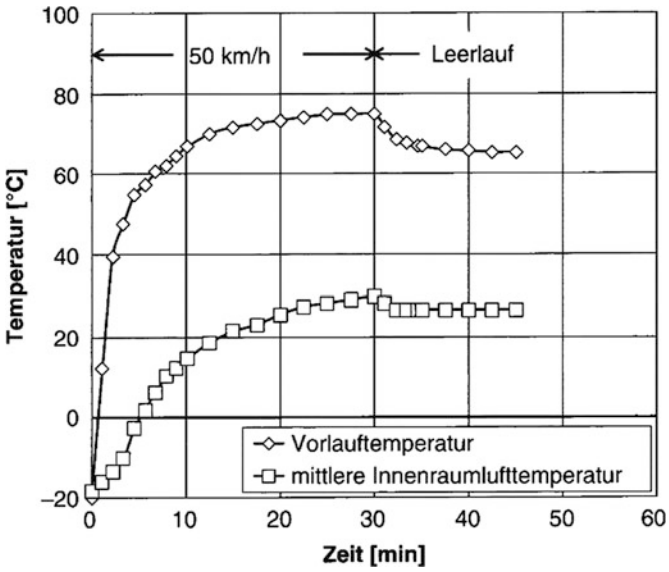


Abb. 8.31 Heizleistungsmessungen an einem PKW mit einem 1,8 l Ottomotor mit Direkteinspritzung; Außenlufttemperatur −20 °C, 30 min Fahrgeschwindigkeit 50 km/h, danach Leerlauf; luftseitige elektrischer Zuheizer mit 800 W; die Vorlauftemperatur ist die Kühlwassertemperatur: Messung auf einem Rollenprüfstand (aus Großmann 2013)

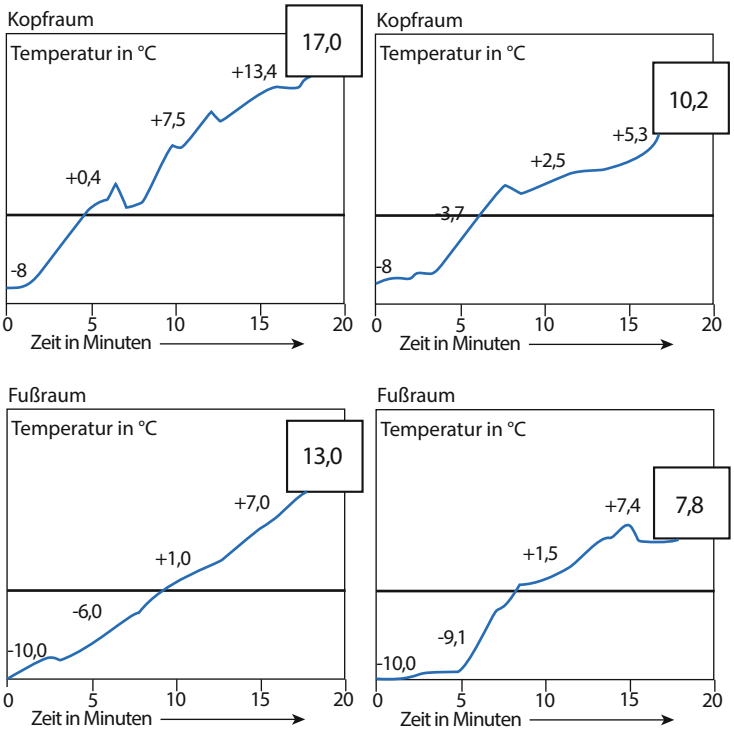


Abb. 8.32 Temperaturverläufe im Kopf und Fußbereich zweier Fahrzeuge bei einer Außentemperatur von −11 °C und einer realen Fahrt mit maximal 80 km/h (Übler 2013)

Temperaturanstieg (rechts). Bei allen Fahrzeugen ist ein nahezu linearer Anstieg der Temperatur speziell im Kopfraum zu beobachten. Selbst bei dem besten Fahrzeug wurde unter diesen realistischen Bedingungen, die noch dazu im Gegensatz zu der in Abb. 8.31 dokumentierten Labormessung günstigere Temperaturen bereitstellten, nach 20 Minuten noch keine Temperatur erreicht, die den oben ge-

Tab. 8.7 Bauteil und Lufttemperaturen in einem geparkten schwarzen Pkw (inklusive schwarzer Innenausstattung) und einem weißen (inklusive weißer Innenausstattung) bei Sonneneinstrahlung, Außenlufttemperatur 30 °C, Sonnenintensität 1000 W/m² (aus Großmann 2013)

Bezeichnung der Messstelle	Temperaturen in einem weißen PKW [°C]	Temperaturen in einem schwarzen Pkw [°C]
Luft in Kopfhöhe	67	75
Luft im Fußraum	44	46
Instrumententafel, Mitte	72	99
Instrumententafel, Hutze	78	102
Dachhimmel, Mitte	67	46
Hutablage, Mitte	73	100
Kofferraumdeckel, innen	64	86
Beifahrersitz	62	74
Armablage in der Vordertür	61	73
Lenkrad	70	90
Schalthebel	62	72
Sitzlehne der Rücksitzbank, Mitte	78	95

nannten Behaglichkeitsempfehlungen entspricht. Großmann (2013) empfiehlt deshalb verschiedene Zusatzheizungen (u. a. elektrische Zusatzheizung, Wärmespeicher, elektrische Vorerwärmung des Kühlmittels, Nutzung der Motorrestwärme), deren Technik im Einzelnen beschrieben wird. Speziell die Standheizung stellt nach seiner Argumentation die komfortabelste Lösung dar. Gerade wegen des trägen Temperaturanstieges unter winterlichen Bedingungen sind zusätzlich Sitz- und Lenkradheizung zu empfehlen, um den durch extrem niedrige Temperaturen verursachten Diskomfort bei Inbetriebnahme des kalten Fahrzeugs vorzubeugen.

Sommerbedingungen

Ein in der Sonne abgestelltes Fahrzeug heizt sich gerade unter sommerlichen Bedingungen bedingt durch den Treibhauseffekt erheblich auf und kann dabei Temperaturen erreichen, die unter Umständen sogar zu Verbrennungen führen (s. o. und Tab. 8.7). Temming (2003) zitiert eine Untersuchung von Shimizu et al. (1982), welche Aufheizkurven beim Parken unter sommerlicher Wärmeeinstrahlung sowie Abkühlkurven nach anschließendem Fahrbeginn unter Einsatz einer Klimaanlage darstellen (siehe Abb. 8.33). Bemerkenswert dabei ist, dass in der Aufheizphase die Oberflächentemperatur der Außenhaut (zum Beispiel der Dachfläche) bereits nach etwa 20 Minuten ein gleichbleibendes Niveau erreicht, während die Innenraumtemperaturen auch nach 40 Minuten noch weiter ansteigen. Temming verweist auf Untersuchungen, wonach der Anstieg der Innentemperaturen auch noch nach 2 Stunden anhält. Im Allgemeinen wird durch die Klimaanlage innerhalb von 20 Minuten nach Fahrtbeginn eine Innentemperatur von um 20 °C erreicht

Der Aufheizeffekt hängt erheblich von der farblichen Gestaltung des Fahrzeugs ab. Großmann (2013) stellt einen Versuch unter kontrollierten Bedingungen dar, bei dem zwei Fahrzeuge (ein weißes mit vollkommen weißer Innenausstattung[17] und ein schwarzes mit vollkommen schwarzer Innenausstattung) verglichen worden sind. Die Ergeb-

17 Großmann weist besonders darauf hin, dass die aus Gründen der Strahlungsabsorption günstige weiße Armaturentafeloberfläche sowie Hutablage zu extrem störenden Reflexen in der Windschutzscheibe und Heckscheibe (Rückspiegel) führen.

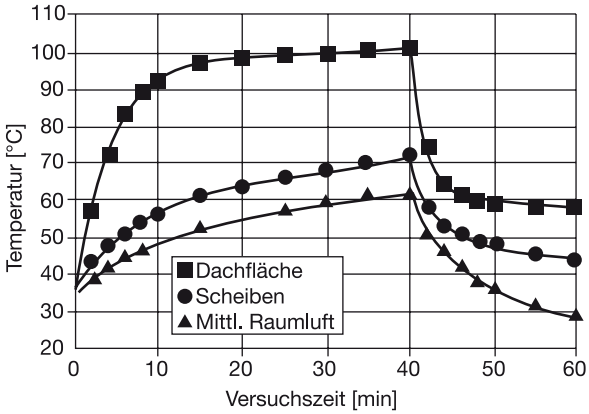


Abb. 8.33 Temperaturverläufe in einem stehenden und klimatisiert fahrenden PKW bei sommerlicher Wärmeeinstrahlung (nach Shimizu et al. 1982; zitiert in Temming 2003)

nisse sind in Tab. 8.7 zusammengestellt. Unter dem oben erwähnten Gesundheitsaspekt wird hier besonders auf die Temperaturen, die sich am Lenkrad, am Beifahrersitz und an der Armlehne in der Vordertür ergeben, hingewiesen.

Eine besonders wirkungsvolle Methode, solch extreme Temperaturen, die mit erheblichen Diskomfort verbunden sind, zu vermeiden, ist nach Großmann (2013) die Nutzung einer Standbelüftung mit Solartechnik. Mit einem sog. Solardach (Schiebedach mit integrierten Solarzellen) wird bei Sonneneinstrahlung elektrischer Strom erzeugt, der für den Gebläsebetrieb zur Verfügung gestellt wird und somit die Luft in dem abgestellten Fahrzeug ständig austauscht. Dadurch wird ein wesentlicher Teil der Aufheizung der Innenraumluft durch die hohe Oberflächentemperatur der Bauteile im Innenraum verhindert (Abb. 8.34).

8.4.4.3 Anforderungen der Fahrsicherheit

In der bisherigen Abhandlung wurde die Fahrzeugklimatisierung mit speziellen Blick auf den von Fahrer und Passagieren empfundenen Diskomfort bzw. auf die klimatische Behaglichkeit behandelt. Die Klimatisierung des Fahrzeugs hat aber auch einen wesentlichen sicherheitstechnischen Aspekt. Die Fähigkeit von Luft, Wasserdampf aufzunehmen, hängt erheblich vom Luftdruck und der Temperatur ab. Bei niedrigen Temperaturen kann sie bedeutend weniger Wasserdampf aufnehmen als bei hohen Temperaturen. Dies hat zur Folge, dass immer dann, wenn warme Luft – womöglich mit hoher relativer Luftfeuchte – auf kalte Fahrzeugscheiben trifft, die in der Berührzone abgekühlte Luft das enthaltene Wasser auskondensieren lässt. Die Scheibe wird somit mit Wasser beschlagen und undurchsichtig. Bei entsprechend niedriger Temperatur der Scheiben kommt es dann auch zusätzlich zu Eisbildung. Dies ist natürlich speziell bei der Frontscheibe, aber zumindest auch bei den vorderen Seitenscheiben und bei der Rückscheibe von erheblichem sicherheitstechnischem Belang. Beschlagbildung ist dabei sowohl auf der Innen- als auch auf der Außenseite der Scheiben möglich.

Zu einem Beschlagen der Scheiben von *außen* kommt es, wenn wärmere Außenluft bzw. Luft hohen Feuchtigkeitsgehalts auf die kalten Fahrzeugscheiben trifft. Das ist im Allgemeinen der Fall, wenn das Fahrzeug unter winterlichen Witterungsbedingungen im Freien geparkt und entsprechend kalt ist. Es ist dann bekanntlich Aufgabe des Wagenführers, vor dem Start des Fahrzeugs die Scheiben eis- und beschlagfrei zu machen. Es kann auch zu einer plötzlichen Außenbeschlagbildung kommen, wenn das in einer kalten Garage geparkte Fahrzeug bei der Ausfahrt auf die wärmere und höhere Feuchtigkeit tragende Außenluft trifft (unter ungünstigen Bedingungen kann dieser Effekt auch nach einer langen Tunnelfahrt auftreten). Wenn es unter diesen Bedingungen nicht zu Eisbildung kommt, was sehr selten der Fall ist, kann durch Betätigung des Wischers sehr schnell wieder freie Sicht geschaffen werden.

Ein Beschlag der Scheiben *innen* kommt zu Stande, wenn sich im Fahrzeuginneren wärmere und vor allem mehr Feuchtigkeit tragende Luft befindet, die an den kalten Scheiben auskondensiert.

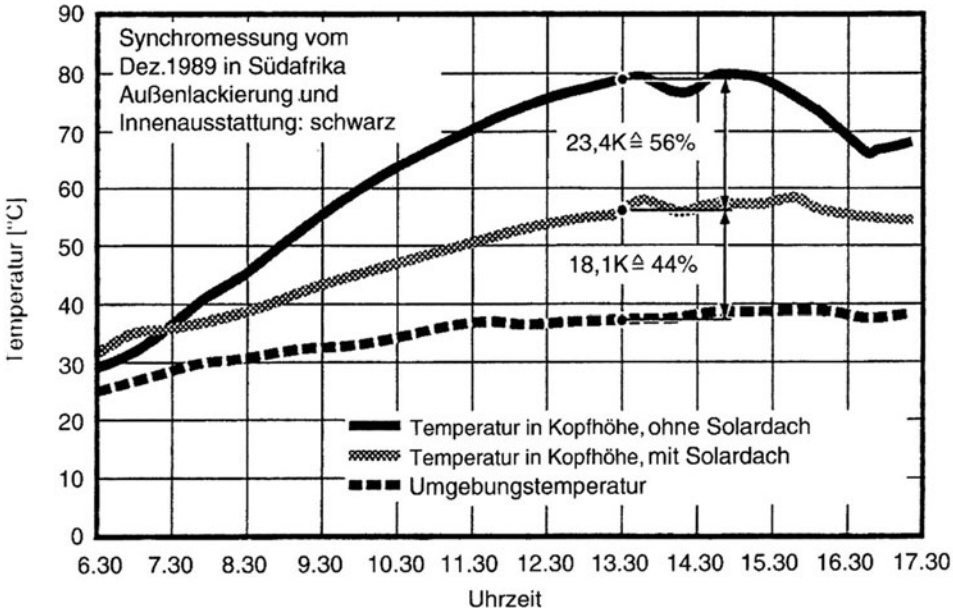


Abb. 8.34 Effekt einer solarzellenbetriebenen Standbelüftung. Synchronmessungen der Lufttemperaturen in Kopfhöhe in Abhängigkeit vom Tagesgang; Audi Coupé, 1989 (nach Großmann 1992; zitiert in Großmann 2013)

Das ist vor allem bei niedrigen Außentemperaturen der Fall, wenn die warme mit hoher relativer Feuchtigkeit behaftete Atemluft der Passagiere auf die Scheiben trifft, aber auch, wenn sich im Fahrzeuginneren sonstige feuchtigkeitstragende Objekte (z. B. nasse Kleidung, nasse Teppiche, offen Flaschen u. ä.) befinden. Wie Großmann (2013) beschreibt, ist dafür besonders kritisch der Umluftbetrieb bei niedrigen Umgebungstemperaturen. Gelegentlich kann so etwas auch bei Passfahrten auftreten, wenn mit zunehmender Höhe die Temperatur der Außenluft abnimmt und die Scheiben entsprechend abgekühlt werden. Anlass für ein Innenbeschlagen der Scheiben kann aber auch das vom Verdampfer der Klimaanlage abgeschiedene und dort gespeicherte Wasser sein. Selbst bei Außentemperaturen von 20 °C kann es deshalb nach einer Autobahnfahrt und anschließender langsamer Fahrt vorkommen, dass sich das im Verdampfer gespeicherte Wasser an den kühlen Scheiben auskondensiert. Ansonsten ist aber eine Klimaanlage bezüglich der Beschlagneigung der Scheiben günstig, da mit dem Abkühlen der Außenluft auch eine Entfeuchtung verbunden ist, so dass relativ trockene Luft in den Fahrzeuginnenraum gelangt. Innenbeschlag ist besonders kritisch, weil er plötzlich auftreten kann. Wegen der durch das aktuelle Design bedingten großen Entfernung der Frontscheibe vom Fahrer ist es zudem extrem erschwert und gegebenenfalls sogar unmöglich, den Beschlag manuell zu entfernen.

Die traditionelle technische Maßnahme, die Scheiben beschlagfrei zu machen und zu halten, ist sie zu erwärmen. Üblicherweise verwendet man dazu spezielle unter der Windschutzscheibe und im seitlichen Armaturenbrettbereich angebrachte Lüftungsdüsen, welche die von der Heizungsanlage erwärmte Luft auf die Scheiben leiten. Für die Scheibenenteisung und Entfeuchtung existieren verschiedene gesetzliche Vorschriften (USA: FMVSS 103, EU 78/317/EEC; Australien ADR 15; zitiert nach Großmann 2013). Abbildung 8.35 zeigt die Messung der Zeitverläufe bis zur Beschlagfreiheit nach der US-Vorschrift FMVSS 103. Das Sichtfeld des Fahrers (siehe auch ▶ Abschn. 7.3.1) muss danach nach spätestens 20 Minuten eis- und beschlagfrei sein (nähere Beschreibung siehe Großmann 2013). Prinzipiell ist die Enteisung und Entfeuchtung umso wirkungsvoller, je heißer die aus den Düsen strömende Luft ist. Heute wird je nach Fahrzeugtyp eine völlig enteiste Scheibe bereits

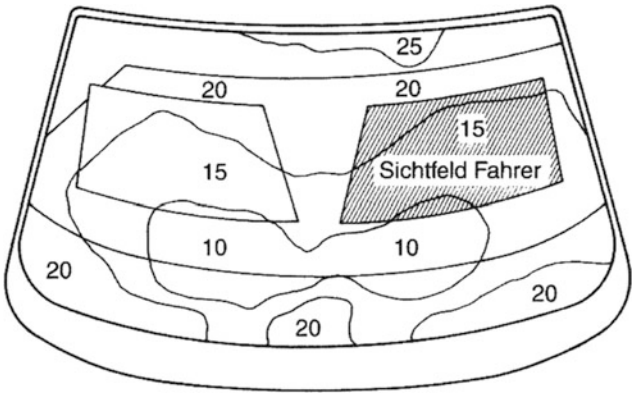


Abb. 8.35 Abtaulinien in Abhängigkeit von der Zeit nach FMVSS 103 (Großmann 2005)

schon in weniger als 7 Minuten erreicht (Brinkkötter et al. 2007)

Eine andere sehr wirkungsvolle Methode, die Scheiben zu erwärmen, besteht in der elektrischen Beheizung. Am bekanntesten ist die seit den siebziger Jahren allgemein serienmäßig vorgesehene elektrische Beheizung der Heckscheibe. In einigen Fahrzeugen wird auch für die Frontscheibe eine elektrische Beheizung vorgesehen (z. B. Ford Focus). Man verwendet dort anstelle der wenigen Drähte der Heckscheibe sehr viele sehr dünne Drähte, die in die Folie des Verbundsicherheitsglases eingelassen sind. Insbesondere bei Dunkelheit, Regen und Gegenverkehr kann es aber durch optische Beugungseffekte an diesen Drähten zu leichten Sichtverzerrungen kommen, weshalb sich diese Art der Beheizung bis jetzt noch nicht allgemein hat durchsetzen können. Abhilfe können nach Großmann (2013) elektrisch leitende Folien sein, die ebenfalls im Verbundsicherheitsglas integriert sind. Es ist für die zukünftige Entwicklung abzuwarten, inwieweit nanobeschichtete Scheiben Beschlagen grundsätzlich verhindern können, weil dadurch die für die Kondensation des Wassers notwendigen Kristallisationspunkte vermieden werden.

Die beschriebenen lästigen Beschlag- und Eisbildungen gelten auch für die Außenspiegel. Deshalb ist es ein weiterer Sicherheitsgewinn, wenn auch dafür elektrische Beheizung vorgesehen ist. Das Wasser der Scheibenwaschanlage neigt bei entsprechend niedrigen Temperaturen an den Austrittsdüsen zu verreisen. Auch dafür sollte eine nach Möglichkeit außentemperaturgesteuerte Beheizung vorgesehen sein.

8.4.4.4 Gestaltung der Fahrzeugklimatisierung

Nachdem bereits Temperaturunterschiede von 1 K bemerkt werden, ist in Abhängigkeit von den Fahrbedingungen ein ständiges Nachregeln der Klimatisierungsleistung notwendig. Man unterscheidet manuelle, halbautomatische und vollautomatische Systeme. Manuelle Systeme, bei denen die einzelnen technischen Elemente wie Heiz-/Kühlleistung, Luftverteilung, Gebläsedrehzahl unmittelbar vom Nutzer eingestellt werden müssen, werden heute meist nur noch in Kleinfahrzeugen angeboten. Bei den halbautomatischen Klimaanlagen wird über entsprechende Sensoren die Innenraumtemperatur erfasst und darüber die notwendige Ausblastemperatur geregelt. Vollautomatische Klimaanlagen regeln zusätzlich zur Temperatur die Gebläseleistung und somit die Luftmenge und in den Bestausführungen auch die Luftverteilung. Dabei werden zusätzliche Daten wie Außentemperatur, Fahrgeschwindigkeit, Motordrehzahl, Kühlmitteltemperatur u. ä. in den Regelprozess einbezogen (Wawzyniak 2011).

Wie bereits unter ► Abschn. 8.4.2 dargestellt, sind die individuellen Ansprüche der Passagiere an die klimatischen Bedingungen zum Erreichen der Behaglichkeit sehr unterschiedlich. Die Auslegung der Klimatisierungsanlage des Fahrzeugs muss dies berücksichtigen. Zumindest ist eine unterschiedliche Einstellmöglichkeiten für den Fahrer und für den Beifahrer vorzusehen. Außerdem ist es schon seit Beginn der Einführung von Heizungsanlagen im Fahrzeug üblich, eine getrennte Regulierung für den Kopf- und Fußbereich vorzusehen. Beheizte bzw. gekühlte Luft sollte aber auch in den Fondraum

geführt werden und dort einschließlich spezieller Lüftungsdüsen individuell reguliert werden. Wawzyniak (2011) führt aus, dass für Personen mit kälteempfindlichen Füßen durch die sog. „variable Schichtung" die Fußraumaustrittstemperatur bei unveränderter Grundeinstellung angehoben werden kann.

Für die Bedienung von Klimatisierungsanlagen gibt es keinen Standard. Die Bedienung sollte deshalb in das Gesamtbedien- und Designkonzept eingebunden werden. Allerdings müssen Stellteile, die sich auf womöglich schnell ändernde Bedingungen beziehen, unmittelbar verfügbar sein. So müssen alle Bedienelemente, die etwas mit der sicheren Fahrzeugführung zu tun haben (Beseitigung von Scheibenbeschlag und Eis) unmittelbar verfügbar sein und nach Möglichkeit mit einem einzigen Bedienschritt einzuleiten sein (z. B. „Defrost-Taste"). Auch die Verstellung der Temperatur darf sich nicht in irgendeinem Menü des Bordcomputers verstecken. Die Bezeichnung „Blau" für kalt und „Rot" für warm ist international verständlich und sollte auf der Bezugsfläche des Stellteils (nicht auf dem Stellteil selbst, siehe ► Abschn. 6.1.3; ◘ Abb. 6.12) angebracht sein. Bei geregelten Klimaanlagen ist die Anzeige der eingestellten Solltemperatur in Grad Celsius bzw. Fahrenheit (nach Möglichkeit umstellbar) sinnvoll, da der jeweilige Nutzer so seine individuelle Bevorzugung einer bestimmten Zahl zuordnen kann. In ähnlicher Weise ist ein unmittelbarer Zugriff auf die Luftverteilung (oben – Mitte – unten) und die Intensität der Ausblasgeschwindigkeit zu empfehlen. In Kombination mit der Möglichkeit, den Luftstrom an den Austrittsöffnungen unmittelbar zu beeinflussen, kann der Nutzer auch unter extremen Klimabedingungen schnell zu einem befriedigenden Ergebnis kommen. Darüber hinausgehende komplexere Einstellmöglichkeiten des Klimatisierungssystems können dann in einem Untermenü der Fahrzeugeinstellung untergebracht werden.

Moderne Klimatisierungsanlagen verändern nicht nur die Temperatur der einströmenden Luft, sondern sie sorgen durch eine entsprechende Filterung auch für die Luftgüte, indem Luftverunreinigungen und unangenehme Gerüche weitgehend aus der Kabine ferngehalten werden. Unter dem Aspekt der zunehmenden Anzahl von Allergiker ist insbesondere der Einsatz von Pollenfiltern sinnvoll (Herzog 2007). Dabei zeigt sich, dass nicht nur die Frischluft, sondern auch die Umluft gefiltert werden muss. Wawzyniak (2011) beschreibt die verschiedenen Filtermaterialien sowie deren Abscheidegrade, die zur Absorption der verschiedenen Partikelgrößen notwendig sind. Nachdem per Prinzip die abgeschiedenen Partikel in dem Filtermaterial hängen bleiben, müssen diese in regelmäßigen Abständen ausgewechselt werden. Die Nutzungsdauer der Filter beträgt im Allgemeinen ca. 30.000–50.000 km Fahrleistung, sollte aber zwei Jahre nicht überschreiten. Aus ergonomischer Sicht ist in diesem Zusammenhang zu fordern, dass dieses Auswechseln auch in Eigenregie geschehen kann.

Nicht zuletzt wegen des in jeder Klimatisierungsanlage notwendigen Lüfters entsteht dadurch ein zusätzlicher akustischer Eintrag. Durch erheblichen Entwicklungsaufwand wird die Schallbelästigung durch die Klimaanlage so gering wie möglich gehalten (Beispiele dafür: Herzog 2007).

8.4.4.5 Klimatisierungsanlagen im Produktentwicklungsprozess

Die Entwicklung einer Klimatisierungsanlage für das Fahrzeug ist ein extrem aufwändiger Prozess. Das hängt nicht nur mit den zuvor besprochenen Ansprüchen seitens der Passagiere zusammen, sondern auch mit den komplexen Strömungsverhältnissen im Innenraum eines Fahrzeugs. Wie in anderen Bereichen der Produktentwicklung spielt auch hier die Simulationstechnik eine wichtige Rolle. Ein Verfahren, mit dessen Hilfe schon in einem frühen Zeitpunkt Strömungsoptimierung von Bauteilen durchgeführt werden kann, ist die Computional Fluid Dynamic (CDF)-Analyse, die unter anderem hilft, eine Auswahl aus einer Reihe von miteinander konkurrierenden Designentwürfen zu treffen (Huco 2005). ◘ Abbildung 8.36 zeigt eine Simulation der Strömungsverhältnisse im Fahrzeuginnenraum mithilfe dieses Programmsystems. Binder (2004) berichtet, dass die in der CFD-Analyse vorliegenden Daten zu Geschwindigkeit, Temperatur, Strahlung und Körperwärme genutzt werden können, um mithilfe eines speziell entwickelten virtuellen thermischen Dummys alle Daten zur Ermittlung des thermischen Komforts zu berechnen. Es konnte gezeigt werden, dass die in der Simulation errechneten

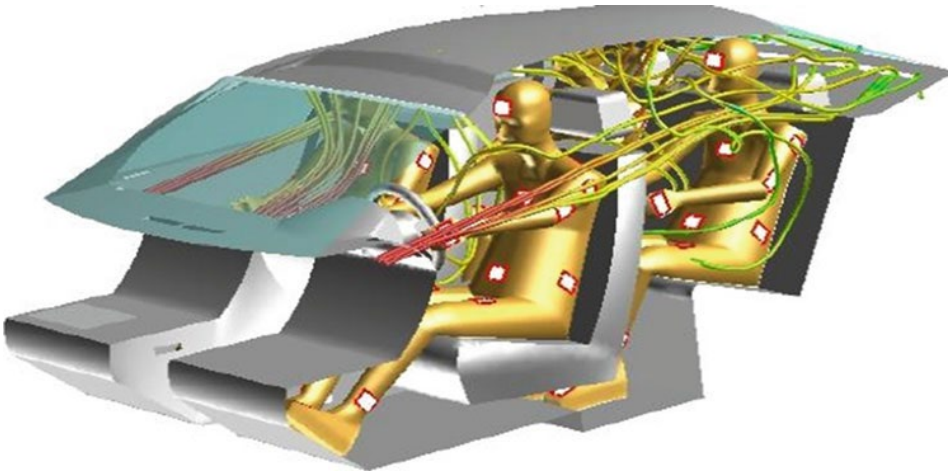


Abb. 8.36 CFD-Simulation der Strömungsverhältnisse im Fahrzeuginneraum einschließlich virtuellen Klimadummies (Binder 2004)

Werte eine hohe Korrelation zu den mit dem realen Klimadummy MARCO unter vergleichbaren Bedingungen gemessenen Werten zeigen (MARCO ist sehr ähnlich dem in Abb. 8.25 gezeigten von der Fraunhofer Gesellschaft entwickelten Klimadummy DRESSMAN).

Trotz dieser sehr guten Simulationsergebnisse muss die Fahrzeugklimaanlage während der gesamten Entwicklungszeit von der Konzeptentwicklung bis zur Serienreife in jeder Phase bezüglich ihres Reifegrades untersucht werden. Deyhle und Bienert (2011) berichten von einem für die objektive Bewertung eigens bei Porsche entwickelten Erfassungs- und Auswertungssystem (PEA), mit dessen Hilfe im Versuchsfahrzeug mit Thermoelementen bis zu 200 Luft- und Fluidtemperaturen erfasst werden, wodurch eine umfassende Analyse der Funktionen der Klimaanlage unter verschiedensten Bedingungen insbesondere bezüglich der automatischen Klimatisierungsregelung möglich ist. Ein weiteres Entwicklungswerkzeug bei allen Automobilunternehmen stellt der Klimawindkanal dar, in dem reproduzierbare und konstante Bedingungen erzeugt werden können und somit Unterschiede zwischen verschiedenen Lösungsmöglichkeiten ermittelt werden und Optimierungen hinsichtlich der Zielsetzungen systematisch erfolgen können.

Ob das Entwicklungsziel „Behaglichkeit im Innenraum“ wirklich erreicht worden ist, kann nur durch einen Vergleich der objektiven Messergebnisse mit subjektiven Beurteilungen von Probanden gefunden werden. Dazu sind Freiland-Fahrererprobungen bei unterschiedlichen Wetterbedingungen in verschiedenen Klimazonen notwendig. Wie Deyhle und Bienert (2011) argumentieren, sind für solche Befragungen einerseits eine statistisch belastbare Grundgesamtheit (z. B. 100 Probanden) und andererseits ein möglichst breites Band von Personen unterschiedlicher ethnischer Herkunft notwendig. Die Probanden sollten repräsentativ für die erwartete Nutzerpopulation in Bezug auf Alter, Geschlecht, Fahrerfahrung und Anthropometrie sein. Um zu statistisch abgesicherten Ergebnissen zu kommen, ist es notwendig, Fragebögen zu verwenden, welche die subjektive Bewertung quantitativ beschreibbar machen. Hodder (2013) bemerkt dazu, dass über eine lange Periode die Untersucher dafür oft ihre eigenen Fragebogentechniken entwickelten. In den letzten Jahren seien aber gerade durch Ergonomen standardisierte Mess- und Evaluierungsmethoden entwickelt worden. Der Vorteil dieser standardisierten Methoden besteht unter anderem darin, valide Protokolle und Messskalen für die Bewertung zu nutzen, die zudem einen Vergleich mit den Ergebnissen, die von einer anderen Abteilung gefunden worden sind, ermöglichen. Die ISO 1405-3 (2006) befasst sich unmittelbar mit der subjektiven Bewertung von Fahrzeugen. Tabelle 8.8 zeigt die in ISO veröffentlichten Bewertungsskalen in deutscher Übersetzung. Bezüglich der Temperaturwahrnehmung sollte nor-

Tab. 8.8 Bewertungsskala nach ISO 1405-3 (2006; ins Deutsche übersetzt vom Verfasser)

ISO Skala zur Temperaturwahrnehmung		Erweiterte Temperaturwahrnehmungsskala	
		+5	Extrem heiß
		+4	Sehr heiß
+3	Heiß	+3	Heiß
+2	Warm	+2	Warm
+1	Leicht warm	+1	Leicht warm
±0	Neutral	±0	Neutral
−1	Leicht kühl	−1	Leicht kühl
−2	Kühl	−2	Kühl
−3	Kalt	−3	Kalt
		−4	Sehr kalt
		−5	Extrem kalt

malerweise die links in der ersten Tabelle abgebildete Skala ausreichend sein. Für extreme Umweltbedingungen kann es sinnvoll sein, diese Skala von 7 auf 11 Punkte zu erweitern (rechter Tabellenteil). Die „unkomfortabel"- und „Schwüle"-Skala beziehen sich auf die negativen Aspekte, die mit thermischem Diskomfort bzw. Schwitzen verbunden sind (Tab. 8.9). Die Bevorzugungsskala zeigt an, wie sich eine Person gerne fühlen würde. Es kann dabei vorkommen, dass eine Person z. B. in der Temperaturwahrnehmung berichtet, es sei warm, dass sie aber dennoch in der Bevorzugungsskala „keine Änderung" anzeigt.

Bei derartigen Versuchen ist es sinnvoll, noch eine Pauschalbefragung anzufügen, in der die Probanden durch die Beantwortung „ja" und „nein" ihre Zufriedenheit und Akzeptanz bekunden. Diese Antworten können genutzt werden, um pauschal das Maß des Erreichten zu quantifizieren.

8.5 Geruch

Die in ▶ Abschn. 3.3.4 dargestellte Komfortpyramide weist aus, dass der Geruch die entscheidende Größe für das Diskomfortempfinden darstellt und gegebenenfalls alle anderen Einflüsse maskieren kann. Dabei spielt wegen der hohen Adaptationsfähigkeit des Geruchssinns vor allem der erste Eindruck eine gravierende Rolle. Begibt man sich in ein neues Fahrzeug, so wird durch den wahrgenommenen Geruch der Eindruck in fundamentaler Weise positiv bzw. negativ geprägt. Deshalb ist es extrem wichtig, dafür zu sorgen, dass abzulehnende Gerüche unter allen Umständen vermieden werden. (Siehe dazu auch die Ausführungen zu „Handwerklichkeit" in ▶ Abschn. 7.9). Eine Objektivierung des Geruchs mit technischen Messverfahren stößt dabei auf erhebliche Schwierigkeiten, weil – bedingt durch die evolutionäre Prägung – ein Zusammenhang hoher Komplexität zwischen auslösendem gasförmigen Signalstoff und ausgelöster Geruchswahrnehmung besteht (Boeker 2004). Es gibt zwar heute eine Reihe von Gassensoren, mit deren Hilfe man die Ausdünstungen von Stoffen objektiv feststellen kann. Da es bisher aber keine Möglichkeit gibt, die emotionale Wirkung von Gerüchen durch objektive Messungen zu verifizieren, beschäftigen die Fahrzeugfirmen Olfaktorikexperten, die über die Geruchsausdünstungen der verschiedenen Materialien befinden. Dazu werden die Werkstoffe, die in einem neuen Fahrzeug genutzt werden sollen, getrennt voneinander in Glasgefäßen auf 80 °C erhitzt, um die maximale Ausdünstung, die in einem sonnenbeschienenen, geparkten Fahrzeug entstehen kann, zu simulieren. Nach einer Abkühlung auf 60 °C bewerten die Olfaktoriksexperten die Gerüche in den Gläsern nach einem Schulnotensystem (1 = geruch-

Tab. 8.9 Diskomfortverbalisierung der Bewertungsziffern von Tab. 8.8

„Unkomfortabel" Skala		Schwüle-Skala		Bevorzugungsskala	
3	Sehr unkomfortabel	3	Sehr schwül	+3	Viel wärmer
2	unkomfortabel	2	Schwül	+2	wärmer
1	Leicht unkomfortabel	1	Leicht schwül	+1	Leicht wärmer
0	Nicht unkomfortabel	0	Nicht schwül	0	Keine Änderung
				−1	Leicht kühler
				−2	Kühler
				−3	Viel kühler

Abb. 8.37 Mit Gassensoren bestücktes Fahrzeug zur Objektivierung der Ausdünstungen der verwendeten Bauteile (Quelle: Daimler Global Media Site)

los … 6 = unerträglich; Laukart 2011). Nur Werkstoffe mit der Durchschnittsnote 1 und 2 kommen normalerweise für den Serieneinsatz in Betracht. Dabei müssen die zu prüfenden Werkstoffe mit den Werkzeugen hergestellt sein, die auch für die Serienproduktion zum Einsatz kommen. Für eine endgültige Prüfung wird u. a. das komplette Fahrzeug mit Gassensoren ausgerüstet (siehe Abb. 8.37). Im Detail kann eine Überprüfung nach verschiedene Normen, beispielsweise VDA 276 oder nach FAT AK 26 vorgenommen werden. Zusätzlich müssen mit den verwendeten Materialien Untersuchungen bezüglich möglicher Inhalationsallergien und potentieller Hautkontaktallergien durchgeführt werden.

Wegen der bereits erwähnten hohen Adaptationsfähigkeit des Geruchsinns spielt während der Fahrt die Geruchsbelästigung nicht mehr die gravierende Rolle wie beim Einsteigen. Allerdings können auch hier durch Befächerungseffekte unangenehme Gerüche immer wieder zum Bewusstsein vordringen. Es ist eine Trivialität zu verlangen, dass Gerüche aus dem Treibstoffsystem (Benzin- oder Dieselgerüche) auf jeden Fall unterbunden werden müssen. Allerdings kann auch das Heizungssystem und speziell die Klimaanlage Anlass für Geruchsbelästigungen sein. Das vom Verdampfer erzeugte Kondensat wird zwar während des Betriebes abgeschieden. Eine Restmenge verbleibt allerdings auch bei abgeschalteter Klimaanlage im Verdampfer (Großmann 2013). Insbesondere wenn die Klimaanlage selten betrieben wird, kann dort durch Schimmelpilzbildungen und Ähnliches eine

erhebliche Geruchs- und Gesundheitsbelästigung entstehen. Überhaupt sind im Laufe der Nutzung im Fahrzeug abgelagerte, Duftstoffe absondernde Materialien (Obst, Essens- und Trinkreste, Aschereste, abgestandener Nikotingeruch, Hundegerüche, Erbrochenes u.s.w.) Gegenstand für Geruchsbelästigungen insbesondere bei älteren Fahrzeugen. Unangenehmer Geruch kann aber auch durch die an sich der Luftreinigung dienenden Filter entstehen, wenn diese zugesetzt sind und womöglich aus irgendwelchen Gründen mit Feuchtigkeit kontaminiert wurden. Im Internet werden verschiedene Hausrezepte genannt, mit deren Hilfe man solche Gerüche wieder beseitigen können soll. Eine entscheidende Voraussetzung für alle Maßnahmen ist, dass das Fahrzeug vorher einer gründlichen Reinigung unterzogen wird. Eine besonders gute Wirkung scheint eine Behandlung mit Ozon zu sein. Ozon (O_3) ist ein Radikal, das unter anderem mit Mikroorganismen, also auch mit Geruchsmolekülen reagiert und diese dadurch inaktiviert. Nach einer solchen Ozonbehandlung ist das Fahrzeug gut zu lüften, damit der Hustenreiz erzeugende Ozon wieder aus dem Fahrzeug entfernt wird.

Aber auch eine aktive Behandlung der Luft während der Fahrt kann eine positive Wirkung auf die Reduktion von Geruchsbelästigung haben. Insbesondere wird hier von der positiven Wirkung der Ionisierung von Luft berichtet (Taxis-Reischl 1999). Durch künstliche Ionisation wird die natürliche Konzentration an negativen Luftionen, die beispielsweise bei Wetterumschwung oder Fön verloren geht, wiederhergestellt. Durch die Einwirkung des elektrischen Feldes können Schwebestoffe, insbesondere sehr kleine Teilchen wie Staub, Zigarettenrauch, Pollen, und Ähnliches aus der Luft ausgeschieden werden. Außerdem wird der negativen Ionisation eine Zunahme der Spannkraft, der Konzentrationsfähigkeit, des Elans und der Lebensfreude zugeschrieben, was wissenschaftlich allerdings nicht nachgewiesen ist.

Auch die künstliche Einbringung von Duftstoffen in den Fahrgastraum ist in letzter Zeit von verschiedenen Herstellern in die Angebotspalette übernommen worden. So bietet beispielsweise die Firma Citroën für verschiedene Fahrzeuge einen Duftspender für die Fahrgastzelle an. Die Duftintensität kann geregelt und auch abgestellt werden. Es stehen verschiedene Düfte zur Auswahl, so dass man den Wunschduft auswählen kann. Auch die Firma Mercedes bietet für das neue S- Klasse-Modell einen Duftspender an, wobei vier Duftnoten zur Verfügung stehen. Durch eine spezielle Technik (getaktete Ansteuerung) und die Verwendung spezieller Duftstoffe wird dafür gesorgt, dass sich der Duft nach Deaktivierung schnell wieder verflüchtigt. Bei der emotionalen Wirkung, die jeder Duftstoff sowohl im positiven wie im negativen Sinne hat, muss allerdings auch bedacht werden, dass mit zusätzlicher Beduftung unangenehme existierende Gerüche nur maskiert, aber nicht beseitigt werden können. Wenn der maskierende Duftstoff seine Wirkung verliert, kommen die alten unangenehmen Duftstoffe wieder zu ihrer Wirkung.

Literatur

Verwendete Literatur

Amano, Y., Imai, H.: Eine Kraftfahrzeugklimaanlage. In: Gijutsu, J. (Hrsg.) Die Kraftfahrzeugtechnik, Bd. 25, S. 1096–1101. (1971). Japanisch

Asakai, M., Sakai, Y.: Colling effect of car ventilation. Bulletin of JSAE No. 6/1974, 75–82 (1974)

ASHRAE: Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, Ga, USA (1997)

Baker, W., Mansfield, N.J.: Effects of horizontal whole-body vibration and standing posture on activity interference. Ergonomics **53**(3), 365–374 (2010)

Binder: Neue Trends in der Klimatisierung von Pkw. Behr, Automobilinnenraum Fachtagung (2004)

Bitter, T., Fritzsche, F., Hartung, J.: Darstellung des Schwingungsverhaltens von Fahrzeuginsassen – Symbiose aus Experiment und Simulation FAT-Schriftenreihe, Bd. 189 (2005)

Boeker, P.: Technisch-sensorische Geruchsmessung 8. Workshop „Geruch und Emissionen bei Kunststoffen", 29.-30. März 2004. Kassel (2004). Vortragsmanuskript

Bootz, A., Hohenöcker, O., Niklas, J., Seethaler, L., Sagan, E.: Fahrwerksauslegung. In: Braess, H.-H., Seiffert, U. (Hrsg.) Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 6. Aufl. ATZ/MTZ-Fachbuch. Vieweg + Teubner, Wiesbaden (2011)

Brinkkötter, C., Grünig, C., Kaufmann, M.: Optimierung der Frontscheibenanströmung Vortrag auf der Tagung automotive interior-cockpit, Köln, 9.10.2007 (2007)

Brooks, J.E., Parson, K.C.: An ergonomic investigation into human thermal comfort using an automobile seat heated with encapsulated carbonized fabric (ECF). Ergonomics **42**(5), 661–673 (1999)

Brosh, T., Arcan, M.: Modeling the body/chair interaction - an integrative experimental-numerical approach. Clinical Biomechanics **15**, 217–219 (2000)

Bubb, H.: Analyse der Geschwindigkeitswahrnehmung im Kraftfahrzeug. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 31, 1977/2, 103-112. Dr. Otto Schmid KG, Köln (1977)

Bubb, H.: Experiments to the Contradiction „Noise as Strain or Noise as Feedback. In: Mital, A., Krueger, H., Kumar, S., Menozzi, M., Fernandez, J.E. (Hrsg.) Advances in occupational ergonomices and safety, S. 650–654. International Society for Occupational Ergonomics and Safety, Cincinnati, Ohio, USA (1996). II. Proc. Of the XI.th Annu. Int. For Occupational Ergonomics and Safety 1996

Bubb, H., Schmidtke, H.: Ergonomische Gesichtspunkte beim Entwurf von Kraftfahrzeugen. In: Wagner, H.-J. (Hrsg.) Verkehrsmedizin – unter Einbeziehung aller Verkehrswissenschaften. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo (1984)

Bureau, C. et al: MARCO, Method to Assess Thermal Comfort. VTMS6, Paper C599/051/203 Brighton (2003)

Cengiz, T.G., Babalik, F.C.: An on-the-road experiment into the thermal comfort of car seats. Applied Ergonomics **38**(3,5), 337–47 (2007)

Clark, R.P.: Human skin temperature and convective heat loss. In: Studies in Environment Science, Bioengineering, Thermal Physiology and Comfort, Bd. 10, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam (1981)

Deyhle, H., Bienert, R.: Fahrzeugklimatisierung aus Kundensicht: Subjektive vs. objektive Bewertung Fachkongress Fortschritte im Automobil-Innenraum, Stuttgart, 16./17. November 2010 (2011)

DIN 1946: Klimatisierung von Personenkraftwagen und Lastkraftwagen, Teil 2 (2006 - 2007)

DIN 1946-2: Raumluft – Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI Lüftungsregeln) (1994 – 2001)

DIN 33 403, Teil 3: Beurteilung des Klimas im Warm- und Hitzebereich auf der Grundlage ausgewählter Klimasummenmaße (Entwurf) (2000)

DIN 4710: Statistiken meteorologische Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- unter raumlufttechnischen Anlagen in Deutschland (2003)

DIN EN 28996: Ergonomie; Bestimmung der Wärmeerzeugung im menschlichen Körper. Beuth Verlag GmbH, Berlin (Diese Norm enthält die deutsche Übersetzung der Internationalen Norm ISO 8996:1990) (1993)

DIN ISO 7730: Gemäßigtes Umgebungsklima. Ermittlung des PMV- und des PPD Index und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit. Beuth Verlag GmbH, Berlin (1995–2009)

Dufner, K.L., Bailey, D.T., Wolfe, D.E., Arya, S.P.: Determination of climate within metropolitan areas, Phase I summary. ASHRAE Transaction **99**, 430–449 (1993)

Dupuis, H., Zerlett, G.: Beanspruchung des Menschen durch mechanische Schwingungen. Fortschrittsbericht Ganz-Körper-Schwingungen. Hauptverband der Gewerblichen Berufsgenossenschaften, St. Augustin, S. 1–147 (1984)

Dupuis, H.: Zur physiologischen Beanspruchung des Menschen durch mechanische Schwingungen VDI Fortschrittsberichte Reihe 11, Bd. 7. VDI Verlag GmbH, Nummer (1969)

Dupuis, H.: mechanische Schwingungen und Stöße. Kapitel 4.4. In: Schmidtke, H. (Hrsg.) Ergonomie. Carl Hanser, München, Wien (1993)

Dupuis, H., Zerlett, G.: The effects of whole-body-vibration. Springer, Berlin Heidelberg, New York, S. 1–161 (1986)

Dupuis, H., Hartung, E., Hammer, W.: Untersuchungen von Vibrationstoleranz am Hand-Arm-System Ergonomische Studien Berichte, Bd. 2. Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, (1974)

Ebe, K., Griffin, M.J.: Qualitative Models of Seat Discomfort Including Static and Dynamic Factors. Ergonomics **43**(6), 771–790 (2000)

Fanger, P.O.: Calculation of thermal comfort: Introduction of a basic comfort equation ASHRAE Transactions, Bd. 73, Part II (1967). Paper No. 2051, presented at the ASHRAE 74th meeting, Minneapolis, June 26-28, 1967

Fanger, P.O.: Thermal comfort. Analysis and application in environmental engineering. Danish Technical Press, Copenhagen (1970)

Fritsche, U., Feith, T.: Komfortdüsen für mehr Klimakomfort in der Fahrzeugkabine. ATZ **2007**(9), Koblenz (2007). Behr Spezial

Frühauf, F.: Thermische Behaglichkeit im Fahrzeug von morgen IIR-Fachkonferenz „Innovative Konzepte für Thermomanagement im Kfz", Stuttgart (2002)

Fung, N., Parson, K.C.: Some investigations into the relationship between car seat cover material and thermal comfort using human subjects. Journal of Coated Fabrics **26**(1996)

Fung, W.: How to improve thermal comfort of the car seat. Paper presented at Proceedings of the 4th Bologna, Italy. International, Conference Comfort in the Automotive Industry, Recent Developments and Achievement (1997)

Gebhardt, H.J., Kampmann, B., Müller, B.H., Peters, H., Piekarski, C.: Systematische Analyse aktueller Klimasummenmaße für Hitzearbeitsplätze Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin - Forschung, Bd. Fb 829. Schriftenreihe der BAuA, Dortmund/Berlin (1999)

Griffin, M.J.: Handbook of Human Vibration. Academic Press, London (1990)

Grimm, M., Kroschel, K., Schuller, B., Rigoll, G., Moosmayr, T.: Acoustic Emotion Recognition in Car Environment Using 3D Emotion Space Approach. In: Proc. DAGA (2007)

Großmann, H.: Grundlagen der Pkw-Klimatisierung: Extrema im Winter und im Sommer Klimatisierung von Kraftfahrzeugen, Technischen Akademie Esslingen, 18.-19. Mai 2000. (2000) Beitrag zum Lehrgang

Großmann, H.: Heizung, Lüftung, Klimatisierung von Pkw. In: Hucho, W.H. (Hrsg.) Aerodynamik des Automobils. Vieweg, Wiesbaden (2005)

Großmann, H.: Pkw-Klimatisierung – Physikalische Grundlagen und technische Umsetzung. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg (2013)

Großmann, H.: Solarbetriebene Standbelüftung für Pkw. Entwicklung und Markterfahrung. In: Reichelt, J. (Hrsg.) Pkw-Klimatisierung. C. S. Müller, Karlsruhe (1992)
Hennecke, D.: Zur Bewertung des Schwingungskomforts von Pkw bei instationären Anregungen. Dissertationsschrift an der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig (1994)
Herzog, A.: Cockpit – Innovationen des Heiz- Klimagerätes Tagung automotive interior-cockpit, Köln, 9.10.2007. (2007) Valeo: Vortrag
Hinz, L., Kern, J., Schweizer, G.: Neue Generation von Gebläsen für Heizungs- und Klimaanlagen in Kraftfahrzeugen. Automobiltechnische Zeitschrift **85**(9), 563–568 (1983)
Hodder, S.: Thermal Environments and Vehicles. Cap. 7. In: Gkikas, N. (Hrsg.) Automotive Ergonomics – Driver-Vehicle Interaction. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York (2013)
Huco, W.-H. (Hrsg.): Aerodynamik des Automobils, 5. Aufl. Vieweg Verlag, Wiesbaden (2005)
ISO 1405-3: Evaluation of Thermal Environment in Vehicles, Part 3: Evaluation of Thermal Comfort Using Human Subjects (2006)
Knauer, P.: Objektivierung des Schwingungskomforts bei instationärer Fahrbahnanregung. Dissertationsschrift an der Technischen Universität München (2010)
Kühnel, W., Guilbaud, F., Proksch, Ch., Heckenberger, T., Heinle, D.: CFD Cabin Flow Analysis as Part of the Product Development Process. ImechE paper C599/053/2003 presented at VTMS 6, Brighton, UK
Laukart, G.: Fahrzeuginnenaustattung. In: Braess, H.-H., Seiffert, U. (Hrsg.) Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 6. Aufl. ATZ/MTZ-Fachbuch. Vieweg + Teubner, Wiesbaden (2011)
Lawther, A., Griffin, M.J.: Prediction of the incidence of motion sickness from the magnitude, frequence and duration of vertical oscillation. Journal of the Acoustical Society of America **82**(3), 957–966 (1987)
Liebing, R.: Akustische Bewertungsverfahren für transiente Funktionsgeräusche. Dissertationsschrift an der Universität Oldenburg (2009)
Madsen, T. L.: Thermal effects of ventilated car seats. International Journal of Industrial Ergonomics
Mansfield, N.J.: Human Response in Vibration. CRC Press, Boca Raton, FL (2005)
Mansfield, N.J.: Human Response to Vehicle Vibration. Kap 6. In: Gkikas, N. (Hrsg.) Automotive Ergonomics – Driver-Vehicle Interaction. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York (2013)
Mansfield, N.J., Ashley, J., Rimell, A.N.: Changes in subjective ratings of impulsive steering wheel vibration due to changes in noise level: A cross-modal interaction. International Journal of Vehicle Noise and Vibration **3**(2), 185–196 (2007)
Mayer, E.: Ist die bisherige Zuordnung von PMV und PPD noch richtig? Luft und Kältetechnik **34**(12), 575–577 (1998)
Mayer, E., Hellwig, R., Holm, A.: Thermische Behaglichkeit im Fahrzeug. In: Hofhaus, J. (Hrsg.) Pkw-Klimatisierung. V. Expert, Renningen (2007)
McIntyre, D.A.: Indoor climate. Applied Science Publishers Ltd., London (1980)
Moes, C.: Geometric Model of the Human Body. In: Proceedings of the TMCE 2000 Delft, the Netherlands Third International Symposium on Tools an Methods of Competitive Engineering, 2000. Delft University Press, Delft (2000)
Moosmayr, T.: Objektivierung von transienten Störgeräuschen im Fahrzeuginnenraum. Dissertationsschrift an der Technischen Universität München (2008)
Moosmayr, T.: Kontaktstellengeräusche. In: Zeller, P. (Hrsg.) Handbuch der Fahrzeugakustik – Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch, 2. Aufl. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2011). ATZ/MTZ-Fachbuch
Moseley, M.J., Griffin, M.J.: Effects of display vibration and whole-body vibration on visual performance. Ergonomics **29**(8), 977–983 (1986)
Müller, B.H., Gebhart, H.: Berechnungsmodelle zur rechnergestützten Ermittlung aktueller Klimasummenmaße für wärmebelastete Arbeitsplätze. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft **53**(2), 107–113 (1999)
Nachtigall, K.: Automotive Interior Lighting Fachtagung automotive interior – cockpit, Köln, 9./10.2007 (2007). Vortrag
Petzold, K.: Wärmelast und Raumtemperatur – Stand und Tendenzen. Luft- und Kältetechnik. Bd 11 Heft 5, 232 -236 (1975)
Pietzonka, S.: Innenraumbeleuchtung in Blickfeld neuer Fahrzeugkonzepte Ludwigsburg, 21./22.09.2004 (2004). Fachtagung
Probst, T., Krafczyk, S., Buchele, W., Brandt, T.: Visuelle Prävention der Bewegungskrankheit im Auto. Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten **231**(5), 409–421 (1982)
Recknagel, S.: Untersuchung der mechanischen Schwingungsübertragung an der oberen und unteren Extremität des Menschen VDI Fortschrittsberichte Reihe 17, Bd. 123. VDI Verlag GmbH, Nr (1995)
Roller, W.L., Goldman, R.F.: Prediction of solar heat load on man. Journal of Applied Physiology **24**, 7817 (1968)
Scheibe, W.: Beurteilung und Belastung, Aktivität und Beanspruchung des Menschen bei kontinuierlicher und unterbrochener Exposition mit vertikalen Fahrzeuggeschwindigkeiten in Simulations- und Feldexperimenten VDI-Fortschrittsberichte Reihe 11, Bd. 31. VDI Verlag GmbH, Nr (1979)
Schmale, G., Stelze, W., Kreienfeld, T., Wolf, C.D., Härtel, T., Jödicke, R.: COSYMAN - A Simulation Tool for Optimization of Seating Comfort in Cars. In: Digitale Mensch-Modellierung Digital Human Modeling Conference, München, 18. bis 20. Juni 2002. VDI Berichte, Bd. 1675 (2002)
Schwab, R.: Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die thermische Behaglichkeit in Kraftfahrzeugen FAT Schriftenreihe, Bd. 109. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., Frankfurt (1994)
Shimizu, S., Hara, H., Asakawa, F.: Analysis on air-conditioning heat load of passenger vehicle. JSAE Review **82**, 80–90 (1982). Nachdruck in: International Journal of Vehicle Design, Vol.4, May 1983, No.3, pp. 292-311

Siefert, A.: Numerische Modellierung und experimentelle Validierung der passiven und aktiven mechanischen Eigenschaften des menschlichen Gewebes und dessen Implementierung in ein Ganzkörpermodell. Schenker Verlag, Berichte aus der Biomechanik, Aachen (2013)

Sterling, E.M., Arundel, A., Sterling, T.D.: Criteria for human exposure to humidity in occupied buildings ASHRAE Transactions, Bd. 91 Part 1., S. 611–622 (1985)

Taxis-Reischl, B.: Wärmebelastung und Fahrverhalten. ATZ **99**(9) (1999)

Temming, J.: Fahrzeugklimatisierung und Verkehrssicherheit. Auswirkung sommerlichen Klimas auf die Leistungsfähigkeit der Fahrer FAT Schriftenreihe, Bd. 177. (2003)

Übler, J.: Mach doch mal die Heizung an! Auto-Motor-und-Sport Heft 2/2013, 54–59 (2013)

Verver, M.: Numerical Tools for Comfort Analysis of Automotive Seating, Technische Universität Eindhoven, Diss., 2004 (2004)

Vogl, C.: Neue Anforderungen an die Innenraumakustik durch alternative Antriebe. (Magna Steyer) Fachkongress Fortschritte im Automobil-Innenraum, Stuttgart, 16./17. November 2010 (2010)

Völksch, G.: Zur Veränderung des Klimas im Bereich von Städten. Luft- und Kältetechnik **14**(2), 88–90 (1978)

Wawzyniak, M.: Innenraumbehaglichkeit/Thermischer Komfort. In: Braess, H.-H., Seiffert, U. (Hrsg.) Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 6. Aufl. Vieweg + Teubner, Wiesbaden (2011). ATZ/MTZ-Fachbuch

Weible, R., Kern, J.: Steuerungs- und Regelsysteme für Heizungs- und Klimaanlagen in Kraftfahrzeugen VDI-Berichte, Bd. 515., S. 167–173 (1984)

Zeller, P.: Handbuch der Fahrzeugakustik – Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch, 2. Aufl. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2011). ATZ/MTZ-Fachbuch

Zipp, P., Rohmert, W., Klinkenhammer, K.: Ergonomische Untersuchung über die Lage der Luftauslassdüsen im Pkw zur Schaffung optimaler Klimabedingungen für die Wageninsassen. Institut für Arbeitswissenschaft der technischen Hochschule Darmstadt, Darmstadt, S. 1–64 (1977). Forschungsbericht

Zwicker, E., Fastl, H.: Psychacoustics. Facts and Models. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg (1990)

Weiterführende Literatur

78/317/EEG European Commission: Defrosting and demisting systems of glazed surfaces of motor vehicles (1977)

ADR 15 Australian Design Rule, Demisting of Windscreen.

Bitter, T.: Objektivierung des dynamischen Sitzkomforts, Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, Dissertation. Shaker Verlag, Aachen (2005)

Fanger, P.O.: Local discomfort to the human body caused by non-uniform thermal environments. Annais of Occupational Hygiene **20**, 285–291 (1977)

Fanger, P.O.: Maßstäbe für die thermische Behaglichkeit im PKW. In: Arbeitsplatz Auto, Bericht über das 5. Symposium Verkehrsmedizin des ADAC in Baden-Baden ADAC Schriftenreihe Straßenverkehr, Bd. 29, S. 151–156. (1984)

FMVSS 103 Federal Motor Vehicle Safety Standards, Windshield defrosting and defogging systems

Großmann, H.: Solarzellenbetriebene Standbelüftung für Pkw. Entwicklung und Markterfahrung. In: Reichelt, J. (Hrsg.) Pkw-Klimatisierung, S. 37–49. C.F. Müller Verlag, Karlsruhe (1982)

ISO2631-1: Evaluation of human exposure of whole-body vibration - Part 1: General requirements. International Organisation for Standardisation, Geneva, 1997

Moes, C., Horvath, I.: Estimation of the non-linear material properties for a finite elements model of the human body parts involved in sitting. In: Proceedings of the DETC 2002, 2002 ASME Design Engineering Technical Conference Montreal, 2002 (2002)

Pankoke, S.: Numerische Simulation des räumlichen Ganzkörperschwingungsverhaltens des sitzenden Menschen unter Berücksichtigung der individuellen Anthropometrie und Haltung Fortschritt-Berichte VDI. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2003)

Siefert, A., Pankoke, S., Eckard, C.: Durchgängige virtuelle Prozesskette zur Optimierung von Fahrzeugsitzen unter dem Aspekt Humanschwingungen. In: Humanschwingungen VDI-Berichte, Bd. 2002, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2007)

VDI2057-1: Beurteilung der Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen, Ganzkörper-Schwingungen. Verein Deutscher Ingenieure, 2002

Fahrerassistenz

Heiner Bubb, unter Mitarbeit von Klaus Bengler

9.1 Was ist Assistenz? – 526

9.2 Fahrerassistenz und Fahraufgabe – 528

9.2.1 Heute verfügbare Fahrerassistenzsysteme für die primäre Fahraufgabe – 529

9.2.2 Kategorisierung der Fahrerassistenzsysteme für die primäre Fahraufgabe – 557

9.2.3 Müdigkeitswarner – 562

9.3 Beitrag der Fahrerassistenzsysteme zur Fahrsicherheit – 566

9.4 Ergonomische Gestaltung – 571

9.4.1 Bedienung und Anzeige – 571

9.4.2 Unterscheidbarkeit der Modi eines Fahrerassistenzsystems – 575

Literatur – 578

H. Bubb et al., *Automobilergonomie,* ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-8348-2297-0_9, © Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

Seit Mitte der Achtzigerjahre des letzten Jahrhunderts wurden eine Reihe von nationalen und internationalen Projekten aufgesetzt (z. B.: PROMETHEUS, DRIVE, MOTIV, INVENT, RESPONSE, AKTIV), in denen Kraftfahrzeughersteller, Zulieferfirmen, Hochschulen sowie staatliche und private Forschungseinrichtungen in Kooperation daran gingen, Systeme zu entwickeln, welche mittels der neuen durch die Mikroelektronik gewonnenen Möglichkeiten den Fahrer bei seiner Aufgabe unterstützen sollten (König 2012; Akamatsu et al. 2013). Die Projekte waren durch die Zusammenarbeit von Ingenieuren, Psychologen, Medizinern und Ergonomen geprägt. Auf dieser Basis ergab sich eine Vielzahl von unterschiedlichen technischen Entwicklungen, die heute zum Teil auch auf dem Markt sind und teilweise große Bedeutung erhalten haben (erwähnt seien hier Fahrerassistenzsysteme und speziell im Bereich der Fahrerinformationssysteme die Navigationssysteme, die es heute als sehr preiswerte Zusatzausstattung gibt und die inzwischen eine große Marktpräsenz besitzen).

In diesem Kapitel soll das zu erwartende Erleben der Wirkung sowie die Interaktion des Fahrers mit Fahrerassistenzsystemen beleuchtet werden. Es ist nicht Ansatz dieses Kapitels, die verschiedenen technischen Auslegungen und Herausforderungen von Fahrerassistenzsystemen zu beschreiben. In diesem Zusammenhang wird auf das umfassende Werk von Winner et al. (2012) verwiesen.

9.1 Was ist Assistenz?

Zunächst ist zu definieren, was man unter Fahrerassistenz verstehen will. Geht man nämlich von dem Regelkreisparadigma aus, so stellt jede Maschine bezüglich der zu erledigenden Aufgabe letztlich eine Verstärkung menschlichen Willens bzw. menschlicher Fähigkeiten dar. Dabei ist dann die Frage: wie viele Aktionen bezüglich der Maschine muss man als Operateur erledigen, – oder unter dem Aspekt der Systemergonomie – wie viele zusätzliche, über die der Aufgabe hinausgehende Informationen muss man auf die Maschine übertragen, um mit ihr die gewünschte Aufgabe fertigzustellen? Um bei einem historischen Beispiel zu bleiben: „Ist es notwendig, den Zündzeitpunkt der Motordrehzahl anzupassen, um mit diesem unterschiedliche Geschwindigkeiten des Fahrzeugs zu realisieren?“ Oder – in der Entwicklung einen bedeutenden Schritt weiter: „Ist es notwendig, unterschiedliche Gaspedalstellungen einzunehmen, um eine gewünschte Geschwindigkeit in Abhängigkeit von unterschiedlichen Fahrwiderständen einzuhalten?“ Stellt also die automatische Zündzeitpunktverstellung (mit welcher technischen Maßnahme dies auch immer geschieht) bereits ein Assistenzsystem dar? Ist ein Tempomat als Assistenzsystem zu bezeichnen? Kein Nutzer, der die Eingriffe in den Fahrprozess durch ABS bzw. ESP kritisiert, würde sich heute mit einem nicht synchronisierten Getriebe zufrieden geben, sich wünschen, den Zündzeitpunkt permanent einstellen zu müssen oder gar während der Fahrt in regelmäßigen Abständen kleine Ölpumpen zu betätigen, um die beweglichen Teile des Fahrzeugs ständig mit Schmierstoff zu versorgen. Wo ist also die Grenze zu einem sog. „Assistenzsystem“? Sie kann sicherlich nicht darüber definiert werden, dass bestimmte Einstellvorgänge nun elektronisch geregelt werden; denn auch unter dem Aspekt einer traditionellen Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug wird heute das Motormanagement oder beispielsweise das Bremssystem elektronisch geregelt. Wahrscheinlich wird man sich zu einem späteren Zeitpunkt über unsere heutigen Diskussionen bezüglich der Assistenzsysteme, welche – scheinbar – den Fahrer in seiner Autonomie einschränken, wundern, weil vieles, was heute als innovativ wirkt, selbstverständlich geworden ist.[1]

Um die Idee der Assistenz zu definieren, haben König et al. (2000) das Paradigma des menschlichen Assistenten benutzt und gefragt, welche Aufgaben denn ein „perfekter“ Assistent im nicht-mobilen Berufsleben übernimmt. ◘ Tabelle 9.1 zeigt auf der Grundlage dieser Idee beispielhaft eine Gegenüberstellung von Tätigkeiten im Berufsalltag und beim Autofahren.

1 Es sei hier daran erinnert, dass es schon bei der Einführung von synchronisierten Getrieben heftige Debatten gab, ob denn jemand noch ein fähiger Autofahrer sei, der nicht mehr richtig Zwischengas geben kann. Eine ähnliche Diskussion ist heute noch in weiten Teilen Europas – im Gegensatz zu den USA – bezüglich des Automatikgetriebes virulent!

Tab. 9.1 Gegenüberstellung der Aktivitäten eines menschlichen Assistenten im Berufsalltag und entsprechender Erwartungen an ein Assistenzsystem beim Autofahren

<table>
<tr><th colspan="2">Tätigkeiten im Berufsalltag</th><th colspan="4">Autofahren</th></tr>
<tr><td rowspan="4">Hauptaufgabe</td><td>• Reiseplanung
• Terminplanung
• Hotelbuchungen
• Organisatorische Tätigkeiten,</td><td rowspan="4">Fahraufgabe</td><td rowspan="3">Primär</td><td>Navigation</td><td>• Fahrtroutenplanung
• Festlegen von Abfahrzeiten
• Hotelsuche
• Suche von Sonderzielen</td></tr>
<tr><td>• schwierige, denkintensive, aber sachlich eingegrenzte Teilaufgaben
• moderate Warnung: „dieses Vorhaben könnte folgende negative Konsequenzen haben: ...“
• Hinweis auf Informationen, die der „Chef“ nicht wissen kann
• Lästige Routinetätigkeiten</td><td>Führung</td><td>• Bewältigung komplexer Fahraufgaben
- Kreuzungssituationen
- Einparken und Ausparken
• Vermeiden
- drohender frontaler Kollisionen
- drohender seitlicher Kollisionen
- des Abkommens von der Fahrbahn
• Hinweis auf verborgene, die Fahrt beeinflussende Objekte (z.B. durch parkende Autos, Mauern u.ä.)
• Langweilige Autobahnfahrten Stop and Go-Verkehr</td></tr>
<tr><td>• „beherztes“ Eingreifen, wenn der „Chef“ einen schwerwiegenden Fehler macht (z.B. Dementi verschicken)</td><td>Stabilisierung</td><td>• Abfangen von heftigen
- Bremsmanövern
- Lenkmanövern</td></tr>
<tr><td>• Bereitstellen von unter bestimmten Bedingungen notwendigen Arbeitsutensilien
• Routineanrufe tätigen</td><td>Sekundär</td><td></td><td>• Wischerbetätigung Scheinwerferbetätigung (Einschalten, Auf-und Abblenden)
• Blinker setzen</td></tr>
<tr><td>Nebenaufgaben</td><td>• Wartung und Instandhaltung von Arbeitsmaterial und Arbeitsmitteln (Werkzeuge, Schreibutensilien, Batterien u. ä.)
• private Besorgungen zu nennen, wie das Schreiben von privaten Briefen, Besorgen von Geschenken, Erinnern an wichtige private Festtage u. ä.</td><td>Aufgaben</td><td>Tertiär</td><td></td><td>• Hinweise auf notwendige
- Servicearbeiten (z.B. Kühlwasser, Scheibenwaschwasser, Bremsbeläge usw.)
- Hauptuntersuchung
• Entertainment
- Radiobedienung
- Auswahl von Musik
- (Vor-)Lesen von Nachrichten
• Interaktion mit der Außenwelt
- Telefonieren
- E-Mail-Nachrichtenaustausch (u.ä.)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Urlaubsvertretung</td><td colspan="4">Vollautomatisches Fahren</td></tr>
</table>

Auch aus dem Bereich professioneller Autofahrertätigkeiten, wie sie der Fahrer einer Spedition, der Taxi- bzw. Omnibusfahrer, der Chauffeur einer wichtigen Persönlichkeit, aber auch der Beifahrer in einer Autorallye zu bewältigen hat, kann man spezifische Assistenztätigkeiten analysieren, die Analogien zu den Berufstätigkeiten darstellen.

Eine weitere häufig gestellte Frage ist: sind Assistenzsysteme primär nur ein Beitrag zur Verbesserung des Fahrkomforts/Verringerung des Diskomforts oder auch ein Beitrag für die Sicherheit? Im Sinne des unter ▶ Abschn. 3.3.4 vorgestellten Komfortmodells ist jeder Beitrag, der eine lästige Tätigkeit substituiert, eine Maßnahme zur Minimierung des Diskomforts. Dem steht der Aspekt des Komforts – d. h. des Gefallens – gegenüber, was bewirken kann, dass eine Tätigkeit, die unter bestimmten Bedingungen als Diskomfort empfunden wird, unter anderen Bedingungen angenehme Reaktionen erzeugt[2]. Daraus erklärt sich bereits das Dilemma, vor dem man bei der Konzeption eines Assistenzsystems immer steht. Hinsichtlich der Sicherheit kann man festhalten: jede Maßnahme, welche Ablenkung vermeidet oder zumindest auf ein unvermeidbares Minimum reduziert, welche die mentale Belastung im optimalen Arbeitsbereich hält und welche mangelnde menschliche Fähigkeiten substituiert, ist ein Beitrag für die aktive Sicherheit. Es besteht heute kein Zweifel mehr, dass Assistenzsysteme, die den Fahrer in schwierigen Fahr- und Verkehrssituationen unterstützen, einen wesentlichen Beitrag zur Unfallvermeidung leisten können. Dementsprechend definiert der DVR (Deutsche Verkehrssicherheitsrat) in seiner aktuellen Definition (veröffentlicht im Rahmen des 12. DVR Forum „Sicherheit und Mobilität“ 2006) als Fahrerassistenzsysteme (FAS) Systeme, die geeignet sind, den Fahrer in seiner Fahraufgabe hinsichtlich Wahrnehmung, Fahrplanung und Bedienung zu unterstützen, die in den drei Bereichen Navigation, Fahrzeugführung und -stabilisierung wirken und signifikant zur Unfallvermeidung beitragen. Charakteristikum sei danach, dass solche Systeme mittels Sensoren das Fahrzeug, das Fahrverhalten des Fahrzeugs, den Fahrer und/oder die Umwelt überwachen und den Fahrer durch zusätzliche Informationen bis hin zu einem autonomen Eingreifen in der Führung des Fahrzeugs unterstützen. Eine ähnliche Definition wurde im Rahmen des EU Projektes „Advanced Driver Assistance Systems in Europe (ADASE)“ vorgelegt: „*Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) are concepts to improve transport safety, efficiency and comfort without additional loads on resources (energy and land use) or on environment and quality of life*“.

2 ESP bewirkt beispielsweise, dass der durch das Lenkrad vorgegebene Kurs auch unter extremen Bedingungen – soweit dies die physikalischen Verhältnisse zulassen – eingehalten wird. Wenn es die Verhältnisse erlauben (zum Beispiel auf einem abgesperrten Gelände) kann es durchaus Spaß machen, ein Querdriften, was u. a. auch durch eine Missweisung des Lenkrads gegenüber der gegenwärtigen Bewegungsrichtung charakterisiert ist, zu induzieren.

9.2 Fahrerassistenz und Fahraufgabe

Wie bereits ◘ Tab. 9.1 zu entnehmen ist, ist Assistenz auf allen Niveaus der Fahraufgabe bis hin zu den tertiären Aufgaben möglich und unter den Aspekten der Sicherheit und partiell des Komforts (s. o.) auch sinnvoll. In ▶ Abschn. 6.3 wurde bereits auf verschiedene Assistenzfunktionen im Bereich der sekundären Fahraufgabe und speziell auch für tertiäre Aufgaben unter dem ergonomischen Aspekt der Interaktion mittels Anzeigen und Bedienelementen eingegangen. Prinzipiell sind alle Assistenzsysteme, die ein Unterstützung der primären und sekundären Aufgabe bereitstellen, dem Fahrer, der beim unassistierten System diese Aufgaben selbst zu erledigen hat, parallel geschaltet. Die Art der Interaktion ist bei den gegenwärtig verfügbaren Assistenzsystemen allerdings unterschiedlich. Bei den sekundären Aufgaben wird im Fall der eingeschalteten Assistenzfunktionen meist die Aufgabe von der Automatik übernommen; der Fahrer hat dann bezüglich dieser Aufgabe quasi eine monitive Funktion und muss nur dann eingreifen, wenn die beobachtete Aufgabenerfüllung nicht seinen Vorstellungen entspricht (z. B. Automatikgetriebe, Lichtautomatik, Wischerautomatik). Wie bereits in ▶ Abschn. 6.3 dargestellt, sollte diese Interaktion so erfolgen, dass sie sich praktisch nicht von der Handbedienung unterscheidet, die ohne Assistenz notwendig wäre. Bei den Assistenzsystemen für die

primäre Fahraufgabe ist die Art der Interaktion in Abhängigkeit von den jeweiligen Systemen unterschiedlich. Auf diese Besonderheit wird im Folgenden näher eingegangen.

Die eben kursorisch beschriebenen Assistenzsysteme setzen alle am Fahrzeug an, d. h. aus Bedingungen am Fahrzeug oder durch Messung von Information aus der Fahrumgebung werden Interaktionen mit dem Fahrzeug initiiert oder Informationen an den Fahrer übertragen. Ein davon sich prinzipiell unterscheidender Ansatz besteht darin, den Fahrer selbst hinsichtlich seiner Fähigkeit, das Fahrzeug sicher zu führen, zu analysieren und ihm gegebenenfalls Hinweise bzw. Warnungen zu geben, die Fahrt zu beginnen bzw. fortzusetzen. In diesem Zusammenhang wurden immer wieder Vorschläge entwickelt, wie man einen alkoholisierten oder sonst unter Drogeneinfluss stehenden Fahrer daran hindern kann, das Fahrzeug zu nutzen. Alle in diesem Zusammenhang erdachten Maßnahmen bewirken aber für den zum Fahren fähigen Normalnutzer derartig umständliche Startmanöver, dass sich dieser Ansatz nie durchsetzen konnte. Eine gewisse Bedeutung haben aber inzwischen die sog, Müdigkeitswarner erlangt, die von manchen Fahrzeugherstellern inzwischen serienmäßig angeboten werden.

9.2.1 Heute verfügbare Fahrerassistenzsysteme für die primäre Fahraufgabe

9.2.1.1 Historischer Überblick

Von frühen auf mechanischer Basis arbeitenden Systemen (z. B. mechanisches Antiblockiersystem) abgesehen, die aber niemals in Serie gingen, begann die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen im heutigen Sinne (s. o.) in den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts, nachdem entsprechend schnelle, auf elektronischer Basis arbeitende regelungstechnische Systeme zur Verfügung standen. Die ersten Systeme (ABS, ASR und ESP) bezogen sich auf die Stabilisierung des Fahrzeugs. Gemäß der Argumentation von van Zanten und Kost (2012) sollte man hier eher von *Fahrzeugassistenzsystemen* sprechen, „da sie dem Fahrzeug dabei helfen, kontrollierbar zu bleiben, wohingegen Fahrerassistenzsysteme den Fahrer dabei unterstützen, die Lenk-, Vortriebs- und Bremsvorgaben richtig zu dosieren und zu koordinieren“[3].

Das Antiblockiersystem ABS ging bereits 1978 in Serie. 1991 wurde es Pflicht für schwere Nutzfahrzeuge. Ab 1992 waren alle Mercedes-Benz Fahrzeuge mit ABS ausgerüstet. Heute ist dieses System praktisch für jeden Neuwagen Standard. 1995 wurde das erste elektronische Stabilitätsprogramm ESP gefertigt. Nachdem bei dem von einem schwedischen Journalisten durchgeführten sog. „Elchtest“ (doppelter Spurwechsel) 1997 ein Fahrzeug der damaligen neuen A-Klasse von Mercedes-Benz umkippte, wurde als Konsequenz ESP bei allen Fahrzeugen dieser Firma serienmäßig verbaut. Die positive Auswirkung auf die Unfallstatistik war so überzeugend, dass von November 2011 an alle neu in der Europäischen Union zugelassenen Pkw- und Nutzfahrzeugmodelle (außer LKW) mit ESP ausgerüstet werden müssen. Ab 2014 gilt dies sogar für alle Neufahrzeuge unabhängig davon, wann ihre Erstzulassung erfolgte. Nun müssen auch neu zugelassene LKW mit ESP ausgerüstet sein.

In der späteren Entwicklung kamen dann die Systeme hinzu, die sich auf die Bahnführungsaufgabe beziehen (ACC, LCA, LKA, LDW usw. s. u.). Sie wurden sukzessive ab Ende der Neunzigerjahre (erste Einführung 1998) zunächst in Fahrzeugen der Oberklasse als Sonderausstattungen eingeführt. Mit dem durch die Serie bedingten vermehrten Einsatz und auch bedingt durch technische Entwicklungen kostengünstiger Komponenten (zum Beispiel auf Lasertechnik statt auf Radartechnik basierende Systeme) werden diese Systeme sukzessive mehr und mehr auch in den unteren Klassen angeboten. Allerdings besteht bezüglich dieser Assistenzsysteme in absehbarer Zeit keine gesetzliche Vorgabe, weswegen sie aus Sicht des Kunden nach wie vor kostspielige Sonderausstattungen bleiben, was ihrer Verbreitung natürlich hinderlich ist. Ab 2015 müssen allerdings neue schwere Nutzfahrzeuge mit vorausschauenden Notbrems- und Spurhalteassistenzsystemen ausgerüstet werden.

3 Man kann diese Argumentation kontrovers sehen: die Eingangs des Kapitels erwähnten Verbesserungen an Motormanagement, an Getriebe und Ähnlichem würden demnach auch Fahrzeugassistenzsysteme sein, obwohl sie doch Aufgaben übernehmen, die zuvor der Fahrer selbst übernehmen musste.

Wenn man einmal von den militärischen Anwendungen, die bereits auf die Zeit des Zweiten Weltkrieges zurückgehen, absieht, begann auch die Entwicklung von Navigationssystemen für Fahrzeuge in den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts. Die ersten auf dem Markt verfügbaren Systeme nutzten noch nicht die Daten des satellitenunterstützten Global-Positioning-Systems (GPS)[4]. Ein erstes von Honda 1981 in Kooperation mit Alpine herausgebrachtes System (*Electro Gyrocator*) war in der Lage, mithilfe eines mechanischen Drehwinkelsensors und Wegstreckensensoren eine zweidimensionale Linie zu berechnen, die den zurückgelegten Weg repräsentierte. Der Fahrer musste eine transparente Karte vor einen Monitor spannen, der diese Linie zeigte und konnte so die zurückgelegte Strecke erkennen. Das System war kein Navigationssystem im eigentlichen Sinne und erlangte auch keine nennenswerte Verbreitung. 1984 stellte VDO in Kooperation mit dem Straßenkartenverlag Falk den *City-Pilot* vor, ein System, das letztlich auf dem Kompass basierte und in der Lage war, die Richtung des Ziels und die Entfernung in Luftlinie zu kalkulieren. Auch dieses System scheiterte bereits bei der Markteinführung. 1983 präsentierte Blaupunkt *EVA* (*elektronischer Verkehrslotse für Autofahrer*), dessen Ortung allein auf der Erfassung von Radsensordaten beruhte. Dieses relativ ungenaue System vermittelte Fahranweisung mithilfe einer Sprachausgabe. Es war aber immerhin das erste autarke Navigationssystem. Auf einem ähnlichen Prinzip beruhte der 1985 von der kalifornischen Firma Etak herausgebrachte *Navigator*, der bereits ein digital abgespeichertes Straßennetz nutzte, das allerdings wegen der damals gegebenen geringen Speicherkapazität des genutzten Rechners über einen Kassettenrekorder immer wieder aktualisiert werden musste. 1989 erschien von Blaupunkt das *TravelPilot IDS*, das neben der Information von Radarsensoren ebenfalls eine digital gespeicherte Straßenkarte nutzte. 1990 offerierte Pionier das erste GPS-gestützte Auto-Navigationssystem. 1994 bot BMW für seine 7er Serie das erste serienmäßige Navigationssystem in einem deutschen Auto an (Philips CARIN). Seit dieser Zeit haben Navigationsrechner sowohl als Sonderausstattung, fest eingebaut im Fahrzeug und relativ teuer vermarktet, aber insbesondere als Add-on aus dem Zubehörmarkt (praktisch um den Faktor 10 billiger als die Festeinbauten!) einen Siegeszug sondergleichen in die Fahrzeuge zurückgelegt.

Eine knappe Übersicht der heute verfügbaren Fahrerassistenzsysteme findet sich in Maier (2014), eine ausführliche Beschreibung sowohl der technischen wie der Interaktionsmöglichkeit durch den Fahrer in Winner et al. (2012). Die folgende Beschreibung fußt teilweise auf diesen beiden Literaturquellen.

9.2.1.2 Stabilisierungsaufgabe

Eines der ältesten Assistenzsysteme auf Stabilisierungsniveau stellt die ***automatische Geschwindigkeitskontrolle (Tempomat, Cruise Control)*** dar. Eine vom Fahrer vorgegebene Geschwindigkeit, die dieser aus der Erledigung seiner Führungsaufgabe ableitet, wird über einen Regler vom Fahrzeug in gewissen Grenzen gehalten. Bei den meisten Systemen erfolgt allerdings kein Bremseingriff, was zur Folge hat, dass bei Bergabfahrten die eingestellte Geschwindigkeit – sofern das Bremsmoment des Motors nicht ausreicht – überschritten werden kann. Nachdem hier keine andere Rückmeldung erfolgt als der Blick auf das Tachometer, der aber gerade im Vertrauen auf die Zuverlässigkeit des Automaten unterbleibt, stellt dies eine ergonomische Unzulänglichkeit dieser Systeme dar[5]. Die Bedienung des Tempomaten erfolgt im Allgemeinen durch einen zusätzlichen Lenkstockhebel oder auch durch Tasten, die auf einer

4 GPS wurde seit den 1970er-Jahren vom US-Verteidigungsministerium entwickelt. Es löste ab etwa 1985 das alte Satellitennavigationssystem *NNSS* der US-Marine, ebenso wie die Vela-Satelliten zur Ortung von Kernwaffenexplosionen ab. Seit Mitte der 1990er-Jahre steht es voll funktionsfähig zur Verfügung. Seit der Abschaltung der künstlichen Signalverschlechterung am 2. Mai 2000 stellt es auch für zivile Zwecke eine Ortungsgenauigkeit in der Größenordnung von etwa 10 Metern sicher.

5 Ein historischer Vorläufer des Tempomaten ist das Standgas, das häufig in leistungsfähigeren Fahrzeugen der Dreißigerjahre eingebaut war („Autobahnwagen"). Nachdem hier keine Regelung erfolgt, hängt die erreichte Geschwindigkeit erheblich von den augenblicklichen Fahrwiderständen ab. In europäischen Fahrzeugen konnte sich das Standgas auf Dauer nicht durchsetzen.

Lenkradspeiche angebracht sind[6]. Meist kann man durch Betätigung dieses Hebels die gerade gefahrene Geschwindigkeit als Soll-Geschwindigkeit übernehmen, durch Bewegung dieses Hebels nach oben bzw. unten – bei anderen Herstellern nach vorne bzw. zurück – die Geschwindigkeit anheben bzw. senken. Bisher hat sich kein herstellerübergreifendes Bedienungssystem für den Tempomaten etabliert. Aus sicherheitstechnischen Gründen schaltet sich der Tempomat automatisch bei Bremsbetätigung ab. Aus ergonomischer Sicht ist bei den meisten Systemen zu bemängeln, dass keine Anzeige über die eingestellte Geschwindigkeit erfolgt, so dass der Fahrer gegebenenfalls bei Nutzung der sog. Resume-Taste von der vom Fahrzeug nun eingenommenen Geschwindigkeit überrascht sein kann.

Ein weiteres in seinen technischen Voraussetzungen den Tempomaten ähnliches System ist der ***Geschwindigkeitsbegrenzer*** (***speed limiter***). Hier kann vom Fahrer eine Grenzgeschwindigkeit festgelegt werden, die dann vom Fahrzeug nicht überschritten werden kann. Dies ist zum Beispiel sinnvoll, wenn man vermeiden möchte, gesetzlich vorgegebene Grenzgeschwindigkeiten versehentlich zu überschreiten. Leider ist der Speed-Limiter bei den meisten Fahrzeugen – soweit sie überhaupt über eine solche Einrichtung verfügen – teilweise umständlich zu bedienen. Dies geschieht manchmal über den sog. Bordcomputer, was eine Bedienung während der Fahrt und damit eine Anpassung an wechselnde Geschwindigkeitsvorschriften praktisch unmöglich macht. Oft ist die Bedienung aber auch in die des Tempomaten integriert. Um sicherzustellen, dass der Fahrer jederzeit das Fahrzeug vollkommen beherrschen kann (s. u.), wird ein Überschreiten der Speed-Limiter-Grenzgeschwindigkeit durch eine Kick-Down-Funktion am Fahrpedal (wie die Kick-Down-Funktion für ein Automatikgetriebe) ermöglicht. Zurzeit bestehen seitens der EU Pläne, in Zukunft nur noch Fahrzeuge mit eingebautem Speed Limiter zuzulassen.

6 Ein Nachteil der Lenkradbetätigung ist übrigens, dass man aus sicherheitstechnischen Gründen zunächst die generelle Bereitschaft des Systems, Tempomateingaben zu übernehmen, einschalten muss, so dass eine spontane aus der Verkehrssituation sich anbietende Bedienung gegebenenfalls erschwert ist.

Das ***Antiblockiersystem (ABS)*** verhindert durch Messung und Regelung der Raddrehzahl ein Blockieren der Räder bei Vollbremsung und erhält somit auch unter diesen Umständen die Lenkbarkeit des Fahrzeugs. Der Regelungsvorgang besteht darin, dass für jedes Rad unabhängig bei Stillstand der Bremsdruck reduziert wird, bis wieder ein Drehen des Rades gemessen wird (bei preiswerteren Systemen gilt diese Unabhängigkeit allerdings nur für die Vorderräder). Dadurch entsteht für den Nutzer unter diesen Bedingungen ein pulsierendes Pedalgefühl, was er einerseits als Rückmeldung dafür werten kann, dass nun die physikalische Grenze erreicht worden ist, was andererseits aber auch zur Fehlinterpretation des ungeübten Fahrers führt und ihn dazu verleitet, erschrocken den Fuß vom Bremspedal zu nehmen. Insbesondere wird bei unterschiedlichen Reibungsverhältnissen auf der linken und rechten Fahrzeugseite durch das ABS-System der Bremsdruck der Räder auf der Fahrbahnseite mit der höheren Haftreibungszahl nur langsam gesteigert, so dass auch ein ungeübter Fahrer ein Ausbrechen des Fahrzeugs, das ja durch das einseitige Bremsen induziert wird, vermeiden kann (Bosch 2004). Insgesamt wird durch das ABS System die maximale Haftreibung weitaus besser ausgenutzt, als dies auch ein geübter Fahrer mit der früher empfohlenen „Stotterbremse“ erreichen konnte. Allerdings kann es durch das ABS-System speziell beim Bremsen auf Schnee und Schotter auch zu Nachteilen kommen, weil durch das stetige kurze Lösen der Bremse der sich vor dem blockierenden Reifen aufbauende „bremsende Keil“ vermieden wird. Dies führt dann u. U. zu einer Verlängerung des Bremsweges (Engel 2009). Gegenwärtige neuere Entwicklungen versuchen diesen Nachteil zu reduzieren bzw. zu vermeiden.

Die ***Antischlupfregelung (ASR)*** ist praktisch eine Weiterentwicklung des ABS-Systems, da es die gleichen Sensoren nutzt (van Zanten und Kost 2012). In diesem Fall wird beim Beschleunigen gemessen, ob die Umfangsgeschwindigkeit eines der Antriebsräder größer ist als die Übergrundgeschwindigkeit des Fahrzeugs (normalerweise gemessen an den nicht angetriebenen Rädern). Wenn das der Fall ist, wird das Motordrehmoment reduziert und bei den besser ausgebauten Systemen das entsprechende Rad auch abgebremst. Dadurch

wird wirkungsvoll der Verlust der Seitenführung, der bei durchdrehendem Rad gegeben ist, verhindert. Der Fahrer nimmt den Einsatz von ASR normalerweise bei Kurvenfahrt durch ein kurzzeitiges Wegrutschen wahr, das aber sofort abgefangen wird. Bei Geradeausfahrt kann er die Wirkung von ASR nur durch das Aufleuchten einer Warnlampe (und die reduzierte Antriebskraft des Motors) feststellen. Heute steht ASR praktisch nicht mehr als alleinige Sonderausstattung zur Verfügung, da es in das im Folgenden beschriebene ESP integriert ist.

Das ***Electronic Stability Control (ESC)*** bzw. ***elektronische Stabilitätsprogramm (ESP)*** nutzt die Funktionen von ABS und ASR, ergänzt durch die Messung der Gierwinkelrate. Es stellt somit ebenfalls eine Weiterentwicklung dieser beiden Systeme dar. Aus der Lenkradposition und der augenblicklichen Geschwindigkeit wird die Soll-Gierwinkelrate berechnet. Weicht diese über eine gegebene Grenze von der gemessenen Gierwinkelrate ab, so wird zunächst über die Motorsteuerung das Antriebsmoment reduziert. Reicht dies zur Stabilisierung des Fahrzeugs nicht aus, so wird über einen radindividuellen Bremseingriff ein Giermoment um die Hochachse erzeugt, welches die Differenz zu der berechneten Gierwinkelrate reduzieren soll. Durch diesen Eingriff kann einem instabilen Fahrverhalten entgegengewirkt und ein Schleudern des Fahrzeugs innerhalb der gegebenen physikalischen Grenzen vermieden werden. Der Fahrer wird also bei kritischen Fahrmanövern darin unterstützt, die Kontrolle über sein Fahrzeug wiederzuerlangen (Bosch 2004). Weiterentwickelte ESP-Systeme ändern in der gegebenen Situation sogar den Einschlagswinkel der gelenkten Räder, wodurch selbst bei unterschiedlichen Reibungsverhältnissen auf den beiden Fahrzeugseiten ein unbeabsichtigtes Gieren beim Bremsen weitgehend vermieden werden kann (Raste 2012). Die Rückmeldung für den Fahrer über das Einsetzen der ESP-Regelung ist ähnlich der der Antischlupfregelung. Gerade für sehr engagierte, sich als sportlich bezeichnende Fahrer wird die rigorose Reduktion der Motorleistung in Situationen als störend empfunden, in denen der Fahrer bewusst an die fahrdynamischen Grenzen geht. Die ESP-Regelung kann deshalb abgeschaltet werden, u.a auch weil dies technisch notwendig ist, wenn das Fahrzeug mit Schneeketten bestückt wird; denn diese verlangen einen gewissen Schlupf der Antriebsräder, um ihre Wirkung überhaupt auszuspielen. Es ist Angelegenheit der sog. Herstellerphilosophie, ob das Ausschalten gänzlich erfolgt oder ob selbst nach dem Ausschalten noch eine reduzierte ESP-Funktion erhalten bleibt.

Auch der ***Bremsassistent (BA)*** nutzt Komponenten der zuvor beschriebenen Systeme[7]. Er wurde entwickelt, weil u. a. in Fahrsimulatorexperimenten bei Daimler-Benz beobachtet wurde, dass viele Fahrer in einer Gefahrensituation erst nach einer beginnenden Komfortverzögerung eine Vollbremsung einleiten und manche Fahrer sogar Scheu haben, überhaupt eine Vollbremsung durchzuführen (van Zanten und Kost 2012). Der BA analysiert die Betätigungsgeschwindigkeit des Bremspedals (ggf. sogar die Umsetzgeschwindigkeit vom Gaspedal zum Bremspedal). Liegt diese unterhalb einer bestimmten Schwelle, wird der Bremsdruck bis an den Regelbereich des ABS-Systems erhöht und unabhängig von der Betätigungskraft des Bremspedals der maximale Bremsdruck zur Verfügung gestellt. Sobald der Fahrer allerdings den Druck auf das Bremspedal wieder verringert, wird der Bremsdruck auf die Vorgabe des Fahrers reduziert (Maier 2014). Van Zanten und Kost (2012) beschreiben, dass in Ergänzung zu diesem System noch weitere Maßnahmen zur Erhöhung der Bremswirkung in einer Gefahrensituation möglich sind: So kann beispielsweise bei Regen durch rhythmisches Anlegen der Bremsbeläge (ca. alle 3 min) die Nässe von den Bremsscheiben entfernt werden und plötzlicher Lastwechsel kann genutzt werden, um bereits vorsorglich die Bremsbeläge anzulegen und so die Verzugszeit bis zum Einsetzen der Bremswirkung so weit wie möglich zu reduzieren. Eine Rückmeldung für den Fahrer über die Wirkung des BA existiert im eigentlichen Sinne nicht. In einer extremen Gefahrensituation wird er froh sein, dass das Fahrzeug so wirkungsvoll bremst. Liegt keine Gefahrensituation vor und der BA spricht aus oben genannten Gründen an, so nimmt der Fahrer eine deutlich schnellere Bremsreaktion wahr.

Allen drei zuletzt beschriebenen Fahrerassistenzsystemen ist zu Eigen, dass sie innerhalb kür-

7 Unter technischem Aspekt auch als HBA für „Hydraulik Break Assist" bezeichnet (van Zanten und Kost 2012).

zester Zeit ansprechen (< 200 ms) und dass der Fahrer unmittelbar nach dem Ansprechen zunächst einmal keinen Einfluss mehr auf die Wirkungsweise des Systems hat. Dies scheint aus sicherheitstechnischen Gesichtspunkten gerechtfertigt, weil innerhalb dieser extrem kurzen Zeiten eine Reaktion des Fahrers aus physiologischen und psychologischen Gründen überhaupt nicht möglich ist. Wie Gelau et al. (2012) argumentieren, entsteht dadurch auch kein Widerspruch zu dem Wiener Übereinkommen von 1968 (WÜ-StV), wonach „jedes Fahrzeug und miteinander verbundene Fahrzeuge, wenn sie in Bewegung sind, einen Führer haben müssen" (Artikel 8 Abs. 1 WÜ-StV) und dieser Fahrzeugführer „… unter allen Umständen sein Fahrzeug beherrschen (muss), um den Sorgfaltspflichten genügen zu können und ständig in der Lage zu sein, alle ihm obliegenden Fahrbewegungen auszuführen …" (Artikel 13 Abs. 1 WÜ-StV); denn die hier beschriebenen Systeme würden – soweit physikalisch möglich – in zeitkritischen Situationen sicherstellen, dass die Regelung stets mit dem Fahrerwillen übereinstimmt. Allerdings kommen gerade aus diesem Grund für diese Systeme erhöhte Anforderungen der funktionalen Sicherheit zum Zug, um ihre Verfügbarkeit und Funktion sicherzustellen.

9.2.1.3 Bahnführungsaufgabe

Die Bahnführungsaufgabe ergibt sich aufgrund der statischen und dynamischen Situation, die sich für den Fahrer vor dem Fahrzeug auftut. Assistenzsysteme auf der Ebene der Bahnführung müssen also dafür sorgen, dass der Fahrer in der Lage ist, alle seine Fahrt möglicherweise beeinflussenden Objekte zu erfassen und wenn dies aus verschiedenen Gründen nicht möglich oder wenn er dazu nicht bereit ist, diesen Mangel durch technische Maßnahmen zu substituieren. Maßnahmen, durch welche die nächtliche Sicht über das Maß, das mit den bisherigen Scheinwerfersystemen möglich ist, verbessert wird, gehören hier deshalb ebenso dazu wie solche Systeme, welche unmittelbar regelnd in die Längs- und Querdynamik eingreifen. Weil die Technik für die Quer- und Längsdynamik gänzlich unterschiedlich ist und weil diese beiden Dynamiken auch vom Fahrer wegen ihrer stark divergierenden Zeitkonstanten unterschiedlich erlebt werden, wurden die entsprechenden Fahrerassistenzsysteme praktisch unabhängig voneinander entwickelt. Ein Charakteristikum aller Systeme zur Assistierung in der Bahnführungsaufgabe ist, dass die für ihre Wirkung notwendige Information nicht allein aus Reaktionen des Fahrzeugs und Eingaben des Fahrers gewonnen wird, sondern dass in unterschiedlicher Weise Objekte in größerer Entfernung vor dem Fahrzeug erfasst und ihre Position und Positionsänderungen in die Regelung einbezogen werden.

Verkehrszeichenbeobachter

Verkehrsvorschriften setzen den äußeren Rahmen, innerhalb dessen in Abhängigkeit von den temporär sich ändernden, aktuellen Situationen die Führungsaufgabe zu erledigen ist. Abgesehen von den generellen Vorschriften spielen dabei Hinweise und Einschränkungen, die durch Verkehrsschilder gesetzt werden, eine wichtige Rolle. Verkehrszeichen, die eine Einschränkung für einen bestimmten Streckenabschnitt festlegen, stellen dabei insofern ein Problem dar, als sie nicht nur vom Fahrer entdeckt werden müssen, sondern auch die Dauer und Bedingungen ihrer Gültigkeit gemerkt werden muss. Die wichtigsten Vertreter dieser Art von Verkehrszeichen sind lokale Geschwindigkeitsbegrenzungen und Überholverbote. Lokale Einschränkungen durch Halte- und Parkverbote spielen nur dann eine Rolle, wenn der Fahrer beabsichtigt, sein Fahrzeug abzustellen. Eine weitere wichtige Klasse von Verkehrsschildern gibt Hinweise auf Gefahrenstellen und Vorschriften bezüglich der Vorfahrtsregelung. Verkehrszeichenbeobachter, die technisch auf Kamerasystemen mit nachgeschalteten Filteralgorithmen basieren und das Resultat dieser Analyse im Instrumentenfeld dem Fahrer anzeigen, können eine wesentliche Hilfe sein. Da viele der genannten Verkehrszeichen dauerhaft lokal gebunden sind – wenn man einmal von solchen absieht, die beispielsweise bei Baumaßnahmen auf eine geänderte Verkehrsführung hinweisen –, kann zusätzlich zu der Kameradetektion die Information für das jeweilige Verkehrszeichen auch aus dem Navigationssystem gewonnen werden. Aus ergonomischer Sicht sollte dem Fahrer das Resultat einer Verkehrszeichenerkennung nur dann angezeigt werden, wenn die Bedingungen für die jeweilige Einschränkung bzw. den jeweiligen Hinweis auch gegeben sind. Insofern ist es sinnvoll, die Aufbereitung dieser Information

Abb. 9.1 Anzeige der Geschwindigkeitsbegrenzung durch den Verkehrszeichenerkenner **a** Beispiel Bosch, **b** Vorschlag Ergonomie

beispielsweise mit den Geschwindigkeitssensoren, der Uhrzeit, dem Schaltzustand des Lichtsystems/Lichtsensors und des Scheibenwischers/Regensensors zu verbinden. Bei der Anzeige dieses Resultats ist auch die Art der Reaktion des Fahrers, die sich aus der aktuellen Fahrsituation ergibt, zu berücksichtigen. So wurde z. B. im Rahmen des INVENT-Programms beobachtet, dass die Anzeige eines Stoppschildes auf dem Display (hier möglichst im HUD! Sog. STOP-Assistent, Mages et al. 2012) nicht in einem festen räumlichen Abstand zu der bevorrechtigten Straße erscheinen sollte, sondern in einem zeitlichen Abstand, der sich aus der aktuellen Geschwindigkeit und der Annahme einer Komfortverzögerung ($< 3\,m/s^2$) ergibt.

Prinzipiell sollten die von dem Verkehrszeichenbeobachter vermittelten Anzeigen im grafischen Layout den in der Realität sichtbaren Verkehrszeichen entsprechen. Abbildung 9.1 zeigt links ein Beispiel für die Anzeige einer Geschwindigkeitsbegrenzung im Analoginstrument. Rechts findet sich ein Vorschlag aus ergonomischer Sicht, der mit Anzeigefeldern im Kombiinstrument, die auf Grafikdisplaybasis arbeiten, in dieser Form realisiert werden kann. In diesem Fall ist übrigens die analoge Anzeige sogar sinnvoll, da sie als Grenzwertanzeige fungiert: der Fahrer kann mit einem Blick erkennen, wie weit er sich bereits dem gesetzten Limit genähert hat.

Leider sind die heute verfügbaren Verkehrszeichenbeobachter noch fehlerbehaftet. Eine von der Zeitschrift Auto-Motor-und-Sport veröffentlichte Untersuchung des Verkehrszeichenbeobachters Opel-Eye zeigte eine Erkennungsquote von lediglich 80 %. Die Erkennungsquote sinkt bei schlechten Sichtverhältnissen oder nachts sogar auf eine Erkennungsquote von unter 80 %. Der Fahrer wird bei einer solchen Erkennungsquote nicht entlastet, sondern muss eher noch kritischer auf die Schilder achten, um Fehlanzeigen zu korrigieren (Gulde 2009). Überhaupt führt Maier (2014) kritisch aus, ob durch solche Systeme die Einhaltung von Geschwindigkeitsvorschriften und Überholverboten überhaupt besser beachtet werden. Ein im Rahmen der dritten Untersuchungsphase des EU Projektes SARTRE (Social Attituds to Road Traffic Risk in Europa) durchgeführte Analysen speziell zu dem Thema „Einhaltung der Geschwindigkeitsvorgaben“ wies nämlich aus, dass nur 41 % der befragten Fahrer deren Einhaltung als wichtig ansehen bzw. diese einhalten. Allein in Deutschland geben ca. 25 % der befragten Fahrer an, die Geschwindigkeitsvorgaben im Straßenverkehr zu überschreiten (Cauzard 2003). Wahrscheinlich würde in dieser Hinsicht erst eine Kombination mit dem im Unterabschnitt „Längsdynamik“ dargestellten ACC-System eine signifikante Verbesserung bewirken.

Sichtverbesserungssysteme

Obwohl insgesamt in dem Beobachtungszeitraum zwischen 1991 und 2002 Nachtunfälle mit Personenschaden abgenommen haben, was wohl auf die sukzessive technische Verbesserungen der konventionellen Scheinwerfersysteme zurückzuführen ist, ist dennoch eine Häufung von Nachtunfällen in den dunklen Wintermonaten zu beobachten. Khanh und Huhn (2012) argumentieren, dass bei aufmerksamer Fahrt und guten Umweltbedingungen bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h ein Anhalteweg von 91 m (keine Notbremsung; zusammengesetzt aus Basisreakti-

onszeit, Entscheidung, Bremsvorgang mit mehreren Stufen) erforderlich ist. Die Erkennbarkeitsgrenze von Fernlicht liegt bei ca. 150 m, so dass Hindernisse unter diesen Bedingungen bei Nacht ausreichend früh erkannt werden. Bei Fahrten mit Abblendlicht liegt die Erkennbarkeitsgrenze mit Halogenscheinwerfern bei maximal 65 m, was eigentlich eine Grenzgeschwindigkeit von 60 km/h–75 km/h erforderlich machen würde. Zudem wird der Anteil des Fernlichts bei Fahrten mit erforderlicher Beleuchtung auf ca. 5 % geschätzt (Maier 2014). Sichtverbessernde Maßnahmen sind also eine wichtige Voraussetzung für eine weitere Reduktion von Nachtunfällen. Aus den Eigenschaften der optischen Informationsaufnahme des Menschen (siehe auch ► Abschn. 3.2.1) können nach Khanh und Huhn zwei elementare Forderungen an die lichttechnische und fahrzeugtechnische Anlage abgeleitet werden:

1. Durch eine homogene Lichtverteilung vor dem Fahrzeug mit guter seitlicher Beleuchtung der Fahrbahn und Fahrbahnumgebung sowie viel Licht auf möglichst großen Abständen könnte der Kontrast von relevanten Objekten gegenüber dem Hintergrund verbessert werden und somit eine große Erkennbarkeitsentfernung erreicht werden. Wichtig ist dabei, dass sich diese Lichtverteilung in Abhängigkeit von der momentanen Fahraufgabe an den Streckenverlauf anpasst.
2. Gleichzeitig muss die psychologische Blendung durch den Gegenverkehr sowie den nachfolgenden Verkehr, dessen Licht im Rückspiegel sichtbar ist, minimiert, im besten Fall sogar eliminiert werden. Dies erfordert eine Leuchtweitenregelung, die so auszulegen ist, dass die Beleuchtungsstärke im Auge des Gegenverkehrs und des vorausfahrenden Verkehrs unter keinen Umständen den in den amtlichen Regulationen maximal zulässigen Wert überschreitet.

Schon durch die Nutzung von Gasentladungslampen (sog. Xenonlicht) wird die Erkennbarkeitsgrenze auf ca. 85 m und damit die Grenzgeschwindigkeit auf ca. 90 km/h angehoben, wobei die befürchtete psychologische Blendungsgefahr in Versuchen nicht nachgewiesen werden konnte (Khanh und Huhn 2012). Mit der Einführung von LED-Lichtsystemen könnten die Leistungsgrenzen der Gasentladungslampe sogar noch übertroffen werden, wobei man nach Experteneinschätzungen davon ausgehen kann, dass sich diese Technik aufgrund der höheren Energieeffizienz trotz der höheren Kosten mehr und mehr etablieren wird (Götz et al. 2009).

Noch nicht zu dem Bereich der Assistenzsysteme im engeren Sinne gehören die adaptiven Lichtsysteme, welche in der 2007 festgelegten ECE-Regelung 123 als sog. AFS-Scheinwerfer (Advanced Frontlighting System) beschrieben werden (von der Firma Hella 2006 als erstem Hersteller eingeführt). Sie beinhalten folgende Funktionalitäten:

- Das ***Stadtlicht*** kommt nur bis Geschwindigkeiten von 50 km/h zum Einsatz. Es erleichtert durch eine verbreiterte und symmetrische Lichtverteilung das frühzeitige Erkennen von Fußgängern und Objekten.
- Das ***Landstraßenlicht*** basiert auf dem heutigen Abblendlicht und sieht eine weiterreichende Ausleuchtung der eigenen Fahrbahn und eine verbesserte Ausleuchtung des Seitenbereichs vor.
- Das ***Kurvenlicht*** wird als *statisches* (ab einem gewissen Lenkradeinschlag wird ein seitlich gerichteter zusätzlicher Scheinwerfer eingeschaltet) und *dynamisches* (die gesamte Beleuchtungseinheit wird in Abhängigkeit von der Lenkradstellung um die Hochachse – meist bis ±18° – gedreht. Beim so genannten α/2-Algorithmus wird der Scheinwerfer auf der äußeren Kurvenseite nur halb so viel gedreht wie der auf der inneren Kurvenseite; Khanh und Huhn 2012). Ausgedehnte Tests haben übrigens ergeben, dass das statische Kurvenlicht dem Fahrer in Kurven keine Sichtbarkeitsweite gewährleistet, die größer ist als der benötigte Bremsweg (Grimm und Casenave 2007). Weitere Entwicklungen des Kurvenlichts beziehen Informationen aus dem Navigationssystem und der für das automatische Umschalten (s. u.) ohnedies notwendigen Frontkamera in die Steuerung mit ein. Eine zukünftig noch effektvollere Weiterentwicklung stellt die Einbeziehung der Technik des unten beschriebenen blendfreien Fernlichtes dar.

Abb. 9.2 Markierungslicht (Quelle Hella KGa Hueck &Co)

- Das ***Autobahnlicht*** besitzt eine höhere Reichweite im Zentrum. Durch den großen Abstand der Fahrbahn mit dem Gegenverkehr wird eine Blendung dennoch weitgehend vermieden.
- Das ***Schlechtwetterlicht*** ermöglicht durch eine breite, leicht nach außen geschwenkte Lichtverteilung eine bessere Orientierung am Fahrbahnrand insbesondere bei nasser Fahrbahn. Gleichzeitig wird die Blendung des Gegenverkehrs durch das von der Straße reflektierte Licht reduziert.

Aus ergonomischer Sicht ist es sinnvoll, wenn die beschriebenen Funktionalitäten in Abhängigkeit von externen Bedingungen selbsttätig geschaltet werden. Ein automatisches Umschalten zwischen Abblend- (Fahr-) und Fernlicht, das über die Information aus der Bildverarbeitung eines Kamerabildes gesteuert wird, steht heute schon bei vielen Herstellern als Sonderausstattung zur Verfügung.

Die oben dargestellten Lichtsysteme gemäß der AFS-Beschreibung beziehen sich nur auf generelle Verkehrssituationen nicht aber auf eine konkrete Fahrsituation, die sich zeitlich kurzfristig ändern kann. Dies wird erst durch die sog. ***assistierende Lichtverteilung*** möglich. Technische Voraussetzung dafür ist ein Kamerasystem, das mittels Bildverarbeitung die Lichtverhältnisse (Scheinwerfer des entgegenkommenden Verkehrs, Rückleuchten des vorausfahrenden Verkehrs) sowie gegebenenfalls auch lebende Objekte (auf der Grundlage einer Infrarotkamera) situationsgerecht detektieren kann sowie ein Scheinwerfersystem, mit dem gezielt spezifische Lichtquellen in Intensität und Richtung geschaltet werden können. Auf dieser Basis sind folgende Assistenzsysteme entwickelt und heute in Oberklassefahrzeugen auch verfügbar (Darstellung nach Khanh und Huhn 2012):

- ***Markierungslicht***: die Informationen, die von einer Infrarotkamera geliefert wird, wird dazu genutzt, einen zusätzlichen Spotlight-Scheinwerfer einzuschalten und auf das entsprechende Objekt zu richten (Abb. 9.2). Die dazu notwendige Detektionstechnik wird im Prinzip auch für die sog. Night-Vision-Systeme genutzt. Aus ergonomischer Sicht stellt das Markierungslicht eine weitaus bessere Lösung dar als die Darstellung oder Markierung eines Objektes auf einem Videoscreen, der sich nicht im Blickfeld des Fahrers befindet und der zudem wegen des verkleinernden Abbildungsmaßstabes auch keine korrekte Winkelzuordnung zur Realität ermöglicht (siehe hierzu auch ▶ Abschn. 6.2.1 und Abb. 6.16) .
- ***Variable Leuchtweitenregelung***: in Abhängigkeit vom Abstand des eigenen Fahrzeugs zum umgebenden Verkehr wird die Hell-Dunkel-Kante vertikal variiert, so dass keine Blendung verursacht werden kann. Das Prinzip kann am Beispiel des Begegnens mit Gegenverkehr anschaulich gemacht werden. Ist kein Gegenverkehr durch das Kamerasystem entdeckt worden, befindet sich das System im Fern-

lichtmodus. Sobald Gegenverkehr erfasst ist, wird die Hell-Dunkel-Kante kontinuierlich abgesenkt (im Unterschied zu der oben beschriebenen automatischen Umschaltung zwischen einem starren Fern- und Abblendlicht). Kommt der Gegenverkehr nahe an das eigene Fahrzeug, erreicht die Hell-Dunkel-Kante schließlich den Zustand des Abblendlichtes.

- ***Blendfreies Fernlicht:*** Das Scheinwerfersystem befindet sich immer im Fernlichtmodus. Das Kamerasystem des eigenen Fahrzeugs erfasst ständig den Verkehrsraum und berechnet sowohl die Winkelpositionen als auch Abstände aller dort befindlichen Fahrzeuge. Das Licht wird dann selektiv und ortsgenau an den Stellen weggenommen, wo sich entgegenkommende Fahrzeuge und vorausfahrende Fahrzeuge befinden. Gegenüber dem Prinzip der variablen Leuchtweitenregelung besteht der Vorteil darin, dass Licht in Zonen, in denen keine Blendung entstehen kann, erhalten bleibt.

Längsdynamik

Die ***Adaptive Fahrgeschwindigkeitsregelung***, häufig bezeichnet als ***Adaptive Cruise Control (ACC)*** bzw. ***Abstandstempomat*** oder ***Distronic*** (Daimler) erweitert die Funktionen des Tempomaten um die Regelung des Abstandes zu einem vorausfahrenden Fahrzeug. Prinzipiell muss das System, ähnlich wie der Tempomat, vom Fahrer aktiviert werden. Beim Betätigen der Bremse wird das System automatisch deaktiviert. Auf freier Fahrbahn hält es ähnlich wie eine konventionelle Fahrgeschwindigkeitsregelung eine vom Fahrer voreingestellte Geschwindigkeit. Auf der Grundlage einer Radardistanzmessung bzw. – in neueren (low budged; s. u.) Entwicklungen auf der Basis von Laserdistanzmessungen oder kamerabasierten Systemen – erkennt es den Abstand vorausfahrender Fahrzeuge und leitet aufgrund der gemessenen Differenzgeschwindigkeit Brems- und Beschleunigungsvorgänge[8] mit dem Ziel ein, einen vorgegebenen Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug einzuhalten. Die von dem System selbstständig eingehaltenen Bremsverzögerungen unterschreiten bei den meisten Herstellern den Wert von $-2\,m/s^2$ bis $-3\,m/s^2$ nicht. Auch für die Beschleunigungsvorgänge werden nur moderate Werte eingehalten (siehe auch ◘ Tab. 9.2). Wegen der begrenzten Reichweite der Radarsensoren (sie liegt im Bereich von etwa 200 m; die alternativen technischen Systemen wie Laser oder optische Kamera sind teilweise deutlich schlechter) wird die maximale Regelgeschwindigkeit bei den meisten Herstellern auf 180 km/h, bei Audi auf 210 km/h begrenzt (bei dem in den unteren Klassen zukünftig eingeführten preisgünstigeren Systemen auf Laser- bzw. Kamerabasis wird die maximale Regelgeschwindigkeit sogar auf 130 km/h begrenzt).

Neben der Wahl der Grenzgeschwindigkeit kann der Fahrer auch den Abstand wählen, den das System automatisch hält. Dieser Abstand wird in Sekunden angegeben, da er die Strecke s charakterisiert, die bei der gegebenen Geschwindigkeit v innerhalb dieser Zeitdistanz t durchmessen wird ($s = v \cdot t$)[9]. Meist kann dieser Abstand in drei bzw. vier Stufen eingestellt werden. Die kürzeste Distanz liegt bei den meisten Herstellern bei 1 s, die größte Distanz bei 2 s[10]. Wenn ein vorausfahrendes Fahrzeug von dem System erfasst worden ist, erhält der Fahrer eine optische Rückmeldung meist in Form einer bildhaften Anzeige (◘ Abb. 9.3). Um ein unkomfortables Verhalten der adaptiven Fahrgeschwindigkeitsregelung zu vermeiden, wird bei allen Herstellern insbesondere bei vorangegangenen hohen Differenzgeschwindigkeiten ein kurzfristiges Unterschreiten der eingestellten Sicherheitsdistanz toleriert. Wenn das System an seine Systemgrenzen gerät (z. B., wenn das Einhalten der Sicherheitsdistanz nur durch stärkere Verzögerungen als $-3\,m/s^2$ möglich ist) wird der Fahrer durch ein akustisches Signal gewarnt. Um undurchschaubare Reaktionen des Systems zu vermeiden, werden für die Berechnung der Sicherheitsdistanz alle von dem System erfassten Objekte, die sich mit der fahrzeugeigenen Geschwindigkeit oder höherer Geschwindigkeit

8 Ältere Systeme verzichteten auf den Bremseingriff, was für den Fahrer unter gegebenen Bedingungen durchaus verwirrend sein kann.

9 Vielen Nutzern fällt diese Vorstellung einer Zeitdistanz, die einen Abstand charakterisiert, schwer.

10 In diesem Zusammenhang sei angemerkt, dass in Deutschland ein Unterschreiten des Sicherheitsabstandes von 0,8 s mit Bußgeld belegt wird.

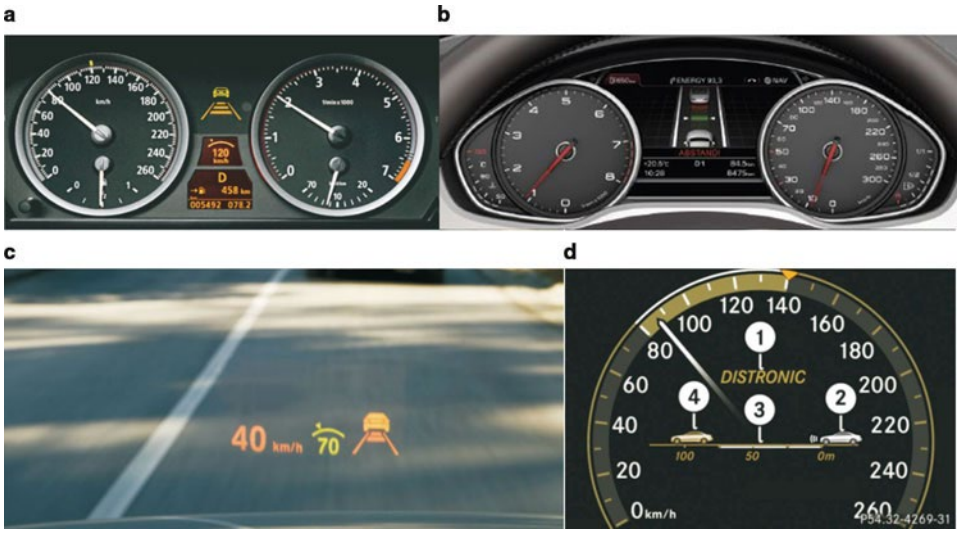


Abb. 9.3 Rückmeldung über den Betriebszustand des ACC (BMW E60, **a**) bzw. Audi (**b**) sowie Mercedes Distronic plus (**d**) mittels einer bildhafte Anzeige. Im optionalen HUD (BMW E60, **c**) verschwindet die Anzeige über die eingestellte Soll-Geschwindigkeit (hier 70 km/h) nach einigen Sekunden.

9

auf das Fahrzeug zubewegen (also stehende und entgegenkommende Objekte) ausgeblendet. Eine Ausnahme bildet ein vorausfahrendes Fahrzeug, das von dem System bereits erfasst war und das nun – beispielsweise vor einer roten Ampel – zum Stillstand kommt. In diesem Fall bremst das ACC-Fahrzeug ebenfalls fast bis zum Stillstand (kurz davor wird eine moderate akustische Warnung gegeben).

Es können auch Situationen auftreten, bei denen das System aus Sicht des Fahrers nicht nachvollziehbar reagiert und daraus womöglich kritische Fahrsituationen entstehen. Wenn das ACC-Fahrzeug beispielsweise das vorausfahrende Fahrzeug „verliert", so beschleunigt es unter Umständen für den Fahrer unerwartet auf die eingestellte Sollgeschwindigkeit (eine typische Situation für ein solches „Verlieren" ist beispielsweise, wenn sich das vorausfahrende Fahrzeug im Kreisverkehr oder in einer engen Kurve nicht mehr im Erfassungsbereich der Radarsensoren befindet). Es kann auch vorkommen, dass das System bestimmte Verkehrsteilnehmer z. B. Motorradfahrer oder Fahrradfahrer nicht erkennt und infolgedessen darauf nicht reagiert. Auch das Rechtsüberholverbot auf Autobahnen beachten erst ACC-Systeme der neuesten Entwicklung. Eine weitere typische Situation, die bei dem Fahrer Verwirrung stiften kann, entsteht, wenn in einer langgezogenen Linkskurve auf der Autobahn die Radarsensoren des überholenden ACC-Fahrzeugs einen langsam fahrenden Lkw erfassen. Dann wird für den Fahrer unverständlicherweise ein Bremsmanöver eingeleitet und zugleich eine Warnung vor einem drohenden Auffahren abgegeben. Diese systembedingten Unzulänglichkeiten führen bei vielen Nutzern des ACC-Systems zur Ablehnung.

Das ACC-System stellt in einem sehr engen Aufgabenbereich (Längsbewegung im rollenden Verkehr > 30–40 km/h) bereits eine gewisse Form des automatischen Fahrens dar (siehe hierzu auch ▶ Abschn. 9.4), da der Fahrer, solange das System aktiv ist, bezüglich der einzuhaltenden Geschwindigkeit und der Abstände zu dem vorausfahrenden Fahrzeugen eine Monitorfunktion einnimmt. Wie Strasser (2012) feststellt, ist ACC das am weitesten verbreitete und in umfangreichen und internationalen Studien am besten untersuchte Assistenzsystem. Es verwundert eigentlich nicht, dass bei Verwendung des ACC-Systems auch objektiv ein konstanter Zeitabstand gefahren wird (Fancher et al. 1998; Rakha et al. 2001; Ma und Kaber 2005; Viti et al. 2007). Ansonsten sind aber die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen zum Teil recht widersprüchlich. So wurde in den Studien von Hoedemaeker und Brookhuis (1998); Dragutinovic

et al. (2005) und Freyer (2008) sowie in der Simulatoruntersuchung von Lange et al. (2008), die allesamt auf Außerortsstraßen durchgeführt wurden, beobachtet, dass die Probanden mit ACC schneller als ohne fuhren. Die Studien von Stanton et al. (1997) und Filzek (2002) weisen demgegenüber keine Geschwindigkeitsänderung aus. In anderen Studien (Tricot et al. 2004; Kovordányi 2005; Ojeda und Nathan 2006) wird sogar eine Reduzierung der Geschwindigkeit beobachtet. Der Grund für diese unterschiedlichen Befunde dürfte darin liegen, dass durch die Notwendigkeit, für die Nutzung des ACC-Systems eine Sollgeschwindigkeit vorzugeben, gegebenenfalls bezogen auf die Situation schneller gefahren wird, als man dies aufgrund der intuitiven Einschätzung durchführen würde, dass aber andererseits vorgegebene Geschwindigkeitsbegrenzungen durch die Tempomatfunktion eher eingehalten werden als ohne. Die Untersuchung von Oei und Polak (2002) sowie Acarman et al. (2006) bestätigt das indirekt, wonach es im Stadtverkehr zu einer signifikanten Reduktion der Geschwindigkeit kam. Auch die gefahrenen Abstände sind teilweise geringer, aber immer im sicheren Bereich (Hoedemaeker und Brookhuis 1998; Dragutinovic et al. 2005; Eick und Debus 2005; Lee und Nam 2007; Popiv et al. 2008; Lange et al. 2008). Wie es sich in einem Langzeitversuch zeigte, wird von vielen Fahrern bevorzugt die kürzeste Zeitlücke gewählt (Sacher und Bubb 2006). Immerhin erhöht sich bei Verwendung von ACC die mittlere Zeitlücke gegenüber dem unassistierten Fahren (Kovordányi 2005; Seppelt et al. 2005). Zudem führt ACC offensichtlich auch dazu, dass auf Autobahnen weniger häufig die Spur/Fahrstreifen gewechselt und damit allerdings eher auf der linken bzw. mittleren Spur gefahren wird (Tricot et al. 2004; Freyer 2008; Jenness et al. 2008). Mit ACC leiten die Fahrer nach Alkim et al. (2007) und Freyer (2008) einen Spurwechseln für ein Überholmanöver früher als ohne ein, offensichtlich, um einen störenden Eingriff des Systems zu vermeiden.

Die hier geschilderten Ergebnisse mit ACC-Fahrzeugen basieren fast ausnahmslos auf Untersuchungen mit Fahrern, die mit solchen Systemen zum ersten Mal in Kontakt kamen. Weinberger (2001, siehe auch Weinberger et al. 2001) hat mit Vielfahrern Untersuchungen durchgeführt, die ein solches Fahrzeug vier Wochen lang nutzen konnten, um insbesondere Habituationseffekte zu untersuchen, da sich das ACC-Fahren vom konventionellen Fahren aufgrund seiner Automatikfunktion doch erheblich unterscheidet und somit einer Eingewöhnungsphase bedarf. Es zeigten sich folgende Ergebnisse: Nach 4 Wochen regelmäßigen Umgangs mit den neuen Anzeigen und Stellteilen verschob sich das Urteil aller Versuchspersonen uneingeschränkt zu „mir bestens vertraut“, wobei sich bereits nach 2 Wochen ein stabiler Zustand des Urteils einstellte. Auch hinsichtlich der Übernahmesituationen, wie „Annähern an ein langsameres Fahrzeug“ oder „notwendige Reaktion auf unerwartetes starkes Bremsen des vorausfahrenden Fahrzeugs“ waren die Probanden nach ca. 1–2 Wochen der Meinung, mit dem System vertraut zu sein. Dies zeigte sich objektiv auch an dem durchschnittlichen Minimalabstand in der Übernahmesituation, der sich nach der zweiten Woche nicht mehr signifikant ändert und bei ca. 0,9 s lag. Zudem konnte an den „time to collision“-Werten in der Übernahmesituation gezeigt werden, dass sich durch ACC das Verhalten sowohl von sich selbst eher als „sportlich“ einstufenden Fahrern wie solchen, die sich als „komfortbetont“ bezeichnen, hin zu einem gleichartigen Fahrstil verändert, wobei sich ebenfalls nach ca. 2 Wochen Erfahrung (im Falle der hier eingesetzten Probanden bedeutete das eine Fahrerfahrung von ca. 2600 km) ein stabiler Zustand einstellte. Die Zeitanteile, um z. B. bei Überholvorgängen näher an den Vorausfahrenden aufzurücken, steigerten sich während der Habituationsphase von ca.11 % auf durchschnittlich 16,6 %. Insgesamt beträgt die durchschnittliche Zeitspanne zwischen ACC-Bedienaktivitäten 18 s, wobei eine ACC-Periode durchschnittlich 164 s (2 min 44 s) dauert. Bezogen auf Beobachtungen an Einzelpersonen war die durchschnittlich längste unbeeinflusste Nutzungsspanne bei durchschnittlich ca. 52 s innerhalb einer Nutzungsperiode von 263 s (4 min 24 s), die kürzeste bei 6 s innerhalb einer Nutzungsperiode von 196 s (3 min 16 s). Insgesamt zeigen sich große interindividuelle aber kleine intraindividuelle Unterschiede; d. h. das Nutzungsverhalten wird offensichtlich eher durch Persönlichkeitsvariablen als durch Verkehrssituationen bestimmt. Obwohl bei den beobachteten relativ kurzen unbeeinflussten Nutzungsspannen kaum noch von einem Ermü-

dungseffekt aufgrund von Unterforderung gesprochen werden kann, beurteilten die Probanden den Komfortgewinn durch ACC von Anfang an positiv. Dieses Urteil verbesserte sich sogar noch mit zunehmender Erfahrung mit dem System. Erklärt wird dies mit einer Verschiebung des Aufgabeninhalts durch ACC: der Fahrer wird von den Regelungstätigkeiten auf der Stabilisierungsebene entlastet.

Aufgrund technischer Randbedingungen ergeben sich immer wieder Situationen, in denen der Fahrer die Kontrolle über die Längsdynamik des Fahrzeugs vom ACC zurück übernehmen muss. Dabei sind zwei Klassen zu unterscheiden: einerseits solche, bei denen die Übernahme *immer* notwendig ist (z. B.: Annäherung an ein stehendes Hindernis) und anderseits solche, bei denen der Fahrer nur bei Überschreiten von bestimmten Grenzwerten übernehmen muss (z. B.: starkes Abbremsen des vorausfahrenden Fahrzeugs). Bei ersteren ist die Entscheidung für das Handeln eindeutiger und damit für den Fahrer leichter zu treffen. Subjektiv finden die Probanden, dass solche Entscheidungsvorgänge unbewusst ablaufen, dass sie eher länger abwarten, ob das ACC-System reagiert und dass sie solche Situationen im großen und ganzen als unproblematisch einstufen. Bezüglich dieser Urteile zeigt sich kein Effekt mit zunehmender Erfahrung. Die Verzögerungswerte nach dem Fahrereingriff sind im Allgemeinen schwächer als $-3\,m/s^2$. Dabei wird das ACC-Fahrzeug eigentlich immer stärker verzögert als das vorausfahrende Fahrzeug.

Die Entscheidung zum manuellen Bremseingriff wird beim „Einscheren eines anderen Fahrzeugs" durchschnittlich am schwierigsten eingeschätzt. Kaum unterscheiden sich davon die Einschätzung der Entscheidung bei „starkem Verzögern des vorausfahrenden Fahrzeugs" und die „Annäherung an ein anderes Fahrzeug mit deutlich niedriger Geschwindigkeit". Am einfachsten fällt die Entscheidung beim „Annähern an eine Ampel". Diese Situation wird auch eindeutig als „ungefährlich" eingestuft. während die Situation „starkes Verzögern des vorausfahrenden Fahrzeugs" und „Einscheren eines anderen Fahrzeugs" schon eher die Tendenz zu dem Urteil „gefährlich" zeigt. Zum Zeitpunkt der Übernahme ist der „time-to-collision"-Wert, der als Maß für die vorausschauende Übernahme durch den Fahrer gelten kann, eigentlich immer oberhalb 5 s, kann aber in Grenzfällen auch knapp unter 2 s betragen. Die maximale Verzögerung nach Fahrereingriff ist bei allen Situationen gleich und beträgt ca. $-2{,}8\,m/s^2$. Die stärksten durchschnittlichen Verzögerungswerte zeigen sich bei den Situationen „Anhalten" und „Annähern". Der geringste Abstand bei Übernahmen zeigt sich bei „einscherendem Fahrzeug" mit durchschnittlich 0,5 s; der 5-Perz,-Wert liegt hier sogar bei 0,16 s. Allerdings ist dies aus der dynamischen Situation heraus zu betrachten, d. h. dieser extrem kurze Abstand wird schnell wieder vergrößert.

Bezüglich der Wahl der Wunschgeschwindigkeit steht die zulässige Höchstgeschwindigkeit als Einflussgröße an erster Stelle. Dabei wird das System für Stadtgeschwindigkeiten (60 km/h) nur wenig genutzt (Zeitanteil: 4,6 %). Die am häufigsten genutzte Geschwindigkeit liegt bei 140 km/h (Zeitanteil 13 %), wobei dieser Wert vor allem auf Autobahnstücken mit Geschwindigkeitsbegrenzung auf 120 km/h gewählt wird. Die Wunschgeschwindigkeit wird durchschnittlich alle 1,5 min verändert. Die hier gefundenen Ergebnisse widersprechen eigentlich den Befunden von Buld und Krüger (2002), welche mit steigender Automation Vigilanzprobleme beobachteten. Zwar sank dort auch die subjektive Beanspruchung des Fahrers. doch je weniger Eingriffe notwendig waren, desto unaufmerksamer und müder wurden die Fahrer (vgl. auch Lee und Nam 2007). Buld und Krüger (2003) stellten sogar fest, dass beim Übergang in das Überwachen nur noch auf Hinweisreize reagiert wird, die direkt mit der unterstützten Aufgabe zu tun haben. Dies kann in kritischen Situationen wie z. B. einem zu schnellen Einfahren des vorausfahrenden Fahrzeugs in eine Kurve zu einem Mitzieheffekt führen, was nur durch eine Kombination aus Quer- und Längsunterstützung kompensiert werden könnte. Alkim et al. (2007) kommen sogar zu dem Schluss, dass ACC das Ausführen von Nebentätigkeiten fördert und so zu einer gewissen Ablenkung des Fahrzeuglenkers von der primären Fahraufgabe führt.

Hinsichtlich des Abstandsverhalten lassen sich nach Weinberger (2001) deutlich folgende Verhaltensgruppen separieren: die eine Gruppe (ca. 60 %) der Probanden wählte grundsätzlich den kürzesten Zeitabstand (1 s), die andere den längsten (2 s). Nur ganz wenig Probanden veränderten den

Abstandswert situationsabhängig. Allerdings „übertreten" die Versuchspersonen, die größere Abstände halten, häufiger, da sie offensichtlich situationsbedingt öfters die Notwendigkeit sehen, einen kürzen Abstand zu wählen. Die meisten Probanden gaben dabei an, mit ACC größere Abstande zu halten als ohne. Das Hauptkriterium für die Veränderung der Abstandswahl ist dabei die Wetterbedingung. Die Veränderung des Sollabstandes erfolgt insgesamt deutlich seltener als die Wahl der Wunschgeschwindigkeit. Dabei wird der Abstand am Anfang der Habituationsphase signifikant häufiger (durchschnittlich alle 12,5 min) geändert als am Ende (alle 22,7 min).

Die Kundenakzeptanz von ACC-Systemen hängt erheblich von den gewählten Parametern ab, durch welche das Verhalten des Systems bei geänderten Fahrbedingungen bestimmt wird. Strasser (2012) hat sich mit dieser Problematik auseinandergesetzt und insbesondere herausfinden wollen, ob in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp spezifische unterschiedliche Parametersetzungen notwendig sind. In seinen praktischen Versuchen, welche auf einem abgesperrten Testgelände mit einem vorausfahrenden Zielfahrzeug durchgeführt wurden, hat er speziell folgende Szenarien untersucht:

- *Auffahren auf Kolonne* (Egofahrzeug nähert sich einer langsamer fahrenden Kolonne)
- *Überholvorgang* (Egofahrzeug schert hinter einem langsamer fahrenden Targetfahrzeug aus und überholt dieses)
- *Einscherer* (ein weiteres Targetfahrzeug schiebt sich in den vom ACC-System eingehaltenen Abstand zum ursprünglichen Targetfahrzeug)
- *Ausscherer* (Targetfahrzeug verlässt die Fahrspur des Egofahrzeugs und das Egofahrzeug beschleunigt wieder auf die eingestellte Wunschgeschwindigkeit)

Für jedes der vier Szenarien wurden drei unterschiedliche Ausprägungen des ACC-System definiert, die auf dem Markt verfügbare Auslegungen repräsentieren. Diese Ausprägungen wurden mit den Bezeichnungen „moderat", „vorausschauend" und „dynamisch" gekennzeichnet. Die von ihm verwendeten Kennwerte, welche das Verhalten des ACC-Fahrzeugs beschreiben, werden in Tab. 9.2 zusammenfassend wiedergegeben.

In den Versuchen zeigte sich, dass die subjektiven Aussagen zu den Kategorien „sportlich", „dynamisch", „sicher", „komfortabel" und „Favorit" bei den einzelnen betrachteten Manövern eindeutig technischen Kennwerten zugeordnet werden können. Allerdings hängt diese Zuordnung nicht von der Fahrzeugklasse ab. Das lässt sich damit erklären, dass im Fall der Nutzung des Assistenzsystems der Fahrer quasi in eine Beifahrerrolle schlüpft und von dort das korrekte Verhalten des Assistenzsystems beobachtet. Aus den Versuchsergebnissen lassen sich weiterhin folgende allgemeine Aussagen treffen:

- *Auffahren auf eine Kolonne*: für alle drei Kriterien „sportlich", „Sicherheit" und „Komfort" sollte das System früh aber mit eher schwacher Dynamik reagieren.
- *Überholen*: Das System sollte prompt reagieren und den Überholvorgang mit mäßiger Beschleunigung umsetzen.
- *Einscherer*: Ziel der Abstimmung sollte sein, dass das System eher früh mit moderat starker Dynamik reagiert.
- *Ausscherer*: Der Nutzer will, dass das System auf den Ausscherer schnell reagiert. Wie stark die Verzögerung dann sein soll, hängt offensichtlich stark vom Fahrertyp ab.

Wie bereits angesprochen, leitet sich die *Bedienung* des ACC Systems von der des Tempomaten ab. Infolgedessen kann man prinzipiell zwischen einer Bedienung über einen Lenkstockhebel (meist auf der linken Seite angebracht) oder eine lenkradintegrierten Bedienung unterscheiden. Aus Gründen der räumlichen Kompatibilität sollte sich im Übrigen die ACC-Bedieneinheit auf der Seite befinden, auf der sich auch der Tachometer befindet. Bei den lenkradintegrierten Systemen muss der Fahrer über einen eigenen Taster die grundsätzliche Bereitschaft des Systems, Sollgeschwindigkeits- und Abstandswerte zu übernehmen, einschalten. Dies behindert gegebenenfalls die spontane Nutzung dieses Systems und führt auch manchmal zur Verwirrung, wenn beim Zurücknehmen der ACC-Funktion aus Versehen das ganze System abgeschaltet wird. Die Wiederaufnahme der einmal eingestellten Sollgeschwindigkeit (sog. Resume-Funktion) stellt bei den ACC Systemen im Gegensatz zu den konventionellen Tempomat kein Problem dar, da im Allgemeinen

Tab. 9.2 Mittlere Kennwerte der in den Versuchen von Strasser (2012) durchgeführten Manöver

	Ausprägungen des ACC-Systems	Auffahren auf Kollonne	Überhol-vorgang	Einscherer	Ausscherer
Reaktionszeit	vorausschauend		3,40 s	1,38 s	5,33 s
	moderat		2,79 s	4,18 s	2,34 s
	dynamisch		1,48 s	4,87 s	2,49 s
Reaktionsabstand	vorausschauend	138 m		48 m	
	moderat	112 m		33 m	
	dynamisch	69 m		27 m	
Minimalabstand	vorausschauend	38 m		39 m	
	moderat	28 m		25 m	
	dynamisch	35 m		16 m	
Detektionsabstand	vorausschauend	157 m			
	moderat	124 m			
	dynamisch	80 m			
Maximale Beschleunigung	vorausschauend		0,80 m/s^2		0,92 m/s^2
	moderat		0,91 m/s^2		0,91 m/s^2
	dynamisch		1,59 m/s^2		1,59 m/s^2
Überholzeit	vorausschauend		13,49 s		14,76 s
	moderat		12,07 s		11,56 s
	dynamisch		9,21 s		10,09 s
Maximale Verzögerung	vorausschauend	−1,37 m/s^2		−1,87 m/s^2	
	moderat	−1,23 m/s^2		−1,26 m/s^2	
	dynamisch	−3,00 m/s^2		−1,52 m/s^2	
Minimale Geschwindigkeit	vorausschauend	75,9 km/h			
	moderat	75,9 km/h			
	dynamisch	72,2 km/h			

die Sollgeschwindigkeit durch eine LED Anzeige oder einen zusätzlichen Zeiger im Analogtachometer angezeigt wird. Wichtig in diesem Zusammenhang ist vor allem, dass sich die Resume-Bedienung deutlich von anderen Bedienvorgängen unterscheidet (näheres hierzu siehe ▶ Abschn. 6.2.2). Bei der Voreinstellung der Sollgeschwindigkeit gibt es zumindest für die Gestaltung des Lenkstockhebels keine klare Empfehlung hinsichtlich einer kompatiblen Auslegung. Sieht nämlich der Fahrer dabei wesentlich die Beeinflussung des Zeigers auf dem Analoginstrument, so entspricht einer Bewegung des Lenkstockhebels nach oben die dazu kompatible Erhöhung der Geschwindigkeit. Nutzt er aber bei der Bedienung als inneres Modell die Beeinflussung des Fahrzeugs, so empfiehlt sich eine Bewegung des Hebels nach vorne (= Beschleunigung) für die Geschwindigkeitserhöhung. Diese Problematik würde sich übrigens erübrigen, wenn die Geschwindigkeit generell digital angezeigt werden würde. Bei der Bedienung über Tasten am Lenkrad ergeben sich keine Kompatibilitätsprobleme, wenn die Erhöhung der

Geschwindigkeit durch eine oben angebrachte Taste und die Reduzierung durch eine unten angebrachte Taste realisiert ist. Für die ACC-Bedienung hat es sich als günstig herausgestellt, die Veränderung der Sollgeschwindigkeit normalerweise in 10 km/h-Schritten vorzusehen (bei manchen Systemen kann durch kurzes Antippen bzw. schwaches Antippen eine Feinjustierung in 1 km/h- oder 5 km/-Schritten erfolgen). Grundsätzlich ergeben sich ähnliche Kompatibilitätsprobleme bei der Einstellung der Zeitlücken, welche häufig durch einen vertikal oder horizontal angebrachten Wipphebel realisiert wird: bedeutet eine Bewegung nach oben einen größeren Abstand (Innere Kompatibilität) oder ein näheres Heranrücken an das vorausfahrende Fahrzeug (= Verkürzung des Abstands; äußere Kompatibilität)? Durch eine entsprechende Symbolik in der Anzeige kann diese Problematik zum großen Teil entschärft werden (siehe auch ◘ Abb. 9.3, links oben und unten). Bei einem vertikal angebrachten Wipphebel für die Abstandseinstellungen empfiehlt sich eine Unterstützung des Verständnisses durch eine Symbolik, wie sie in ◘ Abb. 9.3 unten rechts dargestellt ist.

Mit den technischen Voraussetzungen eines ACC-Systems wurde der ***Notbremsassistent*** entwickelt. Die Information, die mithilfe von Radarsensoren den Abstand und die Differenzgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug erfasst, wird dafür genutzt, das Fahrzeug für eine bevorstehende Notbremsung durch die Vorbefüllung des Bremssystems und ein Anlegen der Bremsscheiben vorzukonditionieren. Im Gegensatz zu dem auf der Stabilisierungsebene arbeitenden Bremsassistenten, der diese Vorkonditionierung nur aufgrund von Reaktionen des Fahrers vornimmt, wird hier die Erfassung des Vorfelds vor dem Fahrzeug mit einbezogen. Dadurch ist es auch möglich, den Fahrer vor der bevorstehenden Gefahr zu warnen. Diese Warnung erfolgt auch dann, wenn das ACC-System nicht genutzt wird. Zudem wird dadurch nochmals eine weitere Verkürzung der Bremsansprechzeit ermöglicht (zurzeit auf dem Markt erhältlich als „BAS plus“ von Mercedes; „Forward Alert“ von Ford). Indem innerhalb der physikalischen Grenzen gerade so viel Bremskraft erzeugt wird, dass ein rechtzeitiges und sicheres Anhalten sichergestellt ist (sog. Target Breaking), könnten gemäß Abschätzungen von Schittenhelm (2009) nach Auffahrunfällen ca. 24 % der Folgeunfälle vermieden oder in ihren Auswirkungen bzw. der Unfallschwere zumindest reduziert werden. Eine Weiterentwicklung dieses Notbremsassistenten stellt das ***autonom eingreifende Brems-System (AEBS)*** dar. Es handelt sich dabei um ein mehrstufiges System. Ebenfalls auf der Grundlage der Erfassung des Umfeldes mittels Radarsensoren oder eines Kamerasystems wird zunächst bei Unterschreiten eines Sollabstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug eine Teilbremsung bei reduzierter Bremskraft mit einer konstanten aber gegenüber einer Vollbremsung deutlich reduzierten Verzögerung durchgeführt. Bei Unterschreiten eines geschwindigkeitsabhängigen definierten Sollabstandes wird der Fahrer zunächst akustisch, optisch ggf. haptisch (z. B. aktives Gaspedal) gewarnt (diese Funktion ist eigentlich ähnlich der ACC-Funktion, erfolgt allerdings bei deutlich kürzeren Abständen). Wenn nach der Warnung kein Bremseingriff erfolgt, so wird eine Bremsung mit einer geringen Verzögerung ausgelöst. Erst wenn eine Kollision nicht mehr vermeidbar ist, wird eine Notbremsung mit maximaler Verzögerung induziert (realisiert als Pre-Safe von Mercedes, Daimler 2006, 2011; als „Active City Stop“ von Ford oder Volvo City Safety System; die Systeme von Ford und Volvo arbeiten nur bis zu einer Geschwindigkeit von 30 km/h – neuerdings bei Ford sogar bis 50 km/h –, wobei bis 15 km/h Auffahrunfällen vollständig vermieden werden). Bei den von LEXUS angebotenen autonomen Bremsassistenten ist das System noch mit einem Fahrerüberwachungssystem (Driver Monitoring System) verbunden. Über eine Kamera wird die Blickrichtung des Fahrers erfasst. Ist beim Annähern an ein Hindernis der Blick des Fahrers von der Straße abgewendet, erfolgt neben optischen und akustischen Warnhinweisen ein zusätzlicher Bremsruck, um die Aufmerksamkeit des Fahrers auf die kritische Situation zu lenken (Lexus 2010). Wie Maier (2014) darlegt, stellt bei der Umsetzung des autonomen Notbremsassistenten die Strategie zur Auslösung einer Vollbremsung ein kritisches Thema dar. Um nämlich Fehlauslösungen zu vermeiden, wird die Vollbremsung erst dann ausgelöst, wenn der Unfall unvermeidlich ist (siehe auch die Auslegungen von Ford und Volvo). Begründet wird dies einerseits durch haftungsrechtlich relevante Fragen (z. B. ein

durch eine Fehlauslösung verursachte Auffahrunfall im nachfolgenden Verkehr) und andererseits mit möglichen Akzeptanzprobleme des Systems durch den Kunden bei Fehlauslösungen (Gründl 2005). Fahrdynamisch wäre hingegen bei einem plötzlich auftretenden Hindernis eine möglichst frühe Vollbremsung notwendig.

Wie Winner et al. (2012) darlegen, kommen die teuren Radar- und mit Einschränkung Lasersysteme eher für den höheren Geschwindigkeitsbereich infrage, während die preisgünstigeren Kamerasysteme eher den niedrigen Geschwindigkeitsbereich abdecken und somit auch in den unteren Fahrzeugklassen Einzug halten können. Sie erwarten, dass mit der fortschreitenden technischen Entwicklung diese beiden Systemarten zusammenwachsen werden und damit in Zukunft in allen Fahrzeugklassen das gesamte Geschwindigkeitsspektrum bezüglich der Längsdynamik durch Fahrerassistenzsysteme unterstützt werden kann.

Querdynamik

Wie bereits in ▶ Abschn. 2.5 ausgeführt (siehe ◘ Abb. 2.25) ereignen sich in Deutschland ungefähr ein Viertel aller Unfälle mit Personenschaden beim Spurwechsel oder einem unbeabsichtigten Verlassen der Fahrbahn (Weißmann 2009). Assistenzsysteme, die fehlerhaftes Fahrerverhalten in Bezug auf die Querdynamik auffangen, können also einen wesentlichen Beitrag zur Reduktion von Unfällen leisten. In ISO 17361 (2007) ist definiert: „Spurhalte-Assistenzsysteme sind Fahrerassistenzsysteme, die verhindern sollen, dass ein Fahrzeug unbeabsichtigt vom Fahrstreifen abkommt". Technische Voraussetzung für Spurhalte-Assistenzsysteme ist, dass auf eine geeignete Art und Weise die Fahrbahn vor dem Fahrzeug erkannt wird. Das einfachste System wurde von Citroën 2005 vorgestellt. Hier wird das von den Fahrbahnrandstreifen reflektierte Licht, welche durch einen Infrarot-Laserbeamer beleuchtet werden, mittels Sensoren an den vorderen und hinteren Stoßfängern detektiert. Beim Überfahren eines Randstreifens wird dies dem Fahrer mittels ortskompatibler Vibration am Sitz angezeigt. Das System erkennt allerdings Markierungen erst kurz vor dem Überfahren und ist auch gegen Mehrdeutigkeiten, wie sie beispielsweise bei Baustellenmarkierungen auftreten, nicht gefeit (Walter et al. 2012).

Die meisten auf dem Markt befindlichen Systeme verwenden demgegenüber eine elektronische Frontkamera. Mittels Bildverarbeitung werden aus dem aufgenommenen Bild die Fahrstreifen und die Position des eigenen Fahrzeugs zwischen diesen extrahiert. Wie Walter et al. (2012) beschreiben, erfolgt dies durch einen mehrstufigen Prozess. Wegen der stark schwankenden Lichtverhältnisse in Abhängigkeit von Tageszeit und Witterung sowie vielen weiteren Bedingungen ist die Erkennungsrate selbst bei guter Fahrbahnmarkierungen niemals hundertprozentig. Ohne saubere Fahrbahnmarkierungen funktioniert keines der Systeme. Auch sind die Anforderungen an das technische System in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Markierungssystemen, die in den verschiedenen Ländern benutzt werden, sehr hoch. Die Kenntnis der Fahrstreifen und der eigenen Position zwischen diesen ermöglicht es, in einem Bereich von etwa bis zu 30 m vor dem Fahrzeug die so genannte Time-to-Line-Crossing (TLC; siehe auch Gl. 2.21 und ◘ Abb. 2.21) zu berechnen und daraus Maßnahmen zur Unterstützung des Fahrers abzuleiten.

Man unterscheidet dafür folgende Varianten:

- ***Spurverlassenswarner (Lane Departure Warning, LDW):*** Es sind hier zwei Systeme zu unterscheiden: Bei dem sog. *DLC-System* (Distance to Line Crossing) wird nur der Abstand des Rades zum Fahrstreifen ohne Prädiktion in die Zukunft für die Warnung herangezogen (das oben beschriebene System von Citroën gehört in diese Kategorie). Bei dem *TLC-System* (Time to Line Crossing) wird der TLC-Wert genutzt, um die Zeit bis zum Überfahren der Markierung zu berechnen. Bei Unterschreiten einer vordefinierten zeitlichen Schwelle wird der Fahrer gewarnt. Das TLC-System ermöglicht es dem Fahrer, bereits früher zu reagieren, erhöht jedoch die Anforderungen an die Fahrstreifenerkennung (Walter et al. 2012). Die Warnung selbst erfolgt bei beiden Systemen optisch, akustisch oder haptisch. Die Untersuchungen von Gayko (2009) weisen aus, dass die haptische Warnung über das Lenkrad (meist Vibration ggf. auch vibrierender Sitz) optischen oder akustischen Warnungen vorzuziehen ist, da der Fahrer die Information unmittelbar der Gefahrensitu-

ation zuordnet und somit intuitiv reagieren kann. Als ein weiterer Vorteil der haptischen Warnung ist anzuführen, dass diese nur vom Fahrer und von keinem der übrigen Passagiere wahrgenommen werden kann.
Es gibt viele Situationen, in denen die Warnung durch das LDW für den Fahrer unangebracht und damit lästig erscheint (z. B. Kurvenschneiden oder Überholen, ohne den Fahrtrichtungsanzeiger zu nutzen). Aus diesem Grund werden verschiedene Anstrengungen unternommen, ein sog. ***Advanced Lane Departure Warning-System (ALDW)*** zu entwickeln. Ziel ist es dabei, unnötige Warnungen zu unterdrücken. So wird beispielsweise versucht, durch Auswertung des Navigationssystems, der Fahrzeugbeschleunigung, des Lenkradwinkels und der Gaspedalstellung solche Situationen zu erkennen. Warnungen auf engen Straßen können durch eine Verschiebung des Warnzeitpunktes unterdrückt oder verzögert werden. Es gibt allerdings auch Situationen, in denen eine etwas frühere Warnung sinnvoll ist. So ist es beispielsweise vorteilhaft, ein Annähern an den Kurvenaußenrand früher zu warnen als auf der Kurveninnenseite, weil dort, man vom Gegenverkehr absieht, mehr Raum zur Verfügung steht. Die Auswertung der Betätigung ablenkender Bedienelemente (Radio, Spiegelverstellung, Navigationsgerät usw.) können genutzt werden, um eine Warnung früher auszugeben (näheres hierzu siehe Walter et al. 2012). Aufgrund eines Berichts des holländischen Verkehrsministeriums von 2007 merken Walter et al. (2012) zudem an, dass LDW-Systeme von den Fahrern, die über solche Systeme verfügen, zwar sehr häufig eingeschaltet sind, ihnen aber eine geringere Wirksamkeit zugeschrieben wird als beispielsweise dem ACC-System. Demgegenüber wird erwartet, dass Lane Keeping Support-Systemen, die einen aktiven Lenkeingriff bewerkstelligen, ein höherer Nutzen zugeschrieben wird.

- ***Spurhaltesystem (Lane Keeping Support-System, LKS):*** Es handelt sich hierbei um eine Erweiterung des LDW, da es auf das gleiche technische Messsystem zurückgreift mit dem Unterschied, dass es, falls festgestellt wird, dass das Fahrzeug den Fahrstreifen verlässt, nicht nur eine optische und akustische Warnung abgibt, sondern durch einen gezielten Lenkeingriff das Fahrzeug auf den vorgesehenen Kurs zurückbringt. Der Lenkeingriff kann dabei durch einen in das Lenksystem integrierten Drehmomentmotor (im Allgemeinen nur mit einer elektrischen Servolenkung möglich) oder durch Nutzung der Überlagerungslenkung erfolgen. Das System ist so ausgelegt, dass dieser Lenkeffekt nur wirksam wird, wenn der Fahrer selbst mitlenkt, so dass die Verantwortung nach wie vor beim ihm liegt[11] (Ishida et al. 2003, schlagen beispielsweise vor, dass 80 % des berechneten Lenkmoments zur Unterstützung des Fahrers beitragen solle, der Rest aber vom Fahrer selbst aufzubringen sei). Ein autonomes Fahren ist mit diesem System nicht möglich. ◘ Abbildung 9.4 veranschaulicht die Charakteristik eines Spurhalte-Assistenzsystems anhand des Hilfsmoments in Abhängigkeit von der Querablage von der Fahrstreifenmitte bei angenommener Geradeausfahrt. Der in ◘ Abb. 9.4a dargestellte Verlauf charakterisiert eine Unterstützung nur unter dem Aspekt der Sicherheit: erst, wenn der Fahrer die Fahrbahnbegrenzung zu überfahren droht, wird ihm ein entsprechendes Rückstelldrehmoment am Lenkrad vermittelt. ◘ Abbildung 9.4b illustriert eine enge Führung, da hier bereits geringe Abweichungen des Fahrzeugs von der Fahrstreifenmitte zu einem wahrnehmbaren korrigierenden Moment führen. Nach aller Erfahrung wird eine derartige Auslegung von vielen Fahrern abgelehnt (z. B. Penka 2001). Der in ◘ Abb. 9.4c dargestellte Verlauf charakterisiert eine sanfte Unterstützung bei geringen Abweichungen von der Mitte des Fahrstreifens, welche nur zu geringen Diskomfortempfindungen führen. Erst bei der Annäherung an den Rand des Fahr-

11 Bei dem Audi Active Lane Assist funktioniert das Spurhaltesystem sogar, wenn der Fahrer kurze Zeit die Hände vom Lenkrad nimmt. Wenn er dies für längere Zeit tut, wird er mit einem Gong gewarnt und das System kurz darauf deaktiviert.

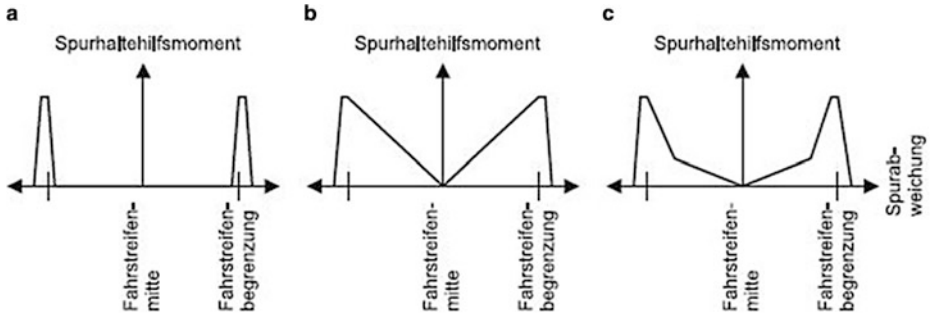


Abb. 9.4 schematische Darstellung der möglichen Verläufe des Hilfsmoments in Abhängigkeit von der Querablage bei einem LKS System (Gayko 2012)

streifens erfolgt ein deutlich wahrnehmbarer Eingriff.

Es ist allerdings fraglich, ob das LDW, das ja vor dem möglichen Verlassen den Fahrer unterstützt, bei dem gefürchteten Sekundenschlaf wirklich wirkungsvoll sein kann. Wie Gründl (2005) berichtet, entsteht dieser Unfalltyp oft erst *nachdem* der Fahrer von alleine oder durch das Reifengeräusch beim Verlassen der Fahrbahn aufwacht und dann vor Schreck das Lenkrad verreißt. In solchen Fällen wäre ein System sinnvoll, welches das Fahrzeug selbstständig im Fahrstreifen hält (Walter et al. 2012).

Diesen Effekt liefert eine zukünftige Erweiterung des LKS, die sog. ***Lane Departure Prevention (LDP).*** Wie beim LDW (bzw. ALDW) wird der Fahrer zuerst vor dem drohenden Verlassen des Fahrstreifens gewarnt. Falls daraufhin keine Fahreraktivität feststellbar ist, wird das Fahrzeug durch einseitigen Bremseingriff mittels des ESP-Systems aktiv auf den Fahrstreifen zurück gezwungen. Durch diesen Eingriff, der im Bereich von max. 200 ms liegt, wird zugleich die Geschwindigkeit reduziert. Um Fehlauslösungen weitgehend zu unterbinden, erfolgt der Eingriff ähnlich wie beim ALDW-System nur, wenn keine Fahreraktivität festgestellt wird. Falls diese erkennbar ist, wird der Eingriff sofort unterbunden. Wie Walter et al. (2012) ausführen, stellt diese LKS-Erweiterung noch erhebliche Anforderungen an die Entwicklung von adäquaten Algorithmen sowie an die Fusion von Objekterkennungen.

Das Einsatzgebiet sowohl des heute verfügbaren LKS-Systems als auch des soeben beschriebenen LDP-Systems sind autobahnähnliche Straßen mit gut sichtbaren Fahrstreifenmarkierungen und geraden Abschnitten bzw. lang gezogenen Kurven. In jedem Fall muss das LKS-System vom Fahrer aktiviert werden. Dies geschieht heute zum Teil an einer im Armaturenbrett angebrachten Assistenzaktiviereinheit (siehe Abb. 9.5), zum Teil aber auch durch ein entsprechendes Bedienelement am Lenkrad oder an einem Lenkstockhebel.

Die Rückmeldung über den Betriebszustand wird relativ einheitlich durch eine bildhafte Anzeige gegeben (Abb. 9.6). Erscheint die angedeutete Straßenbegrenzung alleine, so bedeutet dies, dass das LKS System eingeschaltet ist. Die Pfeile an den Linien symbolisieren, dass es nun, bedingt durch die äußere Konstellation (s. o.), aktiv ist. In Fahrzeugen, die nur mit einem LDW-System ausgerüstet sind, erfolgt die Rückmeldung auf ähnliche Weise.

Tabelle 9.3 gibt eine Zusammenstellung der Wertebereiche, in dem die heute verfügbaren LKS-Systeme Unterstützung zur Verfügung stellen können. Kombiniert man diese Werte mit den eingangs erwähnten Einschränkungen, die sich aufgrund der großen technischen Anforderungen an Kamera und Bildverarbeitung ergeben, so wird offensichtlich, dass ein LDW- oder ein LKS-System nur unter sehr eingeschränkten Bedingungen wirksam sein kann und dass zugleich sehr häufig damit zu rechnen ist, dass das System auch im Betrieb temporär nicht zur Verfügung steht. Aus ergonomischer Sicht ist deshalb eine wirkungsvolle Rückmeldung, die unmittelbar der Fahraufgabe zugeordnet werden kann, unabdingbar. Es empfiehlt sich, die entsprechenden Anzeigen im HUD darzustellen, wie es Hersteller machen, die ein HUD im Angebot haben.

Abb. 9.5 Beispiele für Assistenzsystembedieneinheiten (**a** Mercedes S-Klasse, **b** BMW 7er, **c** Volkswagen Golf)

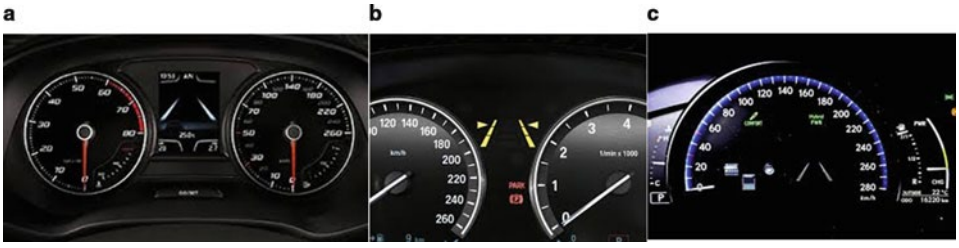


Abb. 9.6 Rückmeldung über den aktivierten LDW bzw. LK S-System (**a** Volkswagen, **b** BMW, **c** Mercedes)

Tab. 9.3 Wertebereiche einiger Kenngrößen verfügbarer LKS-Systeme (nach Gayko 2012)

Kenngröße	Typische Werte
Untere Grenzgeschwindigkeit	65–70 km/h
Obere Grenzgeschwindigkeit	170–180 km/h
Maximales korrigierendes Lenkmoment	2–3 Nm
Unterstützte Spurweite/-breite	3–4 m
Minimaler Kurvenradius	230 m
Maximale Querbeschleunigung	2 m/s²

Nach Bartels et al. (2012) kommen mehr als 5 % der Unfälle mit Personenschäden durch unkorrekten Fahrstreifenwechsel zu Stande. Das Problem ist dabei vielschichtig: Selbst mit gewölbten Rückspiegeln lassen sich sog. tote Winkel (Bereiche, in denen ein seitlich befindliches Fahrzeug durch Blick in den Spiegel nicht erkannt werden kann) nicht vollständig vermeiden. Gerade durch gewölbte Spiegel werden aber das Abschätzen von Entfernungen und insbesondere die Wahrnehmung der Annäherungsgeschwindigkeit von Fahrzeugen auf der zu wechselnden Spur sehr erschwert. In vielen Fällen ist der Fahrer aber auch unaufmerksam und wechselt die Spur, ohne sich besonders gegen den rückwärtigen Verkehr abzusichern. Durch ***Fahrstreifenwechselassistenzsysteme (Lane Change Decision Aid Systems)*** sollen diese Gefahren aufgefangen werden. Technisch basiert der Fahrstreifenwechsel Assistent entweder auf einem Kamerasystem (meist Kameras, die im linken und rechten Rückspiegel untergebracht sind) oder auf einem Radarsystem. Vorteil der radarbasierten Systeme ist die zusätzliche Möglichkeit, die Differenzgeschwindigkeit zum sich annähernden Fahrzeug zu ermitteln. In der ISO-Norm 17387 wird deshalb eine Klassifikation der Warnstrategien in Abhängigkeit von der Zonenabdeckung gegeben (Tab. 9.4)

Während Warnungssysteme des Typs I nur über Fahrzeuge im toten Winkel informieren, reagieren solche des Typs II nur auf sich annähernde Fahrzeuge, geben also keine Information über Fahrzeuge im toten Winkel. Nur Warnsysteme des Typs III decken das volle Spektrum ab. Bedingt durch die maximale Reichweite der Sensoren werden auch die Systeme des Typs II und III noch einmal unterteilt hinsichtlich der maximalen Differenzgeschwindigkeit zum sich von hinten annähernden Fahrzeug und vom Kurvenradius, der nicht unterschritten werden darf, damit das sich nähernde Fahrzeug überhaupt erkannt werden kann (siehe Tab. 9.5).

Aufgrund der genannten vielfältigen Einschränkungen sind für die Nutzung eines Spurwechsel-

Tab. 9.4 Klassifikation der Zonenabdeckung von Fahrstreifenwechselassistenten (nach ISO 17387)

Typ	Überwachung des toten Winkels links und rechts	Überwachung der Annäherungszone links und rechts	Information für den Fahrer
I	x		Warnung vor Fahrzeugen im toten Winkel
II		x	Warnung vor Fahrzeugen, die sich von hinten nähern
III	x	x	Warnung vor gefährlichem Fahrstreifenwechsel

Tab. 9.5 Maximale Differenzgeschwindigkeit des sich von hinten annähernden Fahrzeugs und minimaler Kurvenradius, der für ein Erkennen nicht unterschritten sein darf (nach ISO 17387)

Typ	Maximale Differenzgeschwindigkeit bezüglich des sich von hinten annähernden Fahrzeuges	Minimaler Kurvenradius
A	10 m/s bzw. 36 km/h	125 m
B	15 m/s bzw. 54 km/h	250 m
C	20 m/s bzw. 72 km/h	500 m

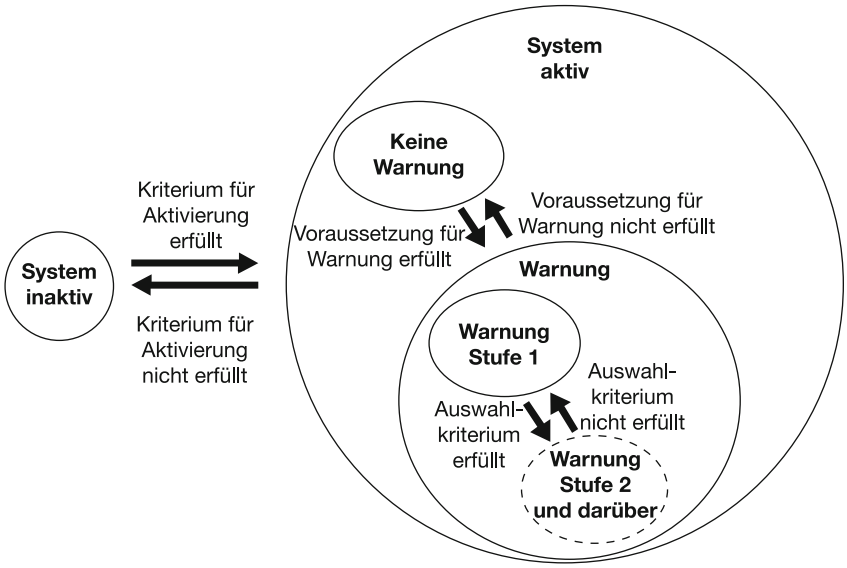


Abb. 9.7 Systemzustandsdiagramm für einen Fahrstreifenwechsel Assistenten nach ISO 17 387, zitiert aus Bartels et al. (2012)

assistenten grundsätzlich verschiedene Systemzustände voneinander zu unterscheiden. Diese werden in ISO 17 387 in einem Systemzustandsdiagramm veranschaulicht (Abb. 9.7). In den meisten Fällen muss das System ähnlich wie bei den zuvor beschriebenen Assistenzsystemen überhaupt erst einmal grundsätzlich „scharf" geschaltet werden. Ist das der Fall, so befindet sich das System in dem Zustand „inaktiv". Erst wenn ein bestimmtes Kriterium erfüllt ist (z. B., wenn das Egofahrzeug eine bestimmte Grenzgeschwindigkeit – meist 30 km/h – überschritten hat) wird das System in den Zustand „aktiv" geschaltet. Aus ergonomischer Sicht sollte dieser Zustand beispielsweise optisch in der Instrumententafel (z. B. in Form einer bildhaften Anzeige) angezeigt werden. Erst wenn bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind (je nach verwendeter Technik z. B. Detektion eines im toten Winkel befindlichen Fahrzeuges oder eines sich

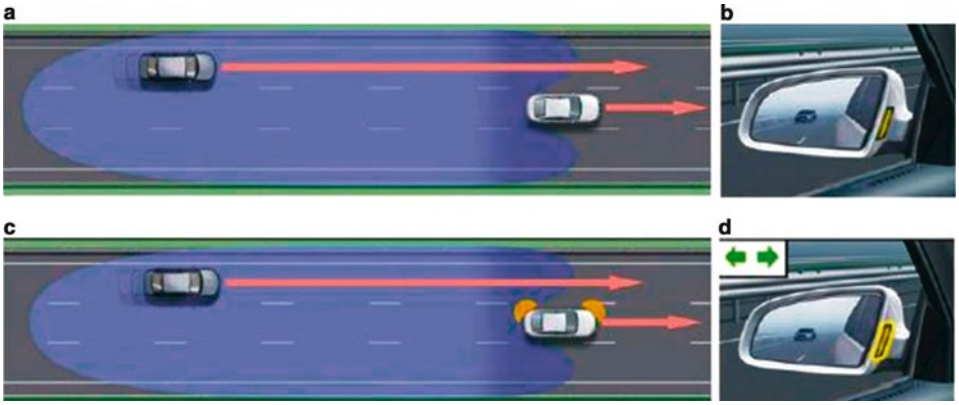


Abb. 9.8 Audi Side Assist: Im hier gezeigten Beispiel befindet sich ein überholendes Fahrzeug im Erfassungsbereich. **a**, **b** Warnung Stufe 1: durch schwaches Aufleuchten einer gelben Lampe im Fuß des linken Außenspiegels wird der Fahrer auf die Existenz des Fahrzeugs in der Überholspur hingewiesen, **c**, **d** Warnung Stufe 2: wenn der Fahrer den Blinker setzt bzw. durch ein Moment am Lenkrad erkennen lässt, dass er einen Spurwechseln vorhat, wird er durch kurzzeitiges helles Blinken der Lampe im Fuß des Rückspiegels auf die Gefahr hingewiesen.

von hinten nähernden Fahrzeuges auf der Spur links oder rechts vom Egofahrzeug) erfolgt eine dezente Warnung der Stufe 1 (meist in Form einer schwächeren Leuchte im oder am Fuß des linken bzw. rechten Außenspiegel). Erst wenn von dem System erkannt wird, dass der Fahrer unter dieser Bedingung einen Spurwechsel initiieren möchte (z. B. erkannt durch die Betätigung des Blinkerhebels, Auswertung von Lenkwinkel/-moment, Position des eigenen Fahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens u. ä.) erfolgt eine Warnung auf Stufe 2 (z. B.: blinkende Leuchte an dem entsprechenden Außenspiegel und ggf. zusätzlicher Warnton). Wenn der Fahrer unter diesen Bedingungen dennoch einen Spurwechsel initiiert, wäre es aus ergonomischer und sicherheitstechnischen Sicht sinnvoll, durch ein Moment am Lenkrad den Fahrer vor diesem Schritt zu warnen bzw. ihn daran zu hindern. Wegen des eingeschränkten Detektionsfeldes, das den gegenwärtigen Spurwechselassistenten aus technischen Gründen anhaftet, erfolgt dieser Schritt allerdings bislang nicht.

Abbildung 9.8 zeigt am Beispiel des „Audi Side Assist" bzw. „Side Assist" von VW eine Realisierung des in ISO 17 387 beschriebenen Warnsystems (nach Bartels et al. 2012). Wegen der vielen die Wirksamkeit des Systems einschränkenden Grenzen wird in den Betriebsanleitungen der Fahrzeughersteller speziell auf diesen Punkt hingewiesen. Insbesondere wird dort zum Ausdruck gebracht, dass es sich nur um ein Hilfsmittel handelt, das möglicherweise nicht alle Fahrzeuge erkennt und die Aufmerksamkeit des Fahrers nicht ersetzen kann. Zudem können bei verschmutzten Sensoren oder widrigen Witterungsbedingungen (z. B. Regen, Schnee oder starke Gischt) Fahrzeuge unzureichend oder nicht erkannt werden. Auch kann es zu ausbleibenden oder Fehlwarnungen kommen, wenn sich das Egofahrzeug bei einem besonders breiten Fahrstreifen am äußeren Rand oder bei engen Fahrstreifen am inneren Rand des Fahrstreifens befindet. Selbst Systeme, welche die Geschwindigkeit der annähernden Fahrzeuge zu detektieren vermögen (Typ II und III), können bei extremen Annäherungsgeschwindigkeit versagen (zusammenfassend zitiert aus Bartels et al. 2012).

Kombinierte Systeme

Systeme die sowohl die Beherrschung von Längs- wie Querdynamik assistieren, können natürlich durch den Fahrer selbst allein dadurch schon realisiert werden, dass die oben genannten Systeme ACC und Spurhalteunterstützung zugleich in Betrieb gehalten werden. Wegen der vielen und unterschiedlichen Einschränkungen, denen beide Systeme unterworfen sind, bleibt der entsprechende Einsatz allerdings praktisch auf nicht zu stark befahrene Autobahnstrecken beschränkt.

Für den niedrigen Geschwindigkeitsbereich (< 60 km/h) wurden inzwischen die Systeme zu dem teilautomatischen (gemäß BASt-Definition) ***Stauassistent*** bzw. ***ACC Stop & Go*** integriert. In dem Fall

Abb. 9.9 Hinweis auf Parkplatzsuche für den rückwärtigen Verkehr (Doisl 2008)

erfolgt Bremsen, Gasgeben und Lenken vollkommen selbstständig. Wenn der Fahrer nicht eingreift (also beispielsweise nicht die Bremse betätigt), fährt das Fahrzeug automatisch wieder an, wenn das vorausfahrende Fahrzeug nach kurzer Zeit wieder Fahrt aufnimmt. Löst sich der Stau wieder auf (erkennbar an Geschwindigkeiten >60 km/h) wird der Fahrer durch ein – im Allgemeinen – akustisches Signal aufgefordert, die Fahrzeugführung wieder selbst zu übernehmen. Da sich der Fahrer während der Phase der ACC Stop & Go-Aktivität von der Fahraufgabe abwenden kann, wird er nach einer bestimmten Standzeit (meist etwa 3 Sekunden) aufgefordert, einen sog. Anfahrttrigger zu betätigen, damit das Fahrzeug wieder selbstständig anfährt (Winner et al. 2012). Dazu muss entweder das Gaspedal kurz angedrückt werden oder bei BMW die ACC-Bedienungstaste gedrückt bzw. bei Mercedes der Tempomathebel gezogen werden. Es ist allerdings anzumerken, dass durch eine solche Maßnahme die von den Kunden gewünschte Möglichkeit, Nerven tötende Staufahrten für andere Tätigkeiten zu nutzen, zum Teil konterkariert wird, da der Fahrer sich nicht vollständig von der Fahraufgabe abwenden kann.

Eine weitere Integration der vorhandenen Sensoren – teilweise mit verbesserter Reichweite – ermöglicht der ***Ausweichassistent***. Bei einem drohenden Auffahrunfall (über die Radarsensoren des ACC-Systems festgestellte Näherung an ein stehendes Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit, die auch bei Maximalbremsung keinen Stillstand hinter diesen Fahrzeug mehr ermöglicht) prüft das System selbstständig den verfügbaren Platz auf der linken oder rechten Fahrspur und lenkt das Fahrzeug automatisch auf die freie Spur (Bosch-Studie zu Fahrerassistenzsystemen 2012). Allerdings ist in zukünftiger Forschung noch die Beherrschbarkeit eines solchen Systems zu überprüfen, denn zur Realisierung dieser Funktion sind relativ hohe Lenkmomente notwendig, die im Fall einer Falschauslösung vom Fahrer kaum zu kontern sind und folglich schwer wiegende Konsequenzen haben können (zum Beispiel Gegenverkehr).

Eine besondere Fahrsituation, die sich von den bisher beschriebenen in vielerlei Hinsicht unterscheidet, die aber notwendigerweise in irgendeiner Form mit jedem Fahrvorgang verbunden ist, ist das Abstellen des Fahrzeugs nach Beendigung der Fahrt. Alles, was damit im Zusammenhang steht, wird durch den Ausdruck ***Stillstandsmanagement*** beschrieben. Doisl (2008) definiert Parken als „… Teil der primären Fahraufgabe, bei dem die Auswahl des Parkstandes, das Einparken und sichere Abstellen, sowie umgekehrt das Ausparken, bis hin zum wieder Eingliedern in den fließenden Verkehr, im Vordergrund steht." Auch die Parkplatzsuche kann wie das normale Fahrmanöver durch die drei Ebenen der primären Fahraufgabe „Navigation" (Suche eines geeigneten Parkplatzes), „Führung" (Festlegung des exakten Kurses in die Parklücke) und „Stabilisierung" (Realisierung des festgelegten Kurses) beschrieben werden. Ein Parksituationskatalog unterscheidet dabei wesentlich zwischen Längs-, Senkrecht- und Schrägparken.

Sowohl die systemergonomische Analyse wie auch die Realversuche zeigen, dass bei der Parkplatzsuche ein wesentliches Problem die Kommunikation mit dem rückwärtigen Verkehr ist. Doisl (2008) verwendete in seinen Versuchen ein Schild, das sich bei Parkplatzsuche mechanisch hochklappen ließ und im Rückfenster sichtbar den nachfolgenden Verkehr auf das bevorstehende Manöver aufmerksam machte (Abb. 9.9). Während ohne diese Warnung bei den Versuchen im Schnitt 46 % der Parkmanöver als gefährlich einzustufen waren, ist dieser Prozentsatz mit dem Hinweisassistenten um die Hälfte auf 23 % zurückgegangen und dies, obwohl das Symbol absolut neu war und nachfol-

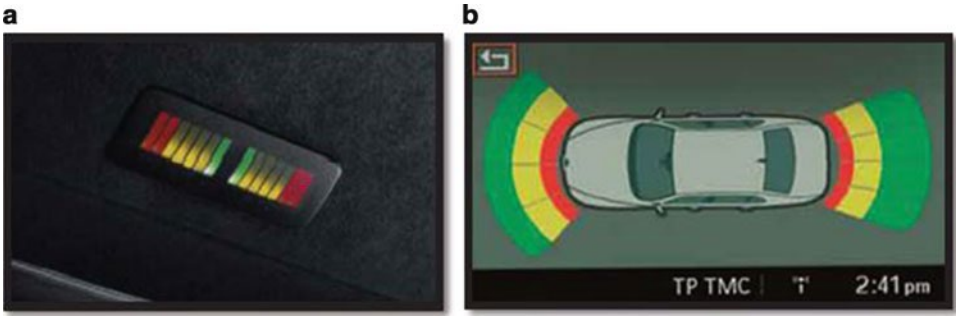


Abb. 9.10 Optische Anzeige von Abstandsinformationssystemen (Park-Distance-Control, PDC)

Abb. 9.11 Rundumsichtkamerabild (RUS) mit Parkdistanzanzeige (PDC) kombiniert (Doisl 2008)

genden Fahrern unbekannt sein musste. Zudem wurde mit diesem Assistenten 20 % häufiger ein für das Parken komfortabler Abstand durch den nachfolgenden Verkehr eingehalten. Im Gegensatz zu der nicht assistierten Parkplatzsuche wurde mit dem Assistenten der Vorgang genauso erlebt wie die als mäßig einzustufende Beanspruchung durch Autobahnfahrt und normale Stadtfahrt.

Durch ***Einparkassistenzsysteme*** soll der Fahrer dabei unterstützt werden, einen passenden Parkplatz zu finden und das Fahrzeug sicher und stringent in diesen hineinzuführen (Kesler und Mangin 2007). Katzwinkel et al. (2012) beschreiben die verschiedenen Einparkassistenzsysteme. Auf diese Übersicht wird im Folgenden Bezug genommen. Danach kann man für das Einparken folgende Formen von Assistenzsystemen unterscheiden:

- ***Informierende Einparkassistenzsysteme.*** Es handelt sich hier um die am weitesten verbreiteten Systeme, welche im allgemeinen auf der Grundlage von Ultraschallsensoren arbeiten, die in der Fahrzeugfront und im Heckbereich montiert sind. Der gemessene Abstand wird bei den einfacheren Systemen akustisch codiert dem Fahrer vermittelt, wobei ggf. die Stereoeigenschaften des Autoradios genutzt werden können, um eine räumlich kompatible Informationen vermitteln. In weiter fortgeschrittenen Systemen wird die Information in einer bildhaften Anzeige dargestellt (siehe hierzu ▶ Abschn. 6.2.1, Abb. 6.15a und 9.10, sog. Park-Distance-Control, PDC). Die beschriebene Form der Einparkhilfe wird normalerweise automatisch beim Einlegen des Rückwärtsgangs eingeschaltet. Zusätzlich muss noch ein Taster bzw. Schalter vorhanden sein, durch welchen das System auf Fahrerinitiative hin ein – bzw. ausgeschaltet werden kann. Mithilfe von an den Fahrzeugkanten integrierten Kameras und Bildverarbeitungstechnologie ist es möglich, auf dem zentralen Informationsdisplay (CID) eine künstliche Von-oben-Sicht auf das Fahrzeug darzustellen. Dadurch hat der Fahrer auch bei Blick auf dieses Display zumindest die nähere Umgebung im Blick. Doisl (2008) empfiehlt, diese Darstellungsform mit der Parkdistanzanzeige zu kombinieren (Abb. 9.11). Aus ergonomischer Sicht stellen die besprochenen Systeme – insbesondere unter dem Aspekt der heute üblichen eher unübersicht-

Abb. 9.12 Der Rückfahrkamera überlagerte Ist- und Soll-Fahrschlauchdarstellung für das Einparken (Beispiel: BMW)

lichen Karosserieformen – eine wichtige Hilfe dar. Bedingt durch die Geometrie des Sensorkegels kann es allerdings vorkommen, dass detektierte Objekte wieder verschwinden, ein Effekt der zu Verwirrung und damit zur falschen Reaktion des Fahrers führen kann.

- ***Geführte Einparkassistenz.*** In diesem Fall werden in das Bild einer Rückfahrkamera Führungslinien eingeblendet, welche einerseits den auf der Grundlage der oben genannten Messsysteme berechneten Sollverlauf des Einparkvorgangs anzeigen und anderseits den zukünftigen Verlauf aufgrund der momentan gewählten Lenkradstellung („Fahrschlauch", Abb. 9.12). Das Bild wird üblicherweise im zentralen Informationsdisplay (CID) dargestellt. Mit solchen Systemen kann sowohl das Parken in Längs- wie in Querparklücken unterstützt werden. Ohne Bildverarbeitung, welche ggf. selbstständig erkennt, um welche Art von Parkplatz es sich handelt, muss der Fahrer die Auswahl manuell treffen. Bei Längsparkplätzen wird durch das Setzen des Blinkers die korrekte Hilfslinie ausgewählt.
  Bei den weiter ausgebauten Systemen wird der Solllenkwinkel bzw. die Lenkwinkeldifferenz im Allgemeinen in dem CID angezeigt, sowie die einzuschlagende Fahrtrichtung, die jeweiligen Stopppunkte und das Ende des Einparkvorgangs.
  Aus ergonomischer Sicht ist diese sehr reichhaltige Anzeige im CID allerdings fragwürdig, da die Gefahr besteht, dass der Fahrer nur nach dem Display fährt und nicht mehr die reale Umgebung bzw. Spiegel beobachtet.
- ***Semiautomatische und automatische Systeme.*** Zu diesen Systemen kann man auch solche zählen, bei denen in der Vorbeifahrt Längsparklücken vermessen und dem Fahrer angezeigt wird, ob Einparken möglich ist (z. B. durch die Anzeige „Parklücke ausreichend groß", „Parklücke zu klein", Beispiel siehe Abb. 9.13). Manche Systeme zeigen oft auch den Schwierigkeitsgrad des Parkiervorgangs an (zum Beispiel „leicht", „normal", „schwierig"). Gegebenenfalls können durch solche Systeme sogar Handlungshinweise vermittelt werden, wie „weiter zurücksetzen" bzw. „vorwärts fahren", „Einparkversuch sinnvoll". Die maximale Vorbeifahrgeschwindigkeit wird dabei üblicherweise auf Werte zwischen 15 und 30 km/h festgelegt. Derartige Systeme müssen prinzipiell über einen Taster von dem auf Parkplatzsuche befindlichen Fahrer eingeschaltet werden. Wenn die maximale Vorbeifahrgeschwindigkeit überschritten wird, schaltet sich das System selbstständig wieder aus. Nach den Untersuchungen von Doisl (2008) finden Parksuchvorgänge allerdings bei Geschwindigkeiten bis zu 45 km/h statt, so dass die für die Systeme gewählte Grenzgeschwindigkeit zu niedrig angesetzt ist.
  Bei voll ausgebauten semiautomatischen Systemen wird der Fahrer üblicherweise von der Querregelung entbunden. Wenn das System eine ausreichend große Parklücke

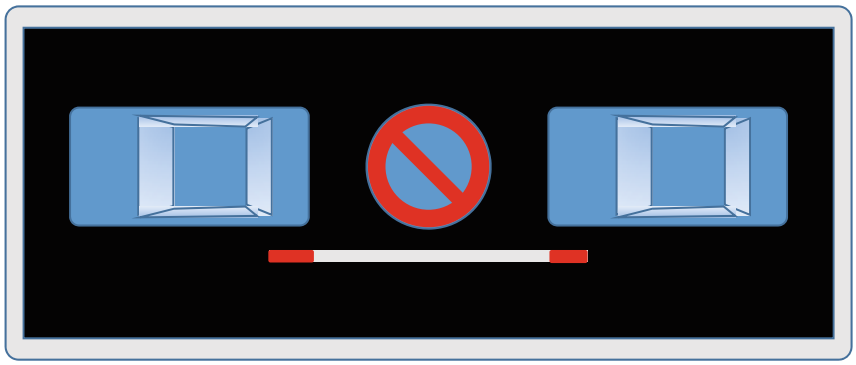


Abb. 9.13 Anzeige über die Möglichkeit eines Einparkvorgangs (Beispiel Citroën Picasso)

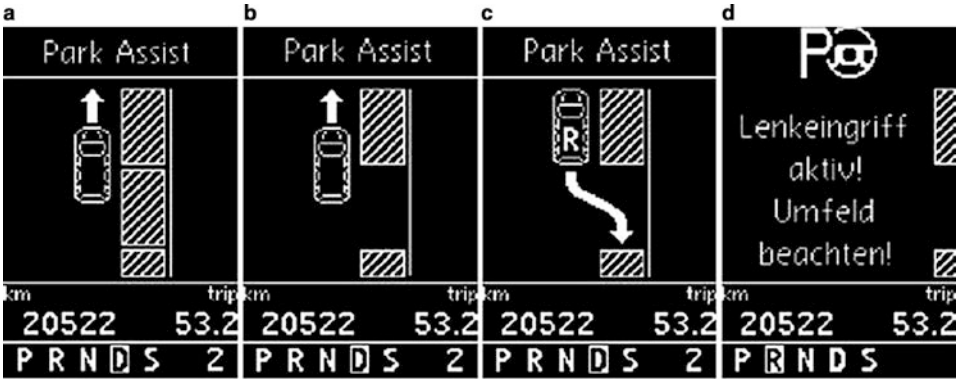


Abb. 9.14 Mensch-Maschine-Schnittstelle für ein semiautomatisches Einparksystem. Von **a** nach **d**: keine Parklücke, Parklücke erkannt, Rückwärtsgang einlegen, Fahrzeuglenker selbstständig

detektiert hat, muss er nur durch Gasgeben und Bremsen die Längsdynamik des Fahrzeugs beeinflussenden, während der Lenkvorgang automatisch vorgenommen wird. Abbildung 9.14 zeigt ein Beispiel einer Mensch-Maschine-Schnittstelle für einen derartiges semiautomatisches Einparksystem (System VW, zitiert nach Katzwinkel et al. 2012).

In Zukunft ist mehr und mehr damit zu rechnen, dass bestimmte Einparkvorgänge sogar vollautomatisch durchgeführt werden. So wurden beispielsweise sog. Garagenparker gezeigt, die vollautomatisch, nur kontrolliert von dem außerhalb des Fahrzeugs stehenden Fahrer, mithilfe von vorher in der Garage angebrachten Reflexionspunkten einparken können. Solche Systeme könnten in Parkhäusern womöglich in Zukunft dazu genutzt werden, Fahrzeuge sehr eng aneinander zu parken, wobei die Passagiere vor dem Einparkvorgang aussteigen müssen. Der verfügbare Parkraum könnte auf diese Art und Weise weitaus besser genutzt werden.

Auf der Grundlage von systemergonomischen Regeln sowie den Erkenntnissen seiner umfangreichen Versuche erarbeitet Doisl (2008) eine Konzeptempfehlung für videobasierte Parkassistenzsysteme. Dabei wird in das Bild der Rundumsichtkamera die jeweilige Empfehlung für die Aktivität des Fahrers eingeblendet sowie gegebenenfalls auf gefährdende Objekte hingewiesen. Diese Empfehlung hat sowohl für geführte Einparkassistenz als auch für semiautomatische Systeme Gültigkeit (Abb. 9.15).

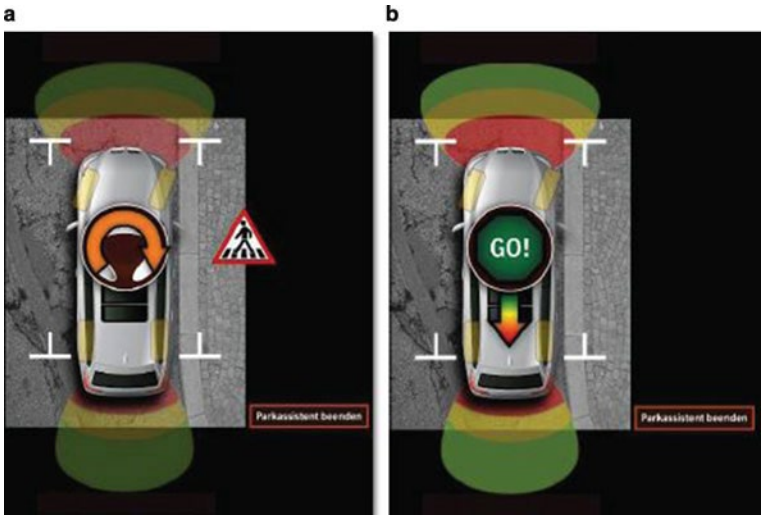


Abb. 9.15 Konzeptempfehlung für ein videobasierte Parkassistenzsystem (Doisl 2008) **a** „drehe das Lenkrad auf Anschlag nach rechts – Achtung Fußgänger von rechts!", **b** „fahre rückwärts!"

9.2.1.4 Navigationsaufgabe

Wie bereits angesprochen, gehören Assistenzsysteme, welche die Navigationsaufgabe unterstützen, zu den ältesten Entwicklungen auf diesem Gebiet. Entsprechend hoch ist der gegenwärtige Entwicklungsstand sowohl hinsichtlich der Bedienung als auch hinsichtlich der Darstellung der Navigationsempfehlung. In ▶ Abschn. 6.2.1 sowie 6.3.1.3 werden detaillierte Angaben aus systemergonomischer Sicht dazu gemacht. Insbesondere wird dort auf die Beobachtungen hingewiesen, dass Navigationssysteme auch während der Fahrt intensiv bedient werden. Die sich daraus ergebenden Anforderungen hinsichtlich einer sprachlichen Bedienung sind in den genannten Kapiteln ebenfalls beschrieben. Die deutlich schnelleren Entwicklungszyklen der Zubehörindustrie – sowohl der nachträglich im Fahrzeug zu befestigen Navigationssysteme als auch neuerdings der Mobilphone – ermöglichen zwar einerseits den schnelleren Einsatz neuerer Technologien wie z. B. von Spracherkennung – allerdings nicht abgestimmt auf die speziellen akustischen Verhältnisse des verwendeten Fahrzeugs –, bewirken allerdings andererseits, dass die manuelle Bedienung über die relativ kleine Touch-screen-Oberfläche dieser Zusatzgeräte erfolgen muss, was aus sicherheitstechnischen Gründen bedenklich ist. Wünschenswert wäre die Entwicklung einer Schnittstelle, über welche die Bedienung solcher Zusatzgeräte an die im Fahrzeug verbauten Stellteile (z. B. Touchpad oder Drehdrücksteller) angeschlossen werden kann (verschiedene Entwicklungsansätze in diese Richtung werden gegenwärtig von vielen Automobilherstellern vorgestellt).

Im Folgenden werden einige Eigenschaften dargestellt, die aus ergonomischer Sicht die Assistenzfunktion von Navigationssystemen ergänzen.

- Unter dem Aspekt des immer dichter werdenden Verkehrs und der Schwierigkeit in einer fremden Umgebung einen geeigneten Abstellplatz für das Fahrzeug zu finden, ist seitens der Navigation auf die Unterstützung bei der ***Parkplatzsuche*** besonderer Wert zu legen (z. B. Auffinden eines Parkhauses mit freien Plätzen). Insbesondere wird es in Zukunft möglich sein, die Navigation auf Bereiche außerhalb des gespeicherten Kartensystems, also auf Parkplätze oder Parkhäuser auszudehnen (Kleine-Besten et al. 2012). Dann wäre es möglich, Navigationshinweise über die Richtung, in die die Parkstelle verlassen werden soll, zu geben.
- Kleine-Besten et al. (2012) schildern die verschiedenen Möglichkeiten, für das in den Navigationssystemen verwendete Kartenmaterial ein „***Update***" vorzunehmen. Insbesondere ist hier zu unterscheiden zwischen den sog. On-board-Karten, die vom Nutzer selbst regelmäßig durch neue Varianten zu ersetzen sind und solchen Systemen, welche von einem externen Server dem Fahrzeug zur Verfügung gestellt werden. Eine Besonderheit stellen die sog. ***lernenden Karten*** dar. Unter anderem

Abb. 9.16 Bird-view-Anzeige für die Annäherung an ein Stauende (Popiv 2011)

werden Systeme erwähnt, welche Fehler in der Datenbasis selbst erkennen und beheben können. Insbesondere bei häufig befahrenen Strecken (z. B. der Weg zur Arbeit) kann beispielsweise eine ökonomische, verbrauchsoptimierte Fahrstrecke, welche die Erfahrungen des Nutzers berücksichtigt, gespeichert werden. Ein anderer Anwendungsfall der lernenden Karte stellt die Personalisierung für bestimmte Fahrergruppen, z. B. ältere Fahrer, dar. So können beispielsweise im digitalen Kartenspeicher bereits gefahrene Strecken und Kreuzungen gekennzeichnet und individuell bewertet werden, um so „Problemkreuzungen", „stressige Strecken" oder Strecken, die „einfach zu fahren sind" zu markieren und ggf. zu umfahren.

Für manche Berufsgruppen aber auch für Privatpersonen kann die automatische Führung eines ***Fahrtenbuchs*** von Interesse sein (manche heute auf dem Zusatzmarkt verfügbare Navigationsgeräte verfügen bereits über eine Funktion, die es erlaubt, die gefahrene Strecke zu speichern und später auf dem Computer z. B. mittels Google-Maps darzustellen). Selbstverständlich muss in diesem Fall aus Datenschutzgründen gewährleistet sein, dass diese Funktion jederzeit abzustellen ist und dann auch nicht eine irgendwie geartete Aufzeichnung „im Hintergrund" erfolgt.

Wie bereits mehrfach erwähnt, findet die engere Führungsaufgabe in einem Streckenabschnitt, der innerhalb von etwa 2 Sekunden durchfahren wird, statt. Mehr als 4 Sekunden Voraussicht sind im Allgemeinen schon aufgrund der optischen Verhältnisse nicht möglich. Das bedeutet, dass alle Aktivitäten, die sich aus Ereignissen in einem noch weiteren Feld ergeben, der Navigation zugeordnet werden müssen. Kleine-Besten et al. (2012) weisen in diesem Zusammenhang auf navigationsgestützte Assistenzfunktionen hin, welche unmittelbar aus den in dem Navigationssystem gespeicherten Informationen erzeugt und bereitgestellt werden können. Dazu gehören beispielsweise der ***Kurvenwarner***, welcher den Fahrer auf zu hohe Geschwindigkeit vor einer vorausliegenden Kurve hinweist oder der ***Gefahrpunktwarner***, welcher die Aufmerksamkeit des Fahrers auf spezielle Unfallschwerpunkte, Kindergärten/Schulen u. ä. lenkt.

Eine wesentliche Erweiterung, welche in dem Übergangsbereich zwischen Navigation und Führung anzusiedeln ist, stellt die bidirektionale Kommunikation mit anderen Fahrzeugen dar. Insbesondere durch die Mobilfunktechnologie erlangt diese Kommunikationsart von der technischen Seite her zunehmend Bedeutung. Unter ***Car-to-Car (C2C)*** versteht man die Kommunikation zwischen Fahrzeugen. Sie ermöglicht beispielsweise die Warnung vor einem Stau (bei entsprechend großer Distanz und vorhandenen Möglichkeiten des Straßennetzes kann dann auch eine automatische Navigationsempfehlung zu dessen Umgebung erfolgen). Es ist auch denkbar, die von der Fahrzeugsensorik erkannte Gefahr (z. B. von ABS bzw. ESP erkannte glatte Fahrbahn) an nachfolgende Fahrzeuge zu übermitteln. Popiv (2011) hat aus ergonomischer Sicht Anzeigekonzepte für derartige Informationen entwickelt und deren Akzeptanz in Simulatoruntersuchungen überprüft (Abb. 9.16). Dabei war nicht nur der Aspekt der Sicherheit Gegenstand der Untersuchung, sondern auch die Möglichkeit, durch frühzeitiges Reagieren den Energieumsatz des Fahrzeugs zu reduzieren. Allerdings darf man nicht erwarten, dass derartige Informationen unter

Abb. 9.17 Auf dem Handy dargestellte Anzeige Kolibri (Krause u. Bengler 2013)

allen Umständen auf Akzeptanz seitens des Fahrers treffen. Die Situationen, bei denen das Assistenzsystem half, zeichnen sich dadurch aus, dass

- die Situation nicht im Blickfeld des Fahrer ist,
- die Entwicklung der Situation zu dem Zeitpunkt nicht klar ist, zu dem der Fahrer die Situation zum ersten Mal sieht.

Dort, wo die Assistenzsysteme keine Wirkung hatten, war die Situation für den Fahrer klar zu sehen. Im Stadtverkehr wurden Ratschläge von Assistenzsystemen, die eine sehr frühe Reaktion in Form von Gaswegnehmen erfordern, nicht akzeptiert. Im Landstraßenverkehr dauern die längsten durch Motorbremsung verursachten Verzögerungsfahrten 13 s, im Fall multimodaler Vermittlung (zusätzliche Information über das Aktive Gaspedal) der Assistenzempfehlung sogar 16 s, auf der Autobahn 8 s. Ungenauigkeiten des Systems gegenüber sind die Versuchspersonen relativ tolerant, solange auf nicht einsehbare Situationen hingewiesen wird.

Eine andere Form der bidirektionalen Kommunikation ist der Informationsaustausch des Fahrzeugs mit der Infrastruktur (*Car-to-Infrastructure, C2I*). So ist es beispielsweise möglich, Information von mit Transpondern ausgerüsteten Verkehrsschildern (z. B. Geschwindigkeitsbegrenzungen, Überholverbote, insbesondere auch Information von Verkehrszeichenwechselanlagen) und von Ampeln auf das Fahrzeug zu übertragen. So kann auch Information über die Grünphase vermittelt werden, wodurch eine Geschwindigkeitsanpassung der Fahrzeuge für die so genannte „Grüne Welle“ erreicht werden kann. In dem Forschungsprojekt Kolibri (Kooperative Lichtsignaloptimierung – Bayerische Pilotstudie, Krause und Bengler 2013) wurde u. a. ein Anzeigesystem untersucht, das auf Mobiltelefonen den Geschwindigkeitsbereich anzeigt, welcher einen Verbleib in der grünen Welle sicherstellt und gegebenenfalls rechtzeitig darauf weist, den Fuß vom Fahrpedal zu nehmen, um die Motorbremse weitgehend für den nächsten Ampelstopp zu nutzen. Auch hier erwies sich eine bird-view-artige Anzeige unter Berücksichtigung systemergonomischer Forderungen als besonders wirkungsvoll (Abb. 9.17).

Es ist zu erwarten, dass in Zukunft über die C2I-Technik eine weitgehende zeitgerechte externe Verkehrsplanung realisierbar ist. Das grundsätzliche Problem ist allerdings dabei, dass in vielen

Tab. 9.6 Einteilung der Fahrerassistenzsysteme nach der Interventionstiefe (aus Maier 2014)

Zuordnung der Fahrerassistenzsysteme zu der Interventionstiefe					
	Informierend	warnend	Assistierend	Teilautonom	Vollautonom
Interventionstiefe	• Navigationssystem • ...	• Spurverlassenswarner • Kollisionswarner • ...	• Spurverlassenswarner mit Lenkeingriff • Kollisionswarner mit kurzen Bremseingriff • ...	• Tempomat • ACC • ...	• ABS • ASR • ESP • ...
Merkmale	• FAS gibt dem Fahrer Informationen	• FAS warnt den Fahrer • Eine Handlung des Fahrers ist erforderlich	• FAS greift kurzzeitig in die Fahrzeugführung ein • Übersteuerung durch den Fahrer jederzeit möglich	• FAS übernimmt Teile der Fahraufgabe • Der Fahrer überwacht das System • Übersteuerung durch den Fahrer jederzeit möglich	• FAS greift in die Fahrdynamik ein • Übersteuerung durch den Fahrer nicht möglich

Anwendungsfällen nur solche Verkehrsteilnehmer eingebunden werden können, die über die entsprechende Technik verfügen. Kleine-Besten et al. (2012) führen als Beispiel für die gelungene Einführung einer modernen Verkehrssteuerung das System VICS (Vehicle Information and Communication System) an, welches seit 1996 bis 2003 öffentlich gefördert flächendeckend in ganz Japan eingeführt worden ist. Die von der Polizei und der Straßenverwaltung erfassten Daten werden an das VICS-Center weitergegeben. Fahrer, die über ein entsprechendes Navigationsgerät im Fahrzeug verfügen, werden in Echtzeit über die aktuelle Verkehrssituation in der Form informiert, dass in Übersichts- und Detailkarten der Verkehrsfluss auf den einzelnen Straßen farbig klassifiziert wird (rot, gelb, grün) und ihm somit eine Einschätzung der Verkehrssituation ermöglicht wird (Ähnliche Angebote gibt es in Europa durch kommerzielle Navigationsgerätehersteller wie beispielsweise TomTom).

9.2.2 Kategorisierung der Fahrerassistenzsysteme für die primäre Fahraufgabe

Wie die Schilderung der verschiedenen Assistenzsysteme schon gezeigt hat, interagieren diese mit dem Fahrer – teilweise bedingt durch die technische Realisierung – auf ganz unterschiedliche Art und Weise. Manche dieser Systeme geben in Abhängigkeit von einer Situation dem Fahrer Hinweise (z. B. die Navigationssysteme), andere warnen ihn vor einer gefährlichen Situation (z. B. Spurverlassenswarner), wieder andere greifen unter solchen Bedingungen autark ein (z. B. Lane Departure Prevention) und wieder andere Systeme ermöglichen die Automatisierung von Teilaufgaben (z. B. ACC) oder sogar die ganze Aufgabe (z. B. Stauassistent). Einen Überblick über die Einteilung anhand dieser Interventionstiefe gibt Tab. 9.6.

Da sowohl die Warnung vor bestimmten Situationen als auch die Übernahme von Aufgaben auch rechtliche Konsequenzen hat, wurde seitens der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) ein Vorschlag für die Kategorisierung von Assistenzsystemen unter diesem speziellen Aspekt vorgenommen (Gasser 2012). Tabelle 9.7 zeigt diese Kategorisierung, welche die Stufen „Driver only“ – „Assistent“ – „teilautomatisiert“ – „hoch automatisiert“ – „voll automatisiert“ kennt. Gasser stellt fest, dass bis zu der Stufe „Teilautomatisierung“ wegen der jederzeit übersteuerbaren Funktionen eine Übereinstimmung mit dem § 1 der StVO gegeben ist. In den höheren Automatisierungsgraden würde der Fahrer allerdings zumindest in den automatisch gesteuerten Phasen, die per Definition einen Verzicht des Fahrers auf die permanente Überwachung von Fahrbahn und Verkehrsumgebungen erlauben, gegen seine Verpflichtungen aus der StVO verstoßen. Nur bei dem Sonderfall eines Nothaltesystems,

Tab. 9.7 Benennung und Klassifizierung von Fahrerassistenzfunktionen nach einem für die BASt erarbeiteten Vorschlag (Stand 06.09.2010, nicht abschließend, Gasser 2012)

Nomenklatur	Beschreibung Automatisierungsgrad und Erwartung des Fahrers	beispielhafte Systemausprägung
Driver Only	Fahrer führt dauerhaft (während der gesamten Fahrt) die Längsführung (Beschleunigen / Verzögern) und die Querführung (Lenken) aus.	Kein in die Längs- oder Querführung eingreifendes (Fahrerassistenz-)System aktiv
Assistiert	Fahrer führt dauerhaft entweder die Quer- oder die Längsführung aus. Die jeweils andere Fahraufgabe wird in gewissen Grenzen vom System ausgeführt. ▪Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen ▪Der Fahrer muss jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein	Adaptive Cruise Control: -Längsführung mit adaptiver Abstands- und Geschwindigkeitsregelung Parkassistent: - Querführung durch Parkassistent (Automatisches Lenken in Parklücken. Der Fahrer steuert die Längsführung.)
Teilautomatisiert	Das System übernimmt Quer- und Längsführung (für einen gewissen Zeitraum und/ oder in spezifischen Situationen). ▪ Der Fahrer muss das System dauerhaft überwachen ▪ Der Fahrer muss jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein	Autobahnassistent: -Automatische Längs- und Querführung - Auf Autobahnen bis zu einer oberen Geschwindigkeitsgrenze -Fahrer muss dauerhaft überwachen und bei Übernahmeaufforderung sofort reagieren
Hochautomatisiert	Das System übernimmt Quer- und Längsführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Situationen. ▪ Der Fahrer muss das System dabei nicht dauerhaft überwachen ▪ Bei Bedarf wird der Fahrer zur Übernahme der Fahraufgabe mit ausreichender Zeitreserve aufgefordert ▪ Systemgrenzen werden alle vom System erkannt. Das System ist nicht in der Lage, aus jeder Ausgangssituation den risikominimalen Zustand herbeizuführen.	Autobahn-Chauffeur: -Automatische Längs- und Querführung -Auf Autobahnen bis zu einer oberen Geschwindigkeitsgrenze -Fahrer muss nicht dauerhaft überwachen und nach Übernahmeaufforderung mit gewisser Zeitreserve reagieren
Vollautomatisiert	Das System übernimmt Quer- und Längsführung vollständig in einem definierten Anwendungsfall. ▪ Der Fahrer muss das System dabei nicht überwachen ▪ Vor dem Verlassen des Anwendungsfalles fordert das System den Fahrer mit ausreichender Zeitreserve zur Übernahme der Fahraufgabe auf ▪ Erfolgt dies nicht, wird in den risikominimalen Systemzustand zurückgeführt ▪ Systemgrenzen werden alle vom System erkannt, das System ist in allen Situationen in der Lage, in den risikominimalen Systemzustand zurückzuführen	Autobahnpilot: - Automatische Längs- und Querführung - Auf Autobahnen bis zu einer oberen Geschwindigkeitsgrenze - Fahrer muss nicht überwachen - Reagiert der Fahrer nicht auf eine Übernahmeaufforderung, so bremst das Fahrzeug in den Stillstand herunter.

das im Fall einer Bewusstlosigkeit des Fahrers die Fahrzeugsteuerung für die kurze Dauer bis zum sicheren Anhalten des Fahrzeugs übernimmt, würde trotz des hohen Automatisierungsgrades kein Widerspruch zu den verhaltensrechtlichen Pflichten gegeben sein.

Eine Kategorisierung der Fahrerassistenzmöglichkeiten bzw. der Fahrerassistenzsysteme aus der Sicht des Fahrers muss sich an der hierarchischen Ordnung der Fahraufgaben orientieren, um zu definieren, was assistiert werden soll (siehe auch ▶ Abschn. 9.2.1; die Abhandlung im Folgenden bezieht sich nur auf die primäre Fahraufgabe; Angaben zur sekundären und tertiären Aufgaben sind in ▶ Kap. 6 zu finden). Zu diesem Zweck wird die in ▶ Kap. 2 erfolgte Darstellung der Fahraufgabe bezogen auf die primäre Fahraufgabe erneut wiedergegeben. In jedem Fall ist ein Assistenzsystem – gleich welcher Ausbaustufe – den jeweiligen vom Fahrer durchzuführenden Aufgaben parallel geschaltet. Für die Verknüpfung mit dem Informationsfluss zwischen Fahrer und Fahrzeug ergeben sich dabei verschiedene Alternativen:

- Das Assistenzsystem übernimmt *alternativ* zum Fahrer die jeweilige Aufgabe. Im Schaltbild der ◘ Abb. 9.18 wird dies jeweils durch einen Schalter charakterisiert. Falls der Schalter auf das Assistenzsystem gelegt ist, wirkt das Assistenzsystem wie eine Automatik. Der Fahrer kann durch Betätigen des Schalters die Automatik außer Funktion setzen. Damit behält er die Oberhand über das Assistenzsystem. Es gibt verschiedene technische Bedingungen, durch welche der Schalter betätigt wird und die Automatik somit selbsttätig außer Kraft setzt. Auf der Ebene der Führung ist dies bezogen auf die Beeinflussung der Längsdynamik das Funktionsprinzip des ACC. Auf der Ebene der Stabilisierung entspricht dies ABS und ESP; allerdings ist hier das Funktionsprinzip in der Form abgewandelt, dass das Assistenzsystem aufgrund von am Fahrzeug gemessenen Parametern eingeschaltet wird; wenn die entsprechenden Bedingungen nicht mehr vorliegen, ist das Assistenzsystem auch nicht wirksam.
- Das Assistenzsystem übernimmt *simultan* und gleichberechtigt mit dem Fahrer die jeweilige Aufgabe. Die Information des Eingriffs des Fahrers und des Assistenzsystems wirken über einen Summenpunkt auf das Fahrzeug (◘ Abb. 9.19). Dieses Schaltungsprinzip kann nur wirksam sein, wenn zugleich an den jeweiligen Bedienelement dem Fahrer eine Rückmeldung darüber gegeben wird, welchen Einfluss das Assistenzsystem im Augenblick nehmen will. Indem er nun gegebenenfalls durch höheren Krafteinsatz dagegen hält, kann er jederzeit das Assistenzsystem überstimmen. Auf der Ebene der Fahrzeugführung sind das Spurhaltesystem und noch mehr die Lane-Departure-Prevention ein Beispiel für diese Art der Verschaltung. Allerdings muss auch hier für den Fahrer das System überhaupt einschalten. Das System wird automatisch ausgeschaltet, wenn die von der Frontkamera aufgenommene Information für eine Regelung nicht ausreichend ist.
- Das Assistenzsystem greift in den Regelungsprozess nicht ein. Es gibt stattdessen in Abhängigkeit von der Situation Hinweise bzw. Warnungen. Damit hat das Assistenzsystem lediglich *informierenden bzw. warnenden* Charakter. Um diese Information zu realisieren, sind entsprechende Anzeigen notwendig. Die Modalität der Informationsbereitstellung hängt von der zeitlichen Dringlichkeit ab: Information geringer zeitlicher Dringlichkeit, die aber längere Zeit von Interesse ist, sollte optisch dargestellt werden, Informationen mit ad-hoc-Charakter akustisch bzw. haptisch. Das klassische Beispiel für ein Assistenzsystem mit informierendem Charakter ist das Navigationssystem (◘ Abb. 9.20). Auf der Führungsebene ist als Beispiel für ein Assistenzsystem mit warnendem Charakter der Notbremsassistent anzuführen. Die Reaktionen der zuvor genannten Assistenzsysteme werden, sowohl was ihre informierende als auch was ihre warnende Wirkung anlangt, ebenfalls über Anzeigen vermittelt.

Aus dieser Gegenüberstellung wird ein weiterer Unterschied bezüglich der Interaktion des Fahrers mit dem Assistenzsystem sichtbar:

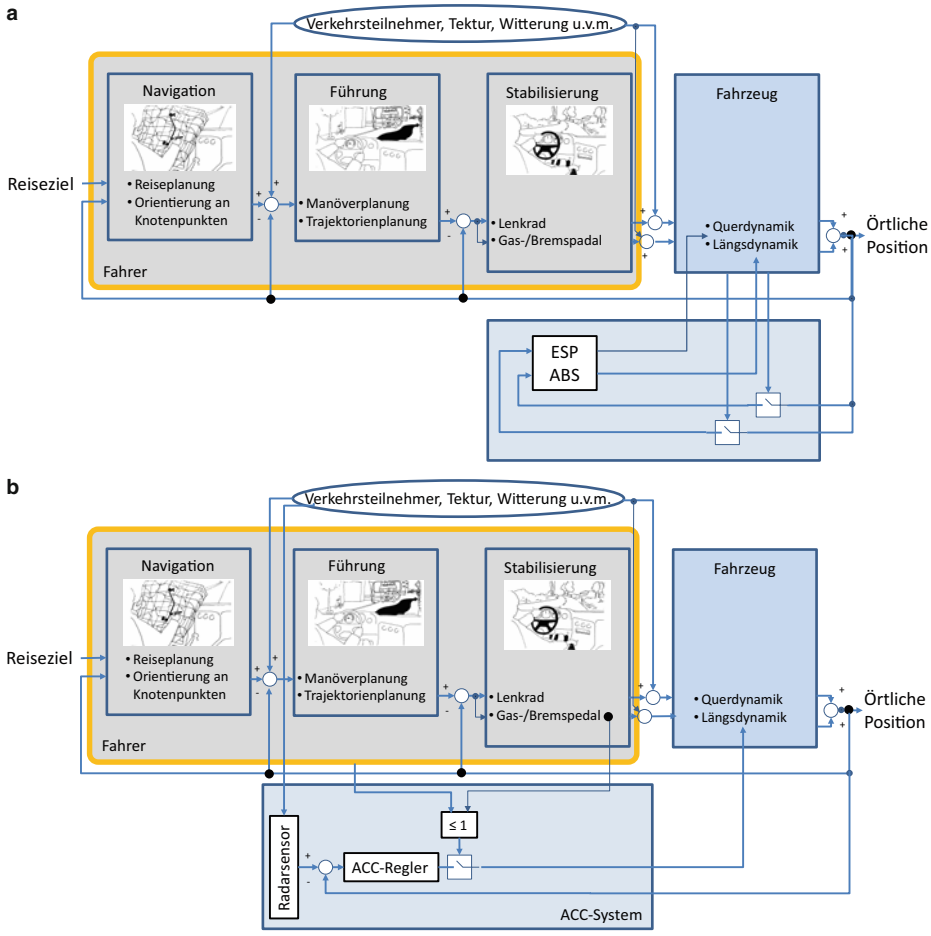


Abb. 9.18 Strukturbild von Assistenzsystemen, welche alternativ zum Fahrer Aufgaben übernehmen (**a** ABS/ESP, **b** ACC)

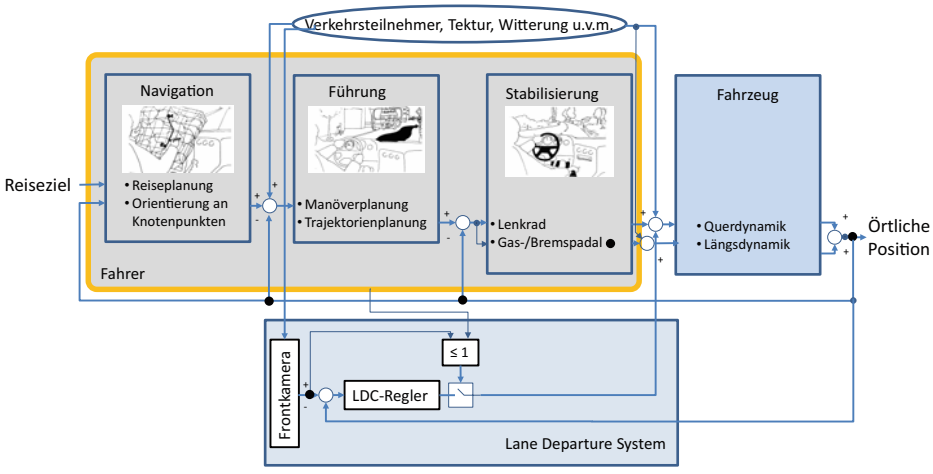


Abb. 9.19 Schaltungsprinzip eines Assistentensystems, das simultan mit dem Fahrer wirkt (Beispiel LDC)

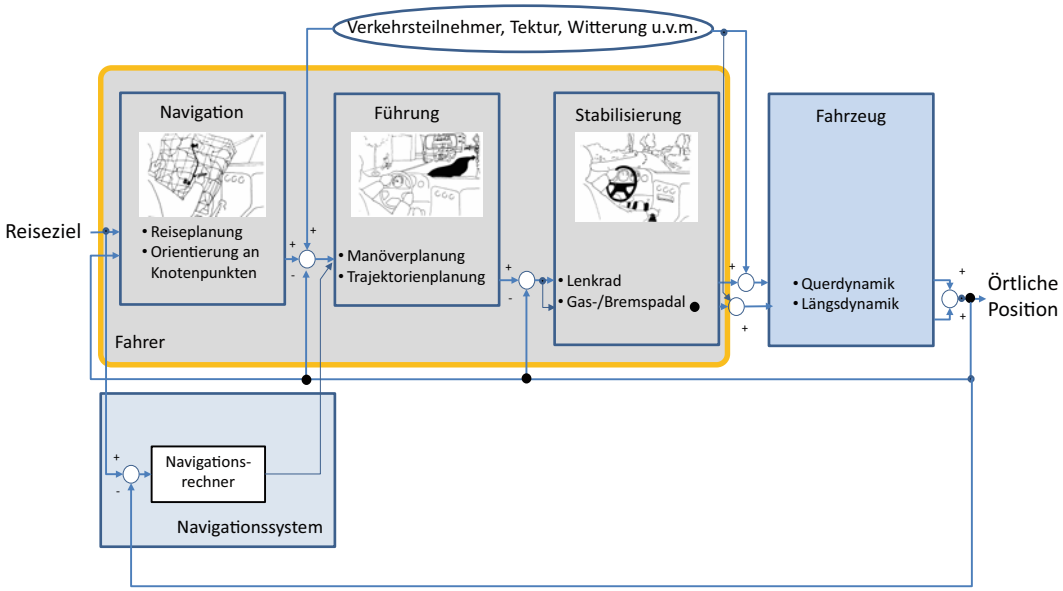


Abb. 9.20 Strukturbild eines Assistenzsystems mit informierendem Charakter

- Im Fall des alternativ wirkenden Assistenzsystems erfolgt die Betätigung des Schalters in einer bestimmten Verkehrssituation. Der Fahrer gibt also in Abhängigkeit von deren Sequenz den Befehl zur Übernahme einer bestimmten Teilaufgabe. Er beauftragt ein Manöver (im Fall des ACC heißt das Manöver: „Haltet die vorgegebene Geschwindigkeit bzw. den Abstand zu dem vorausfahrenden Fahrzeug"). Das beauftragte Manöver wird nun von dem System selbstständig durchgeführt. Der Fahrer hat im Folgenden nur die korrekte Ausführung zu überwachen (Monitives System).
- Im Fall des simultan arbeitenden Assistenzsystems ist er bezüglich der jeweiligen assistierten Teilaufgabe ständig selbst in Aktion (aktives System). Wenn der Fahrer dieses System einschaltet, bittet er es quasi, ihn bei seiner Tätigkeit, die er nach wie vor selbst ausübt, zu unterstützen.

Diese Unterscheidung ist Grundlage für zwei von der DFG geförderte Forschungsprojekte:

- In dem Projekt „Conduct-by-Wire" wird der Gedanke der „Manöverbeauftragung" auf weitere Manöver ausgedehnt. So ist für bestimmte Streckenabschnitte die Ergänzung des ACC-Systems durch eine automatische Spurführung denkbar (praktisch eine Erweiterung des Stauassistenten auf höhere Geschwindigkeitsbereiche) oder insbesondere auch spezielle, sich aus der Situation ergebende Manöver wie beispielsweise „überhole jetzt", „wechsle die Spur", „biege bei der nächsten Kreuzung nach rechts ab", „parke ein" u.v.m. Neben der Frage der technischen Realisierung spielt dabei auch die ergonomische Gestaltung der Interaktion mit dem Fahrzeug, also die Frage, wie das Manöver beauftragt

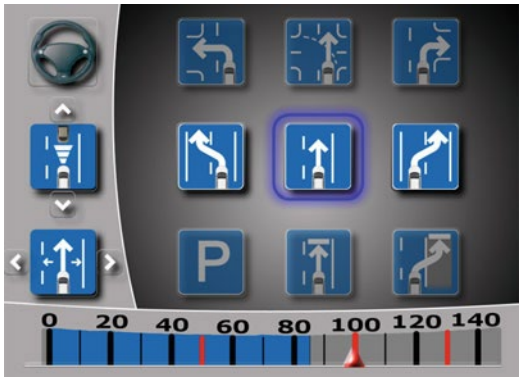


Abb. 9.21 Beispiel eines Bedienfeldes für „Manöverbeauftragung" (Franz et al. 2011)

Abb. 9.22 kontinuierlicher Übergang zwischen „Tight Rein" und „Loose Rein" in H-Mode

werden soll, eine wesentliche Rolle (Winner et al. 2006; Winner und Hakuli 2006). Abbildung 9.21 zeigt ein derartiges Bedienfeld in Form eines Touchscreens, das rechts neben dem Lenkrad angebracht wäre (Franz et al. 2011). Das Projekt Conduct-by-Wire thematisiert also die sequenzielle, diskrete Interaktion des Fahrers mit dem Assistenzsystem.

Das Projekt „H-Mode"[12] verfolgt demgegenüber die simultane Einbindung von Fahrer und Assistenzsystem. Die Metapher von Pferd und Reiter soll dabei charakterisieren, dass zugleich zwei intelligente Systeme am Handeln sind, wobei ein kontinuierlicher Übergang von einem System zum anderen System denkbar ist (sog. „Transition"). „Loose rein" charakterisiert, dass das Assistenzsystem primär die Aufgabe übernimmt, während „tight rein" bedeutet, dass nun der Fahrer „die Zügel in der Hand hält". Diese beiden Modi stehen also für die Extreme „voll automatisierte Fahrzeugführung" und „konventionelle manuelle Fahrzeugführung" (Flemisch et al. 2014; siehe Abb. 9.22). In einer Version ist daran gedacht, durch die Kraft, mit der der Fahrer auf das Bedienelement einwirkt, den Wunsch nach dem aktuellen Automatisierungsniveau kontinuierlich zu erfassen. Um H-Mode zu realisieren, sind bei einer konventionellen Gestaltung der Fahrzeugbedienung wie beim Spurführungsassistenten eine elektrisch beeinflussbare Lenkung sowie das aktive Gaspedal notwendig. Alternativen dazu sind die Joy-stick-Lenkung oder der sog. „Joke", ein lenkradähnliches Bedienelement, das aber zusätzlich in Längsrichtung bewegt werden kann, um so Beschleunigungs- und Verzögerungseingaben zu ermöglichen (Kienle 2015).

Damböck (2014) versucht auf der Grundlage einer breiten Literaturstudie die verschiedenen Klassifizierungsmöglichkeiten von Fahrerassistenzsystemen zu bündeln (Tab. 9.8), wobei er wesentlich den Grundgedanken des von Gasser (2012) vorgeschlagenen Konzeptes aufnimmt (Tab. 9.7). Er fügt dazu die Unterscheidung von konventionellen und fortgeschrittenen Fahrerassistenzsystemen ein (Donner et al. 2007). Weiterhin berücksichtigt er, welche Schritte des Informationsverarbeitungsprozesses die einzelnen Systeme umfassen und in welchem Maß der Fahrer jeweils in die Fahraufgabe eingebunden bleiben muss.

9.2.3 Müdigkeitswarner

Einen Überblick über die Möglichkeiten zur Fahrerüberwachung gibt Hörwick (2011). Es existieren dafür zwei unterschiedliche Ansätze: Zum einen kann man das Fahrerverhalten unmittelbar beobachten und zum anderen dem Fahrer Bedienhandlungen auferlegen, deren korrekte Bearbeitung dann analysiert wird (Abb. 9.23).

9.2.3.1 Fahrerüberwachung durch erzwungene Bedienhandlung

Die letztere Methode ist als Totmanntaster Hauptbestandteil der sog. *Sicherheitsfahrschaltung (SIFA)* bei den Triebfahrzeugen im Schienenverkehr. In regelmäßigen zeitlichen Abständen (in Deutschland alle 30 Sekunden) wird der Triebwagenführer aufgefordert, ein Fußpedal loszulassen und wieder zu drücken. Eine ähnliche Maßnahme wird in einigen europäischen Ländern auch bei öffentlichen Passagierfahrzeugen im Straßenverkehr (Omnibussen, dort in Form eines Handtasters) realisiert. Abgesehen davon, dass diese Maßnahme eine zusätzliche tertiäre Aufgabe darstellt, die in schwierigen Situationen womöglich von der eigentlichen Fahraufgabe ablenkt, zeigen Untersuchungen aus dem Bahnbereich, dass der Totmanntasters selbst im Schlafstadium C noch korrekt betätigt wird (Peter 1980). Eine für das Fahrzeug geeignete Abwandlung dieses Prinzips stellt womöglich der sog.

12 „H" steht für „Horse".

Tab. 9.8 Nomenklatur und Beschreibung der Fahrerassistenz- bzw. Automationssysteme basierend auf der Benennung nach Gasser (2012). [1]übernommen, [2]umbenannt, [3]Bedeutung geändert, [4]neue Automationsstufe (aus Damböck 2014)

Benennung	Fähigkeiten der Automation/Assistenz	Rolle des Fahrers
Driver only[3]	– Kein System aktiv	– Der Fahrer führt permanent die Fahrzeugführung aus und hat die alleinige Kontrolle über das Fahrzeug
Unterstützt[4]	– Unterstützung durch konventionelle Assistenzsysteme (z. B. ESP)	– Der Fahrer führt permanent die Fahrzeugführung aus
Informiert[4]	– Informierung und notfalls Warnung des Fahrers durch Assistenzsysteme mit Umfelderfassung (z. B. Spurverlassenswarner)	– Der Fahrer führt permanent die Fahrzeugführung aus
Assistiert[3,4]	– Automationssysteme mit Umfelderfassung können in bestimmten Situationen aktiv in die Fahrzeugführung eingreifen, um den Fahrer zu unterstützen (z. B. LKAS)	– Der Fahrer führt permanent die Fahrzeugführung aus
Semiautomatisiert[2]	– Das System übernimmt dauerhaft Quer- **oder** Längsführung innerhalb gewisser Grenzen (z. B. ACC) – Systemgrenzen werden nicht erkannt	– Der Fahrer übernimmt nur eine Dimension der Fahraufgabe – Der Fahrer muss die Funktion des Systems dauerhaft überwachen und jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahraufgabe fähig sein
Manöverautomatisiert[4]	– Das System übernimmt Quer- **und** Längsführung zur Ausführung vorgegebener Manöver (z. B. CbW, Winner et al. 2006) – Systemgrenzen werden nicht erkannt	– Der Fahrer kommandiert die auszuführenden Manöver – Der Fahrer muss die Funktion des Systems dauerhaft überwachen und jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahraufgabe fähig sein
Teilautomatisiert[1]	– Das System übernimmt Quer- **und** Längsführung für einen gewissen Zeitraum und/oder in spezifischen Situationen (z. B. Autobahnassistent, vgl. Gasser 2012) – Systemgrenzen werden nicht erkannt	– Der Fahrer muss die Funktion des Systems dauerhaft überwachen und jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahraufgabe fähig sein
Hochautomatisiert[1]	– Das System übernimmt Quer- **und** Längsführung für einen gewissen Zeitraum in spezifischen Situationen (z. B. Autobahnchauffeur, vgl. Gasser 2012) – Systemgrenzen werden erkannt und der Fahrer zur Übernahme aufgefordert – Das System ist nicht in der Lage, in jeder Situation den risikominimalen Zustand herbeizuführen – Wenn der Fahrer die Fahraufgabe übernehmen muss, stellt das System ihm genug Zeit zur Verfügung	– Der Fahrer muss die Funktion des Systems **nicht** dauerhaft überwachen – Der Fahrer muss die Fahraufgabe an Systemgrenzen übernehmen

Tab. 9.8 (*Fortsetzung*) Nomenklatur und Beschreibung der Fahrerassistenz- bzw. Automationssysteme basierend auf der Benennung nach Gasser (2012). [1]übernommen, [2]umbenannt, [3]Bedeutung geändert, [4]neue Automationsstufe (aus Damböck 2014)

Benennung	Fähigkeiten der Automation/Assistenz	Rolle des Fahrers
Vollautomatisiert[1]	– Das System übernimmt Quer- **und** Längsführung in einem definierten Anwendungsfall (z. B. Autobahnpilot, vgl. Gasser 2012) – Systemgrenzen werden erkannt und der Fahrer zur Übernahme aufgefordert – Bei ausbleibendem Eingreifen des Fahrers ist das System in der Lage, den risikominimalen Zustand herbeizuführen	– Der Fahrer muss die Funktion des Systems **nicht** überwachen – Der Fahrer kann die Fahraufgabe an Systemgrenzen übernehmen

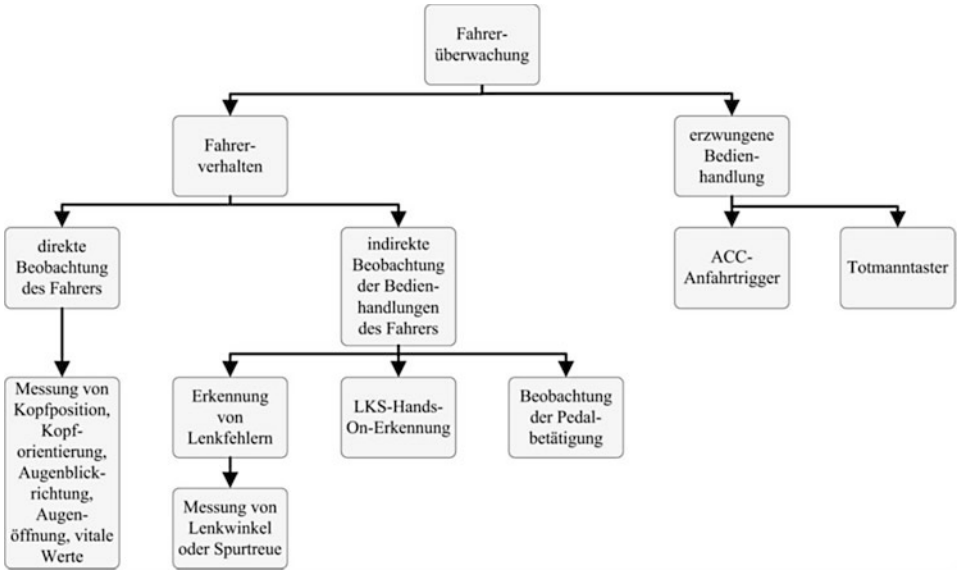


Abb. 9.23 Ansätze zur Fahrerüberwachung (aus Hörwick 2011)

Potentialtrigger dar (Wimmer et al. 2012). Danach wird davon ausgegangen, dass der Aufmerksamkeitslevel bei eintöniger Fahrt von einem gegebenen Startwert aus ständig sinkt. Wenn ein gewisser unterer Stand erreicht ist, wird der Fahrer durch ein optisches Signal (nach Möglichkeit im HUD) zu einer Reaktion aufgefordert. Durch die optische Darbietung soll gewährleistet werden, dass der unaufmerksame Fahrer nicht durch das Signal selbst „geweckt" wird. Die Sinkgeschwindigkeit wird dabei durch verschiedene Parameter bestimmt, die sich im Wesentlichen aus Erfassung der Blickdauer auf das Verkehrsgeschehen, der Nutzung von Infotainmentsystemen und der Kritikalität der Verkehrssituation (erfasst durch die ACC-Sensoren bzw. Frontkamera) zusammensetzt. Die dafür erfassten technischen Messgrößen werden durch Anwendung der Fuzzytechnik zu der erwähnten Sinkgeschwindigkeit des Aufmerksamkeitslevels verrechnet. Das System ist ausschließlich für die Nutzung in der Kombination mit hoch automatisierten Fahrerassistenzsystemen gedacht, um sicherzustellen, dass der Fahrer seine Aufmerksamkeit noch auf das Verkehrsgeschehen lenken kann. Nach dieser Idee hat der Fahrer beim Start des FAS auch den Potentialtrigger zu setzen. Wenn er dies nicht tut, ist es nicht möglich, das FAS zu aktivieren. Das in Aktion

befindliche Assistenzsystem wird ausgeschaltet, wenn der untere Punkt des Aufmerksamkeitslevels erreicht ist. Auf diese Weise soll eine gewisse „Situation Awareness" des Fahrers auch dann gewährleistet sein, wenn er durch die Beschäftigung mit nichtfahrrelevanten Aktionen abgelenkt ist.

9.2.3.2 Beobachtung des Fahrerverhaltens

Das Fahrerverhalten selbst kann prinzipiell entweder direkt durch Beobachtung des Fahrers oder indirekt durch Erfassen der Bedienungshandlungen des Fahrers überwacht werden. Im Rahmen der *direkten Fahrerbeobachtung* kommt für den Serieneinsatz ausschließlich die videobasierte Erfassung des Fahrers infrage. Durch Bildverarbeitungstechnik werden dabei die Kopfposition und dessen Orientierung, insbesondere der Augenöffnungswinkel und die Lidschlussfrequenz sowie die Blickrichtung der Augen des Fahrers erfasst. Hörwick (2011) gibt verschiedene Unternehmen- und Universitätsentwicklungen an, die eine derartige Überwachung ermöglichen. Es wird dabei davon auszugegangen, dass durch Kenntnis der genannten Parameter und deren zeitlichen Verlauf auf die Aufmerksamkeit des Fahrers geschlossen werden kann. Insbesondere ist zu unterstellen, dass ein aufmerksamer Fahrer mit einer gewissen Regelmäßigkeit durch einen definierten Bereich in der Windschutzscheibe blicken muss, um das Verkehrsgeschehen angemessen zu verfolgen. Unter dem Namen „Driver Monitoring System" bietet Lexus als einziger Automobilhersteller in seiner Baureihe LS ein videobasiertes Fahrerüberwachungssystem auf der Basis der Erfassung der Kopfposition und -ausrichtung in Serie an. Wenn das System vor dem Fahrzeug ein Hindernis entdeckt und zeitgleich der Fahrer seine Kopfausrichtung zu lange von der Fahrbahn abwendet, wird eine optische und akustische Warnung ausgegeben. Falls er dann immer noch nicht reagiert, wird ein Bremsruck zur Fahrerwarnung ausgelöst. Einschränkend ist hier anzumerken, das videobasiert die Kopfposition wesentlich besser bestimmt werden kann als die der Augen (Brillenträger und stark schwankenden Lichtverhältnisse sind dabei einschränkende Faktoren). Deshalb sind Systeme zur Erfassung der Augen bisher nicht im Serieneinsatz.

Bei der *indirekten Fahrerbeobachtung* versucht man durch die Überwachung der Bedienhandlungen für – im Wesentlichen – die primäre Fahraufgabe auf den Zustand des Fahrers zu schließen. Dabei wird die Bewegung des Lenkrads und gegebenenfalls in Verbindung damit die des Fahr- und Bremspedal erfasst. Es liegt dem die Annahme zu Grunde, dass ein müder und unaufmerksamer Fahrer während der manuellen Fahrt kleine Lenkfehler macht, die er auf eine charakteristische Weise korrigiert bzw. ausgleicht (Daimler AG 2008). Für die Erfassung des Lenkfehlers kann dazu der Lenkradbewegungsverlauf oder die Beobachtung der Querablageverläufe des Fahrzeugs herangezogen werden (Altmüller 2007). Das zurzeit auf dem Markt befindliche „Attention Assist" von Daimler basiert auf der Messung des Lenkwinkelverlaufes, wobei für die Berechnung des Warnzeitpunktes noch weitere Parameter wie Geschwindigkeit, Fahrtdauer, Längs- und Querbeschleunigung sowie Blinker- und Pedalbetätigung und auf den Fahrer einwirkende Einflüsse wie Tageszeit, aktuelle Verkehrslage, Seitenwind und Fahrbahnzustand einbezogen werden. Das System „Driver Alert Control" von Volvo beobachtet demgegenüber den Verlauf der Querablage des Fahrzeugs von der Fahrstreifenmitte mittels einer auf die Fahrstreifenmarkierung gerichteten Kamera sowie einer Trägheitssensorik. Bei Geschwindigkeiten über 60 km/h wird damit die zurückgelegte Fahrtrajektorie rekonstruiert und beurteilt, ob diese kontrolliert innerhalb des Fahrstreifens verläuft. Im allen Fällen wird der Fahrer durch eine akustische Anzeige und simultan damit durch eine optische Anzeige (meist in Form eines Kaffeetassensymbols, das zu einer Pause anregen soll) auf die mangelnde Aufmerksamkeit hingewiesen.

Einfachere Systeme (zurzeit bei VW und Honda realisiert) analysieren lediglich, ob der Fahrer die Hände am Lenkrad hat. Dazu erfassen Sensoren am Lenkrad das aktuell vom Fahrer aufgebrachte Lenkmoment. Wird keine eigenständige Lenkbewegung des Fahrers mehr erkannt, so wird nach einer gewissen Toleranzzeit (üblicherweise im Sekundenbereich) das Assistenzsystem zur Querführung (Lane Keeping Support System, LKS) ausgeschaltet.

Das Problem aller Müdigkeitswarner – gleich auf welchem Prinzip sie arbeiten – ist die hohe Rate an „False-alarms" und „misses" (Alarm, obwohl keine Müdigkeit vorliegt, fehlender Alarm bei vorliegender Müdigkeit, siehe dazu auch ► Abschn. 11.2.6). Dazu

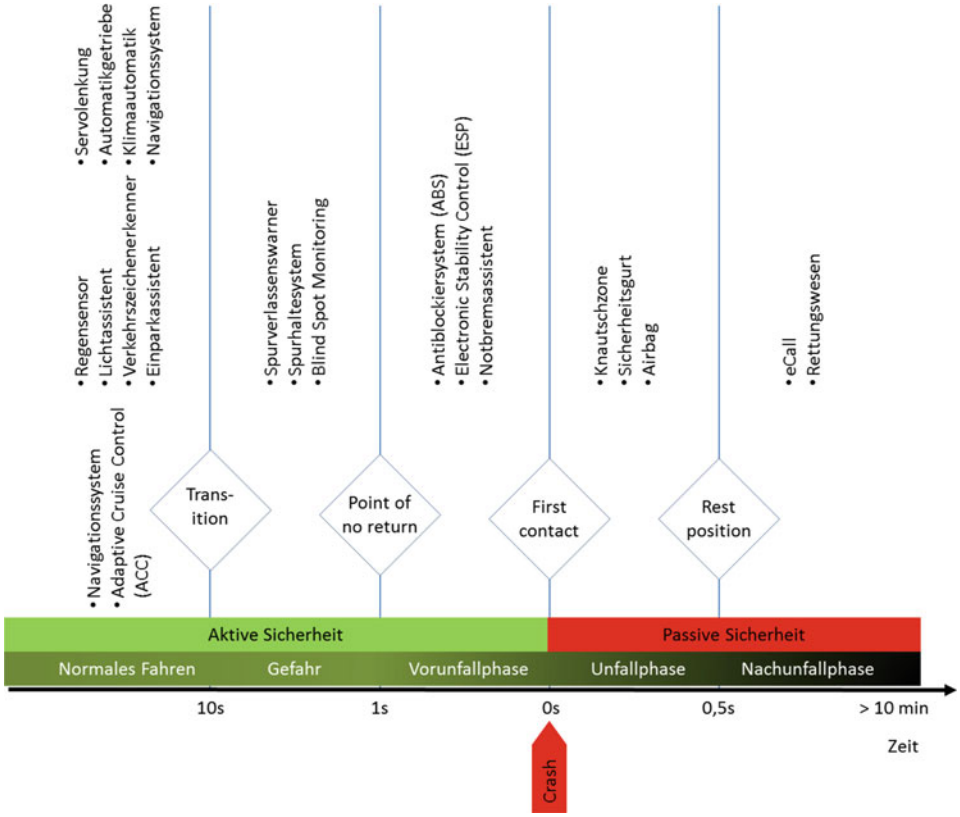


Abb. 9.24 Zuordnung von Fahrerassistenzsystemen zu Phasen kritischere Fahrsituationen (modifiziert nach Maier 2014, auf der Grundlage von Aparicio 2005; SEISS Final Report 2005; Eichberger et al. 2010).

kommt, dass Müdigkeit vor dem eigentlichen Sekundenschlaf subjektiv sehr gut erkannt wird. Häufig ist der Zeitdruck gerade im Geschäftsleben übermächtig, sodass zu befürchten ist, dass Hinweise des Müdigkeitserkenners oft missachtet werden und er deshalb häufig sogar ganz ausgeschaltet wird. Bei Lkw-Fahrern ist die Missachtung des Müdigkeitswarners zudem mit der womöglich erfolglosen Suche nach geeigneten Parkplätzen verbunden (Eichinger 2011).

9.3 Beitrag der Fahrerassistenzsysteme zur Fahrsicherheit

Fahrerassistenzsysteme sollen einen wesentlichen Beitrag für die aktive Sicherheit leisten (siehe auch ▶ Abschn. 9.1). Dafür ist es sinnvoll, den Verlauf vor einem Zusammenstoß (Pre-Crash) in Zeitzonen einzuteilen. Der Bereich mehr als 10 Sekunden vor dem Crash kennzeichnet das normale Fahren. Wenn sich aus diesem heraus eine Gefahrensituation aufbaut, bleibt dem Fahrer bis minimal 1 Sekunde vor der Kollision die Möglichkeit, diese zu vermeiden. In der Zeitspanne bis ca. 1 Sekunde vor dem eigentlichen Crash reichen die möglichen Manöver womöglich nicht mehr aus, den Unfall zu vermeiden. Alles, was nach der Kollision passiert, lässt sich im Einzelnen nicht mehr vorauskalkulieren. Man kann nur versuchen durch z. B. Bremsen/Verzögern , die Folgen so gering wie möglich zu halten (Bereich der passiven Sicherheit). Der Wirkungseinsatz von Fahrerassistenzsystemen lässt sich diesen Zeitzonen zuordnen (Abb. 9.24).

Um den Sicherheitsgewinn von Fahrerassistenzsystemen zu quantifizieren, wurden von Langwieder (2005) sowie von Knoll und Langwieder (2006) neben anderem die Begriffe „Wirkpotenzial“ und

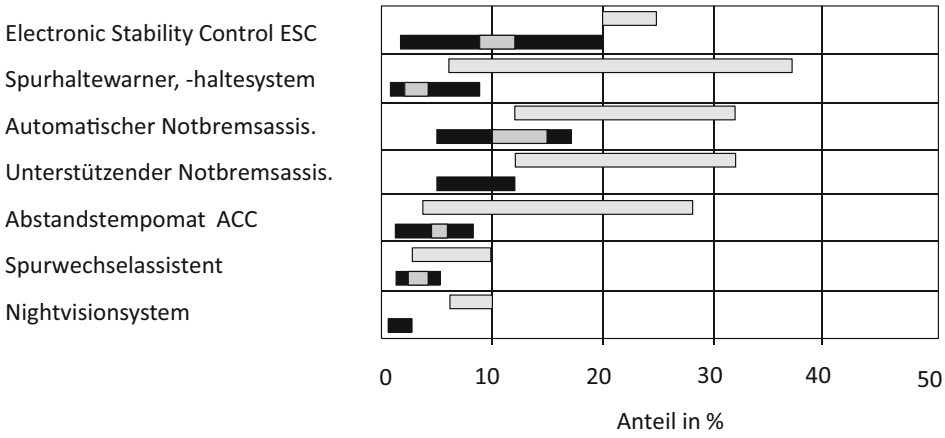


Abb. 9.25 Zusammenstellung der von verschiedenen Autoren geschilderten Bereiche von Wirkpotenzial (grau) und Wirkerwartung verschiedener Assistenzsysteme (schwarz; der helle Bereich gibt jeweils den Medianwert an); nach Maier (2014)

„Wirkerwartung" ins Spiel gebracht. Das ***Wirkpotenzial*** charakterisiert die Häufigkeit bezogen auf die betrachtete Gesamtheit der Fahrzeugunfälle jener Unfallsituationen, für die ein spezielles Fahrerassistenzsystem einen positiven Effekt haben könnte. Es ist definiert durch:

$$\text{Wirkpotenzial} = \frac{\text{Zahl der systemrelevanten Unfälle}}{\text{Alle Fahrzeugunfälle}}$$

Die ***Wirkerwartung*** gibt an, wie groß der Anteil an Fahrzeugunfällen mit Personenschaden ist, der durch das System bei 100 % Marktdurchdringung vermeidbar wäre. Sie ist definiert durch:

$$\text{Wirkerwartung} = \frac{\text{Zahl der durch das System vermeidbaren Unfälle mit Pers.-schaden}}{\text{Alle Unfälle mit Personenschaden}}$$

Abbildung 9.25 gibt auf der Grundlage dieser Formeln eine Abschätzung der einzelnen Assistenzsysteme wieder, die von Maier (2014) zusammengestellt worden ist. Neben der elektronischen Stabilisierungsregelung (ESC), deren Wirksamkeit bereits statistisch abgesichert ist und die daher sowohl in den USA als auch in der EU zukünftig bindend für Neufahrzeuge vorgeschrieben ist, wird in Übereinstimmung mit anderen Autoren dem automatischen Notbremsassistenten das höchste Wirkpotenzial zugeschrieben. Man erkennt aber auch, dass das Wirkpotenzial durchweg höher ist als die Wirkerwartung. Das wird besonders deutlich bei dem Spurhalteassistenten, in dessen Wirkpotenzial noch viele weitere Faktoren (u. a. Alkoholisierung, Geschwindigkeitswahl. u. ä.) eingehen und das deshalb je nach Autor einen weiten Streubereich ausweist. Insgesamt ist jedoch anzumerken, dass die Wirkerwartung mit der relativen Nutzungshäufigkeit multipliziert werden müsste, um – selbst bei vollkommener Marktdurchdringung – eine realistischen Einschätzung der Veränderung des Unfallgeschehens zu erhalten.

Tatsächlich ist die Nutzungshäufigkeit der „Pferdefuß" aller Assistenzsysteme. Abschätzungen zeigen, dass derartige Systeme nur zu maximal 25 % der Fahrzeit eingeschaltet werden (u. a. Sacher 2009; Pereira et al. 2013). Nachdem sich viele Systeme (z. B. ACC) nach einem Eingriff des Fahrers selbstständig abschalten und danach erneut bewusst aktiviert werden müssen, bleiben sie nach einem solchen Vorfall oft lange Zeit ausgeschaltet. Ein weiterer Grund für die geringen Einschaltquoten ist die relativ hohe Zahl von „false alarms", die sich aus den technisch anspruchsvollen Detektieralgorithmen erklären, durch die aus dem „Rauschen der Signale" die jeweils korrekte Reaktion abgeleitet werden soll.

Um zumindest die theoretische Wahrscheinlichkeit für die Wirksamkeit eines Assistenzsystems

abzuschätzen, muss berücksichtigt werden, wie die vom Fahrer und dem Assistenzsystem gebildeten Informationen zusammengeführt werden, so dass sie sich auf das Fahrzeug und damit auf das Fahrergebnis auswirken kann. Abbildung 9.26 zeigt die beiden möglichen Alternativen: entweder kann die Auswahl durch einen Schalter erfolgen, wie es heute bei den meisten Assistenzsystemen der Fall ist, oder die Information von Fahrer und Assistenzsystem wird gleichberechtigt über einen Summenpunkt zusammengeführt (siehe hierzu auch Abb. 9.18 und 9.19). In Abb. 9.26 sind für die Zuverlässigkeit der einzelnen Systeme Annahmen gemacht: wie üblich wird die Fehlerwahrscheinlichkeit des Fahrers für die hochgeübte Tätigkeit des Fahrens selbst mit $E_M = E_{M1} = 10^{-3}$ angenommen[13]. Für das Fahrzeug wird die Fehlerwahrscheinlichkeit auf $E_F = 10^{-5}$ gesetzt, wie sie für konventionelle technische Systeme üblicherweise angenommen werden kann. Für das Assistenzsystem wird relativ optimistisch eine Fehlerwahrscheinlichkeit von 10^{-4} unterstellt. Diese Annahme bezieht sich nicht auf die technische Funktion des Systems selbst. Diese dürfte wie die des Fahrzeugs bei 10^{-5} oder noch besser liegen. Vielmehr soll damit berücksichtigt werden, dass es für jedes Assistenzsystem Situationskonstellationen gibt, die es nicht bewältigen kann. Im Fall des durch den Schalter aktivierten Systems sind nun zwei Fehlerzweige zu berechnen: liegt der Schalter auf dem Fahrer, ist das Assistenzsystem also ausgeschaltet, so errechnet sich die Fehlerwahrscheinlichkeit E_1 des ersten Zweiges aus:

$$\begin{aligned} E_1 &= 1 - (1 - E_{M1})(1 - E_F) \\ &= 1 - (1 - 10^{-3})(1 - 10^{-5}) \\ &= 1 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Für das aktivierte Assistenzsystem errechnet sich die Fehlerwahrscheinlichkeit E_2 mit den hier gemachten Annahmen zu:

$$\begin{aligned} E_2 &= 1 - (1 - E_A)(1 - E_F) \\ &= 1 - (1 - 10^{-4})(1 - 10^{-5}) \\ &= 1 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

Wenn der Schalter wie in Abb. 9.26 gezeigt, durch den Fahrer betätigt wird, wird wegen dessen unsicherer Betätigungswahrscheinlichkeit von ca. 0,25 die an sich mögliche Verbesserung der Fehlerwahrscheinlichkeit durch das Assistenzsystem praktisch auf das Niveau des Fahrers zurückgefahren. Aus diesem Grund wird von manchen Autoren der Nutzen von Assistenzsystemen bezweifelt (z. B. Gründl 2005).

Bei Assistenzsystemen auf dem Stabilisierungsniveau (ABS, ESP, Notbremsassistent) wird der Schalter aber auch aufgrund von technisch gemessenen Bedingungen betätigt. Das ist gerade unter den hier vorliegenden zeitlich engen Bedingungen (im 100 ms-Bereich) sinnvoll, da unter solchen Umständen ein Übersteuern durch den Fahrer aufgrund dessen Reaktionsvermögen gar nicht möglich ist. Dann ist für diese kurze Zeit das hohe technische Niveau wirksam, das dann sogar besser als die hier angenommenen 10^{-4} sein kann.

Anders sieht die Berechnung für den Fall des Zusammenführens der redundanten Informationen über einen Summenpunkt aus. In diesem Fall kommt die Redundanz voll zum Tragen (UND-Verknüpfung: $E_A \cdot E_M$). Die Berechnung ergibt:

$$\begin{aligned} E &= 1 - (1 - E_A \cdot E_M)(1 - E_F) \\ &= 1 - (1 - 10^{-7})(1 - 10^{-5}) \\ &= 1 \cdot 10^{-5} \end{aligned}$$

Durch die parallele Verschaltung von Fahrer und Assistenzsystem können sich die jeweiligen Fehlermöglichkeiten gegenseitig kompensieren und die Fehlerwahrscheinlichkeit reduziert sich sogar auf die des technischen Systems „Fahrzeug".

Der Effekt des Summenpunktes kann über ein aktives Bedienelement (siehe Abb. 9.27) realisiert werden.

Beim ihm erfolgt ebenso wie beim konventionellen Bedienelement die Krafteinwirkung aus der Verarbeitung der Aufgabe. Diese Kraft wird

13 In einer akuten Gefahrensituation oder, wenn der Fahrer unaufmerksam ist, kann diese Fehlerwahrscheinlichkeit noch bedeutend höher sein!

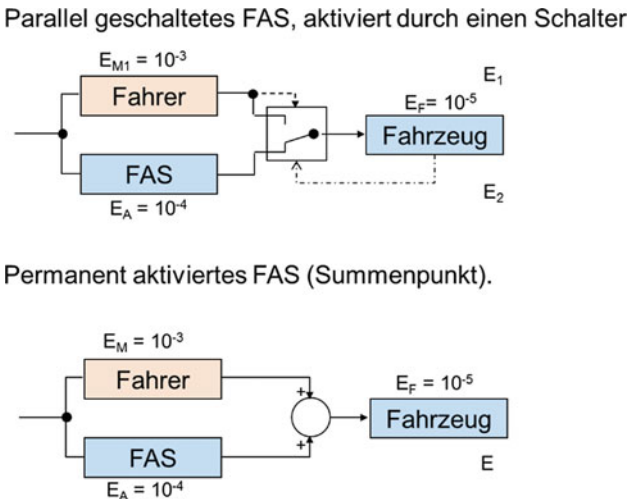


Abb. 9.26 Mögliche Verschaltungen von Fahrer, Assistenzsystem und Fahrzeug (schematisch)

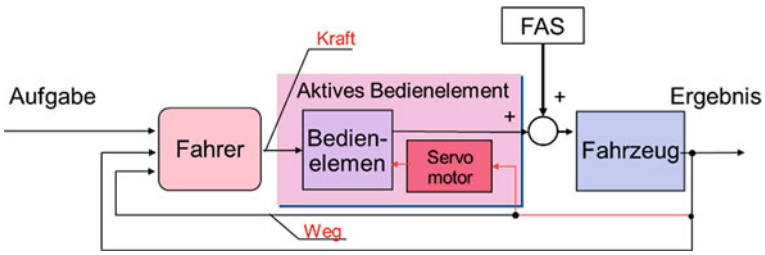


Abb. 9.27 Informationsfluss bei einem aktiven Bedienelement

genutzt, um das Fahrzeug zu beeinflussen, welches selbst wieder das Ergebnis bewerkstelligt. Das Ergebnis wird aber nun an das Bedienelement zurückgemeldet und über einen Servomotor wird dieses in eine dem Ergebnis entsprechende Stellung gebracht. Damit erhält der Fahrer nicht nur über den üblichen optischen Weg Rückmeldung über das Ergebnis, sondern spürt dieses auch am Bedienelement (siehe auch ▶ Abschn. 6.4.3). Der Vorteil des aktiven Bedienelements ist aber nun, dass man zwischen Bedienelement und Fahrzeug die Information aus dem Fahrerassistenzsystem im Sinne eines Summenpunktes einspeisen kann. Dadurch, dass dessen Wirkung auf das Fahrzeug über den Servomotor auch haptisch spürbar wird, erhält der Fahrer unmittelbar die Information vom „Willen" des Fahrerassistenzsystems, gegen den er aber über den Summenpunkt jederzeit „ankämpfen" kann. Damit wird die Version des permanent aktivierten Fahrerassistenzsystems, wie sie in Abb. 9.26 dargestellt wurde, realisiert.

In Tab. 9.9 findet sich eine Zusammenstellung der meisten heute verfügbaren Assistenzsysteme. Es wird dabei untersucht, auf welchem Niveau der Fahraufgabe diese Systeme wirksam sind, ob sie nur warnenden bzw. hinweisenden Charakter haben, ob sie sich über einen Schalter automatisch einschalten bzw. unter bestimmten Bedingungen automatisch ausschalten oder ob sie von Hand ein- bzw. ausgeschaltet werden (Bubb 2013). Es fallen dabei drei Systeme auf, die überhaupt keinen direkten Einfluss auf das Fahrzeug haben: das Navigationssystem liefert *Hinweise* für den Fahrer auf dem Navigationsniveau (siehe auch Abb. 9.20). Seine positive Wirkung für die Sicherheit ist unzweifelhaft, wenn man von der Abwendung absieht, die entsteht, wenn während der Fahrt Navigationseingaben gemacht werden. Das Night-Vision-System kann Hinweise auf dem Führungsniveau liefern. Allerdings ist die Wirksamkeit dieses Systems für die Sicherheit sehr fraglich, da in einer kritischen Situation die dort verfügbare Information durch einen von der Straße abwendenden Blick aufge-

Tab. 9.9 Analyse der heute verfügbaren Assistenzsysteme unter dem Aspekt des Niveaus ihrer Wirksamkeit und der Wirkungsweise

Assistenzsysteme		Wirksam auf Niveau von			Wirkungsweise				
		Navigation	Führung	Stabilisierung	Warn./Hinweis	Schalter automat an	Schalter automat aus	Schalter Hand an/aus	Summenpkt.
Q&L	Navigationssystem	X						X	
Querf.	Spurhaltesystem		X	X				X	X
	Spurhaltewarner		X		X			X	
	Spurwechselassistent		X		X			X	
Längsf.	Abstandstempomat ACC		X	X			X	X	
	Automatischer Notbremsassis.		X	X				X	
	Unterstützender Notbremsassis.			X		X			
Q&L	Nightvisionsystem		X		X			X	
Q	Electronic Stability Control ESC			X		X	X	(X)	
L	Antiblockiersystem ABS			X		X	X		
	Müdigkeitswarner	X	X	X	X			X	

nommen werden müsste (siehe Bergmeier 2009). Systeme, bei denen die Information des Nightvisionsystems in ein automatisierten Kollisionsvermeidungssystem eingespeist wird, sind anders zu bewerten. Der Müdigkeitswarner wirkt zwar über den Fahrer auf allen Fahraufgabenniveaus, hat aber nur sicherheitstechnische Wirksamkeit, wenn sein Hinweis befolgt wird und die Fahrt für eine Ruhepause unterbrochen wird.

Assistenzsysteme auf dem Stabilisierungsniveau sind fast ausschließlich dadurch charakterisiert, dass sie in einer extremen Situation kurzfristig automatisch eingeschaltet werden und der Fahrer in dieser Phase keine Möglichkeit hat, in das System einzugreifen. Im Sinne der Abb. 9.24 werden diese Systeme in der Phase vor der Kollision aktiv. Wenn durch deren Eingriff die Situation bewältigt worden ist, ohne dass es zum Crash kam, schalten sie sich automatisch wieder aus. Wirkpotential und -erwartung dieser Systeme sind hoch (Abb. 9.25)

Assistenzsysteme auf dem Führungsniveau lassen hohen Sicherheitsgewinn erwarteten. Das wird dadurch gerechtfertigt, dass ungünstige Bedingungen, die durch den Fahrer auf dem Führungsniveau in der Phase des normalen Fahrens geschaffen worden sind (z. B. zu hohe Geschwindigkeit, zu geringer Abstand) dann auf dem Stabilisierungsniveau nicht mehr kompensiert werden können (Point of no return). Allerdings greifen nicht alle Assistenzsysteme auf die Stabilisierungsebene durch, was bedeutet, dass der Fahrer innerhalb eines oft sehr engen Zeitfensters selbst eingreifen muss. Auch dies ist aus sicherheitstechnischen Gründen fragwürdig.

Das einzige auf dem Führungsniveau ansetzende System, das gemäß Tab. 9.9 den Summenpunkt realisiert, ist das Spurhaltesystem. Bei ihm wird auf das Lenkrad eine Rückmeldung (Vibration bzw. sogar korrigierendes Rückstellmoment) gegeben, wenn sich der Fahrer zu stark dem von dem System definierten Fahrspurrand nähert. Der Fahrer kann aber diesen Hinweis jederzeit „überdrücken".

Ansonsten fällt an der Zusammenstellung der Tab. 9.9 auf, dass alle Assistenzsysteme von Hand eingeschaltet werden müssen, was zur Folge hat, dass die bereits erwähnte geringe Einschaltquote wirksam wird. Insgesamt weist die unsystematische Verteilung der Kreuze in Tab. 9.9 auf die aus ergonomischer Sicht schlecht abgestimmte Bedienung- und Wirkphilosophie der Assistenzsysteme hin, was bei dem technisch nicht vorgebildeten Fahrer

zu Verwirrung führen kann. Es ist also die Frage zu stellen, wie durch eine verbesserte Ergonomie der Assistenzsysteme erreicht werden kann, dass die Akzeptanz beim Fahrer erhöht und somit die Sicherheit verbessert wird.

Ein Nachteil vieler heutiger Assistenzsysteme ist deren gegenseitige Unabhängigkeit und oftmals auch die mangelnde Fähigkeit, den zukünftigen Verlauf der Straße korrekt zu berücksichtigen. Ein erster Ansatz, dieses Manko aufzuheben, wurde mit dem Projekt SANTOS (König et al. 2003) unternommen. Unter anderem wurde dabei über das aktive Gaspedal eine Geschwindigkeitsempfehlung auf der Basis der so genannten V85[14] vorgenommen, was aber bei vielen Versuchsfahrern auf Ablehnung stieß. Im Sinne des heute wegen des notwendigen sparsamen Energieverbrauchs von Verbrennungs- wie Elektromotorfahrzeugen wieder an Bedeutung gewinnenden „vorausschauenden Fahrens" bekommt dieser Bezug auf die im Navigationssystem hinterlegte Information neue Impulse. Die Ergebnisse von SANTOS und viele weitere Versuche (u. a. Penka 2001; Lange 2008) zeigen aber auch, dass der aktive Zugriff auf das Fahrerverhalten maßvoll und mit Bedacht gewählt werden muss, um die Akzeptanz solcher Systeme nicht zu gefährden. Insbesondere ist eine gewisse Eigenanpassung durch den Fahrer vorzusehen. Bei der Querführung fördert ein breiter nicht assistierter Korridor gegenüber einer Engführung die Akzeptanz. Bei der Längsführung muss die Sicherheitszeitlücke in Grenzen vom Fahrer wählbar sein ein.

9.4 Ergonomische Gestaltung

9.4.1 Bedienung und Anzeige

Gemäß ◘ Tab. 9.9 würde aus sicherheitstechnischer Sicht die ideale Auslegung eines Assistenzsystems folgendermaßen aussehen:

- Wirksamkeit auf dem Führungsniveau,
- Durchgriff auf das Stabilisierungsniveau (automatischer Eingriff),
- automatisches Einschalten, ggf. auch automatisches Abschalten, was aber angezeigt werden muss,
- nicht von Hand auf Dauer abschaltbar,
- Realisierung des Summenpunktes in der Form, dass die Intention des Assistenzsystems am Gaspedal/Bremspedal bzw. Lenkrad spürbar ist, aber jederzeit zu überdrücken ist (das Assistenzsystem stellt also keine Automatik im eigentlichen Sinn dar)
- Technisch nahezu fehlerfreie Realisierung/Verfügbarkeit

Die geforderte Realisierung des Summenpunktes weist auf ein Dilemma hin: während das Lenkrad grundsätzlich einen haptisch spürbaren Kraft-/Momentenaufschlag zulässt, der sowohl in als auch gegen die Intention des Fahrers gerichtet sein kann, ist dies bei Gas- und Bremspedal nur eingeschränkt möglich. Bedingt durch die gegebene technische Entwicklung wird die Längsdynamik des Fahrzeugs nicht durch ein, sondern durch zwei Bedienelemente beeinflusst (abgesehen von noch weiteren Bedienelementen wie Kupplung und Schalthebel, die aber wegfallen können), die beide keine +/– Charakteristik aufweisen, wie das Lenkrad. Es nimmt also nicht wunder, dass in vielen wissenschaftlichen Untersuchungen zu einer innovativen Fahrzeugsteuerung auf ein zweidimensionales joystick-artiges Bedienelement ausgewichen wird, da sich hier Assistenzfunktionen weitaus widerspruchsfreier integrieren lassen (Bolte 1991; Eckstein 2001; Penka 2001). Neuerdings wurde von Kienle (2015) der schon erwähnte Joke realisiert, der sich in Bedienung und Aussehen von der konventionellen Bedienung nicht so radikal abhebt und folglich bei Probanden auch auf höhere Akzeptanz stößt. Verzichtet man aber auf eine radikale Änderung, so bietet sich für die Längsdynamik schon seit einiger Zeit das aktive Gaspedal (AGP) an, das eine von dem System beeinflussbare Rückstellkraft zu erzeugen vermag. Dem Fahrer kann so beispielsweise angezeigt werden, dass er zu schnell fährt oder dass der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zu gering ist. Ist eine Korrektur nur durch Bremsen möglich, wird in diesem Fall das AGP vollkommen in die Nullposition gefahren;

14 85 % der beobachteten Fahrer fahren langsamer als diese Geschwindigkeit; für die V85 gibt es aus dem Bereich des Straßenbaus Formeln, die erlauben, sie aus dem Kurvenradius und dem sonstigen Streckenverlauf zu berechnen. Sie kann somit aus den Daten eines Navigationssystems bestimmt werden.

Abb. 9.28 Kontaktanaloges HUD (kHUD) mit Abstandsbalken (Prototyp Audi)

eine haptische Rückmeldung über den nun erfolgten Bremsvorgang ist aber nicht möglich (es wäre deshalb durchaus sinnvoll, die Aktivität der Bremse durch eine Leuchte in der Armaturentafel, die mit dem Bremslicht gekoppelt ist, anzuzeigen). Bei einem vom Fahrer initiierten Bremsvorgang ist bei dieser Auslegung ein Abschalten des Systems nicht notwendig, da keinerlei automatisch kontrollierte Vorwärtsbewegung des Fahrzeugs existiert. In Verbindung mit einem Spurführungsassistenten (LKS) mit breiter Gasse (siehe Abb. 9.4a) würde so eine Fahrer-Fahrzeug-Interaktion geschaffen, die ständig in Betrieb sein könnte und die den Fahrer nur beim Erreichen von objektiven Grenzen informiert. Eine weitere Unterstützung des Fahrers würde erreicht, wenn die von der Verkehrszeichenerkennung bzw. von dem Navigationssystem vermittelte Geschwindigkeitsbegrenzung automatisch von dem ACC-System als Sollgeschwindigkeit übernommen wird. Mit der üblichen Tempomatbedienung zur Einstellung der Sollgeschwindigkeit könnte dann der Fahrer akut individuelle Korrekturen vornehmen. Damit würde auch der von einigen Fahrzeugherstellern angebotene Speed-Limiter, der ja sonst eine eigene Bedienung benötigt, überflüssig werden[15]. Diese automatische Übernahme der maximal erlaubten Geschwindigkeit hat sich in Versuchen insgesamt als stressfreier erwiesen und liefert auch die besseren objektiven Werte, wird aber zugleich subjektiv als „unsportlich" beurteilt (Lange 2008).

Technisch bedingt gibt es viele Situationen, in denen die Funktion des Assistenzsystems nicht gewährleistet werden kann (siehe die einzelnen Einschränkungen der Verfügbarkeit von Assistenzsystemen, die in ▶ Abschn. 9.2.1.3 beschrieben sind). Sind solche Grenzen erreicht, muss dies dem Fahrer durch Anzeigen kenntlich gemacht werden. Primär kommen dafür die optischen wie auch akustischen Anzeigen infrage, die auch heute schon im Zusammenhang mit den Assistenzsystemen im Einsatz sind. Allerdings sind diese Anzeigen nicht in jeder Situation situationsbezogen. Wie Lange (2008) zeigen konnte, wird der „Ratschlag" des Assistenzsystems umso mehr akzeptiert, je besser er aus der Situation heraus verstanden wird. Er formulierte dafür den Satz: *„Der Fahrer sollte haptisch vermittelt bekommen,* ***was*** *er zu tun soll und optisch,* ***warum*** *er es tun soll".*

Die wirkungsvollste optische Darstellung wird, sowohl nach Langes als auch anderen Versuchen durch das HUD (Head-Up-Display) erreicht, weil dieses die Information vermitteln kann, ohne den Blick von der Straße zu nehmen. Während beim konventionellen HUD durch die Spiegeltechnik ein Bild etwa in Höhe der Motorhaube auf einer senkrecht stehenden virtuellen Ebene in einer Entfernung

15 Der hier diskutierte Vorschlag unterscheidet sich von der Auslegung, die in dem oben erwähnten SANTOS-Projekt realisiert wurde: während dort über das AGP zu jeder Zeit ein konkreter Geschwindigkeitsvorschlag gemacht wurde, wird hier nur ein Hinweis auf die maximal erlaubte Geschwindigkeit gegeben.

Abb. 9.29 Anzeige einer notwendigen Querführungskorrektur im kHUD (Lange 2008)

von ca. 2–3 m erzeugt wird, liegt beim kontaktanalogen Head-Up-Display (kHUD) die virtuelle Ebene unmittelbar auf der Straße, so dass Objekte in der korrekten Entfernung angezeigt werden können. Die wahrgenommene Position ist dann nicht von der Kopfposition des Fahrers abhängig. (Bubb 1975; Schneid 2009). In der von Bubb vorgeschlagenen und auch von Schneid realisierten Form wird ein vor dem Fahrzeug herfahrender Querbalken angezeigt, dessen Entfernung geschwindigkeitsabhängig der Distanz entspricht, die in ca. 1,2–1,5 Sekunden durchfahren wird. Diese Distanz sollte vom Fahrer in Grenzen wählbar sein und der Regeldistanz des ACC-Systems entsprechen. Abbildung 9.28 zeigt diese Form der Anzeige am Beispiel eines bei Audi entwickelten Prototyps (Schneid 2009). Wenn in der dort gezeigten Situation die ACC-Regelung einsetzt, würde das aktive Gaspedal durch seine Rückbewegung dem Fahrer anzeigen, dass die Geschwindigkeit reduziert werden muss und gleichzeitig durch eine Veränderung der Balkenfarbe, warum dies notwendig ist. Die Summenpunktforderung ist erfüllt, indem der Fahrer über den künstlichen Druckpunkt des Gaspedals hinaus willentlich die Distanz zum vorausfahrenden Fahrzeug gegen den „Rat“ des ACC vermindern könnte, bzw. durch Reduzierung des Drucks auf das Gaspedal auch die Distanz vergrößern bzw. die Geschwindigkeit reduzieren könnte. Auch Fehlfunktionen des ACC würden dem Fahrer einsichtig werden, indem er beispielsweise durch die Lage des Balkens erkennt, dass er sich keineswegs auf Kollisionskurs zu einem gefährlichen Hindernis befindet.

Auch die Einsicht in eine notwendige Querführungskorrektur wird durch das kHUD erreicht. Nach einem Vorschlag von Lange (2008) würde simultan mit dem vom Spurhaltesystem erzeugten Rückstellmoment an dem Abstandsbalken ein Pfeil eingeblendet werden, der diesen in die richtige Richtung „drückt“ (Abb. 9.29). Somit würde der Fahrer intuitiv verstehen, warum er jetzt ein entsprechendes zusätzliches Moment am Lenkrad spürt.

Auch bei Nichtfunktion des Assistenzsystems sollte die kHUD-Anzeige erhalten bleiben, ohne dass es allerdings dann zu einem regelnden Eingriff kommt. Die Anzeige des Abstandsbalkens, dessen Querlage durch die augenblickliche Stellung des Lenkrads bestimmt wird, gibt in dem Fall an, wohin sich das Fahrzeug innerhalb der nächsten 1,2–1,5 Sekunden bewegen wird. Der Fahrer wird also bei eingeschaltetem Assistenzsystem das korrekte Verhalten in Bezug auf die Außenwelt durch die kHUD-Anzeige erfahren, ein Verhalten, das er dann gewohnheitsmäßig selbst übernehmen sollte, wenn das Assistenzsystem nicht in Funktion ist. Israel (2013) konnte zeigen, dass der Abstandsbalken, der der Fahrzeugbreite entspricht, auch schwierige Engpässe an Baustellen mit ruhiger Hand und reduzierter Beanspruchung passieren lässt, auch dann, wenn der Spurführungsassistent nicht aktiv sein kann. Abbildung 9.30 zeigt weitere Vorschläge möglicher Anzeigen im kHUD wie Spurhaltung, Ausweichempfehlung bei Kollisionswarnung und vor allem eine kontaktanaloge Navigationsanzeige,

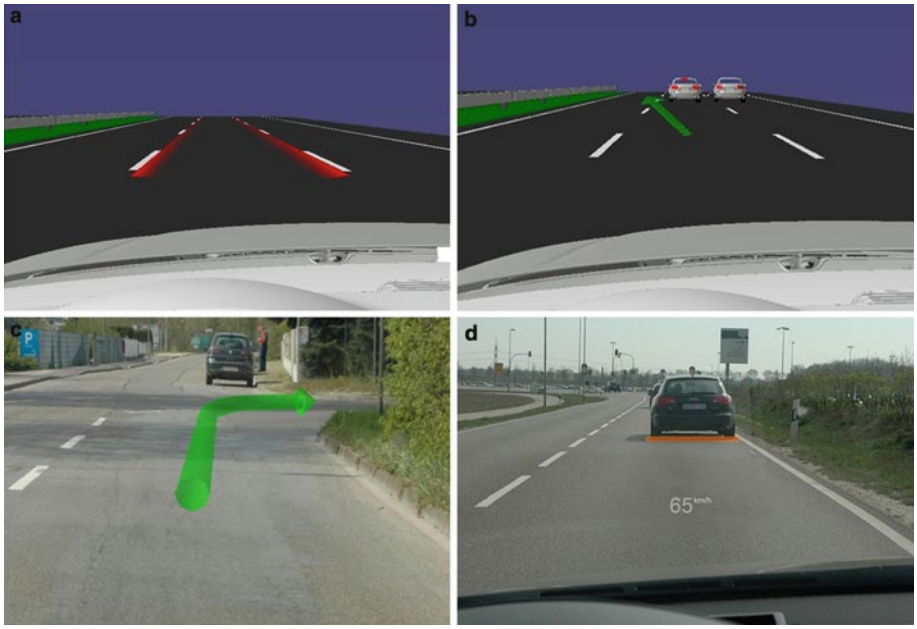


Abb. 9.30 Weitere mögliche Anzeigekonzepte für Spurhaltung, Ausweichempfehlung bei Kollisionswarnung, Navigation und Sicherheitsabstand (Israel und Bubb 2010)

die nach den Untersuchungen von Israel (2013) an schwierigen Kreuzungen eine deutlich verringerte Anzahl von Fehlentscheidungen bewirkt.

Damböck et al. (2012) und Weißgerber et al. (2012) wiesen in einer Version, bei der der von dem Assistenzsystem vorgeschlagene Kurs durch eine Trajektorie im kHUD angezeigt wird, nach, dass im Fall einer Fehlfunktion dieses Assistenzsystems die Fahrer schneller und genauer eine Korrektur vornehmen als ohne eine solche Anzeige.

Mit den hier vorgestellten Interaktionsvarianten von Assistenzsystemen ist nur eine Reduktion der Längs- und Querführungsunfälle zu erwarten. Das Problem der Kreuzungsunfälle und insbesondere des dichten und sehr heterogenen Verkehrs in Innenstädten ist damit noch nicht adressiert. Die neuerdings vorgestellten Systeme (z. B. Ford Focus), die bei einem Unterschreiten des Sicherheitsabstandes im Geschwindigkeitsbereich des Stadtverkehrs (≤ 50 km/h) autonom eingreifen, lassen sich in das hier vorgestellte System allerdings widerspruchslos integrieren. Zurzeit existieren hierzu im Zusammenwirken verschiedener Institute und der Industrie im Rahmen des Urban-Projektes intensive Aktivitäten. Auch in diesem Zusammenhang werden unter anderem die Chance und das Potenzial des konventionellen HUD wie des kHUD ausgelotet. Das angesprochene Summenpunktproblem bleibt dabei virulent.

Oft werden Assistenzsysteme als „Spaßbremse" apostrophiert. Wie viele Beispiele belegen, vermitteln solche Dinge Handlungsspaß, bei denen man zu einer irgendwie gearteten Grenze vordringt und nun die Gratwanderung versucht, einerseits beim Überschreiten der Grenze nicht „abzustürzen" und andererseits nicht in die Belanglosigkeit des Reizlosen zurückzufallen (siehe hierzu auch ▶ Abschn. 3.2.2 und Abb. 3.51). Aus sicherheitstechnischen Gründen darf diese subjektive Grenze aber nicht im Bereich objektiver Gefahr liegen. Die hier vorgeschlagene Kombination aus haptischer Rückmeldung und optischer Anzeige der gesetzten Grenze könnte den Effekt des Spaßes mit dem der Sicherheit verbinden. Der Spaß sollte dadurch entstehen, möglichst nahe an die im kHUD gesehene Grenze heranzurücken, die nun nicht mehr aus der Erfahrung irgendwie gefühlt werden muss (siehe hierzu Abb. 2.24), sondern durch Messung objektiviert ist. Im Detail ist zum Erreichen dieses Ziels aber noch weiterer Forschungsaufwand notwendig.

9.4.2 Unterscheidbarkeit der Modi eines Fahrerassistenzsystems

Bereits aus den Kategorisierungsansätzen, die in ▶ Abschn. 9.2.2 dargestellt worden sind, geht hervor, dass man bei der zukünftigen Entwicklung von unterschiedlichen Niveaus des Automatisierungsgrades, der durch Assistenzsysteme bereitgestellt wird, ausgehen muss. Im Hinblick auf die Akzeptanz sind die Integration der Bedienung und insbesondere die Transition zwischen den verschiedenen Assistenzmodi von herausragender Bedeutung. Lindberg (2007, 2012) hat sich mit der Frage beschäftigt, auf welche Weise verschiedene Fahrerassistenzsysteme im Bereich der Querführung integriert werden können und wie darüber hinaus eine Integration von Fahrerassistenzsystemen erfolgen kann, mit der die Erwartungen des Nutzers erfüllt werden. Dabei zeigt sich, dass der Ort der Unterstützung relativ zum Fahrzeug und die Kritikalität des Ereignisses mögliche Kategoriensysteme darstellen. Wimmer (2014) hat sich mit der Gestaltung von Bedienelementen und Anzeigen für unterschiedliche Assistenzmodi sowohl von der anthropometrischen wie von der systemergonomischen Seite auseinandergesetzt. Sein Fokus liegt dabei auf der Bedienung komfortorientierter, kontinuierlich auf der Führungsebene eingreifender Fahrerassistenzsysteme. Ziel ist dabei u. a. die Schaffung einer für den Fahrer klaren und verständlichen Abgrenzung dieser Modi gegeneinander. Auf der Grundlage der dort wiedergegebenen ausführlichen Diskussion und der hier vorgebrachten Überlegungen sind aus ergonomischer Sicht folgende 5 Modi zu unterscheiden:

- ***„manuelles Fahren" MF***: die auf der Stabilisierungsebene arbeitenden Systeme ESP, ABS Notbremsassistent und Spurverlassenswarner sind hier selbstverständlicher Bestandteil. Das kHUD sollte in der oben beschriebenen Form ständig verfügbar sein.
- ***„Unterstütztes Fahren" UF***: Bestandteil sind die auf der Führungsebene eingreifenden Systeme ACC in Verbindung mit dem aktiven Gaspedal und Spurführungsassistent. Information über die Aktivitäten der beiden Assistenzsysteme werden im kHUD in der oben beschriebenen Form angezeigt.
- ***„Teilautomatisiertes Fahren" TA***: ACC stellt die heute üblichen Funktionen zur Verfügung. Am Spurführungsassistenten wird eine engere Spurführung eingeschaltet. Die Anzeige im kHUD entspricht dem Modus UF.
- ***„Vollautomatisches Fahren" VA***: zusätzlich zu den Funktionen von TA kommt die Möglichkeit einer Manöverschnittstelle, durch welche der Fahrer im Sinne des Conduct-by-Wire (sehe ▶ Abschn. 9.2.2) bestimmte Manöver in Auftrag geben kann. Im kHUD werden – soweit dies technisch möglich ist – die entsprechenden Manöver visualisiert.
- ***„Autonomes Fahren" AUTON***: der Fahrer muss sich nicht mit dem Fahren auseinandersetzen und kann andere davon unabhängige Tätigkeiten durchführen. Falls der Zustand AUTON nicht mehr haltbar ist, muss rechtzeitig zur Übernahme aufgefordert werden (nach den Untersuchungen von Damböck 2014, mindestens 6–8 Sekunden vor dem eigentlichen Systemausfall, damit eine für die Reaktion notwendige *Situation Awareness* sichergestellt werden kann. Insbesondere, wenn man unvorhergesehene Systemausfälle mit ins Kalkül zieht, ist dies eine praktisch nicht erfüllbare Forderung).

Im Gegensatz zu der klaren Trennung zwischen den einzelnen Modi sieht das in ▶ Abschn. 9.2.2 erwähnte H-Mode-Konzept einen kontinuierlichen Übergang zwischen diesen vor.

Wimmer verwendet in seinen Untersuchungen vier dieser Modi. Der Modus UF ist bei ihm nicht vorgesehen. Er sieht keine Rückmeldung im kHUD im obigen Sinn, sondern rückmeldende Anzeigen im konventionellen HUD vor. Für den Fall des Ausfalls oder des Erreichens der Systemgrenzen des FAS muss der Fahrer in allen Modi die Rückfallebene darstellen. Deshalb ist grundsätzlich jederzeit die Aufmerksamkeitsbereitschaft des Fahrers zu überwachen. Wimmer schlägt dafür den Einsatz des Potenzialtriggers vor (siehe ▶ Abschn. 9.2.3)

Als Beispiel für die Bedienung des Umschaltens zwischen den verschiedenen Modi wird aus der Untersuchung von Wimmer (2014) die Variante Drehdrücksteller (DDS), die in seinen Versuchen seitens der Probanden die größte Präferenz erhalten hat,

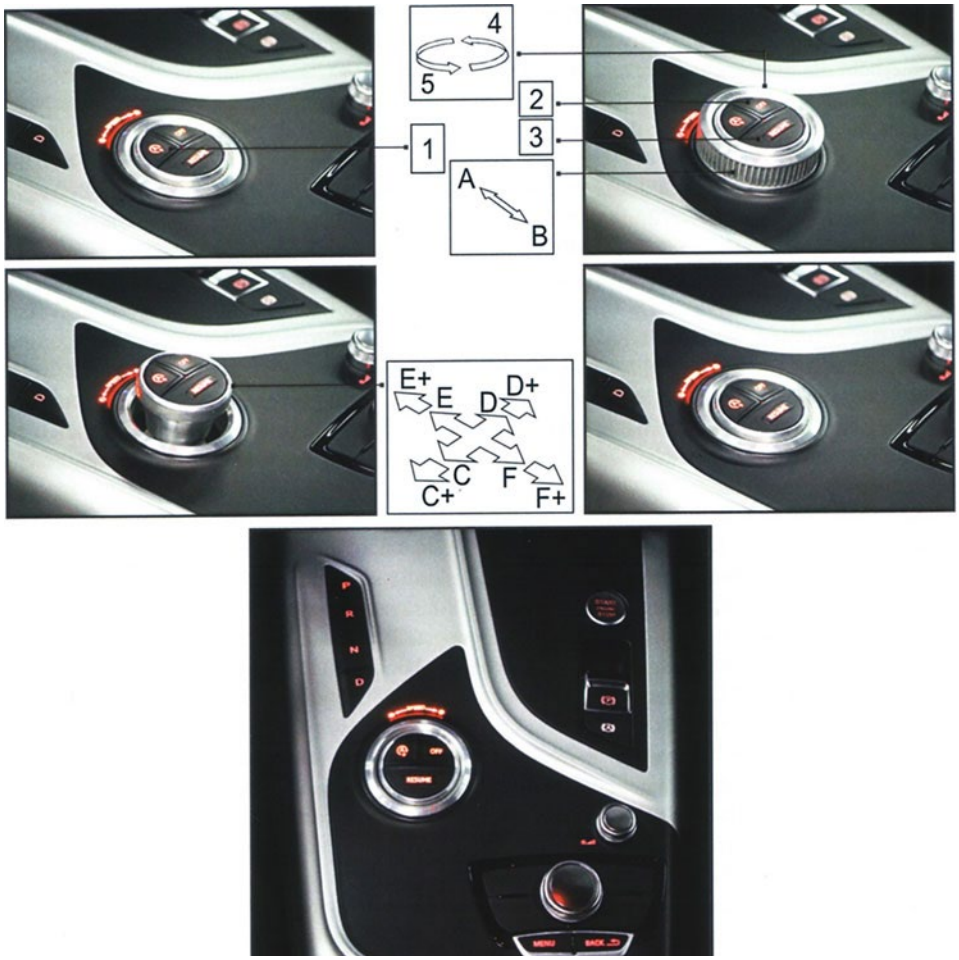


Abb. 9.31 Prototypische Umsetzung eines integrativen Stellelements für das Umschalten zwischen verschiedenen Fahrerassistenzmodi. Hier in Form eines Drehdrückstellers (aus Wimmer 2014) **a** Modus MF, **b** Modus TA, **c** Modus VA, **d** AUTON, **e** Integration des Stellelements in der Mittenkonsole

vorgestellt (siehe Abb. 9.31)[16]. Durch ein formvariables Betätigungselement, welches die Funktionen eines Drehdrückstellers erheblich erweitert und das in anthropometrisch günstiger Position in der Mittelkonsole untergebracht ist, werden die vier Modi ausgewählt.

- Ein wesentliches Element dieses Stellteils ist die Taste A+ (① in Abb. 9.31a). Durch Druck auf diese Taste wird jeweils die nächsthöhere Automatikstufe angefordert. Im Modus MF ist das Bedienelement in der Mittelkonsole versenkt, lediglich das Tastenfeld ist für den Fahrer erreichbar.
- Durch Betätigen der Taste A+ wird der Modus TA aktiviert. Ist dieser Modus sensortechnisch verfügbar, erhebt sich der gesamte DDS automatisch aus der Mittelkonsole (Abb. 9.31b). Rechts neben der A+-Taste befindet sich die OFF-Taste (② in Abb. 9.31), durch welche Modus-übergreifend die Deaktivierung des

16 In der Arbeit von Wimmer sind einerseits grundlegende systemergonomische Überlegungen zu den unterschiedlichen Modi sowie anthropometrische Aspekte, die in diesem Zusammenhang eine Rolle spielen, zu finden. Außerdem werden noch weitere Bedienkonzepte diskutiert, deren Präsentation aber über den hier gesetzten Rahmen hinausgehen würde.

aktuell wirkenden Automationsmodus bewirkt werden kann. Eine Short-Push-Betätigung bewirkt einen Stand-by-Zustand des Modus TA, eine Long-push-Betätigung lässt das System in den Modus MF zurückkehren. Ist aus technischen Gründen – beispielsweise durch Betätigung der Bremse – ACC deaktiviert worden, so kann durch Drücken der darunter liegende RESUME-Taste (③ in Abb. 9.31) die Automatikfunktion wieder aufgenommen werden. Durch Drehen des Rings verstellt der Fahrer die Sollgeschwindigkeit. In dem der DDS durch eine monostabile Short-Push-Betätigung nach vorne gedrückt wird, wird der vom ACC eingenommene Abstand um eine Stufe reduziert, bzw. durch eine entsprechende Betätigung des DDS nach hinten um eine Stufe verlängert (Bewegung A ↔ B).

- Durch erneutes Drücken der A+ Taste aktiviert der Fahrer bei gegebener Systemverfügbarkeit den Modus VA. Nun senkt sich der Drehring in die Mittelkonsole ab. Der verbleibende sich nach unten konisch verjüngende Joystick enthält auf der Oberseite die beschriebene Tasteneinheit, deren Tasten auch in diesem Modus die oben beschriebene Bedeutung beibehalten (Abb. 9.31c) haben. Durch die glatte, metallische Oberfläche und die veränderte Betätigungscharakteristik differenziert sich das Bedienelement im Modus VA sowohl haptisch als auch optisch vom Modus TA. Diesen Stick nutzt der Fahrer nun, um unterschiedliche Manöver zu „beauftragen". Durch Drücken nach vorne bzw. hinten kann der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug innerhalb der erlaubten Grenzen variiert werden (Bewegung E/E+ ↔ F/F+) und durch Bewegung des Joysticks nach rechts bzw. links die Position innerhalb des Fahrstreifens (Bewegung C/C+ ↔ D/D+). Der als sich selbst zentrierendes, aktives Bedienelement ausgelegte Joystick gibt durch einen Anstieg der haptisch empfundenen Kraft die jeweiligen Grenzen einer solchen Beauftragung an. Durch Überwinden eines kleineren „Kraftberges" (z. B. C+) kann der Auftrag zu einem Spurwechsel erfolgen und durch Bewegung des Joysticks nach vorne (E+) ein Überholmanöver indiziert werden. Befindet sich der Fahrer auf Parkplatzsuche, so induzieren entsprechende raumkompatible Bewegungen ein automatisches Einparkmanöver. Entsprechendes gilt natürlich auch für das Verlassen des Parkplatzes.
- Durch erneutes Drücken der Taste A+ wird das System in den Modus AUTON geschaltet (Abb. 9.31d). Sofern von der Sensorseite die entsprechenden Bedingungen gegeben sind, senkt sich nun das Stickelement in die Mittelkonsole ab. Der DDS ist nun wieder komplett versenkt wie im Zustand MF mit dem Unterschied, dass dem Nutzer nun die Taste OFF zur Deaktivierung der Automation zur Verfügung steht[17].

In das hier beschriebene Konzept ließe sich die bei Wimmer nicht untersuchte Funktion UF ohne Schwierigkeiten einfügen. Sie würde sich von der Konstellation für den Modus TA nicht unterscheiden. Nur die Tasten OFF und RESUME wären unter dieser Bedingung inaktiv. Bei dem Konzept von Wimmer befindet sich das Fahrzeug nach dem Start im Modus MF. Aus sicherheitstechnischen Gründen wäre es bei dem hier ergänzten Konzept sinnvoll, stattdessen beim Fahrzeugstart den Modus UF vorzusehen. Dann müsste der Fahrer gegebenenfalls aktiv auf den Modus MF zurückschalten, so wie es heute bereits bei dem Deaktivieren des ESP der Fall ist. Die unter ▶ Abschn. 9.3 geforderte ständige Verfügbarkeit der Assistenzfunktion wäre so wesentlich besser garantiert, als wenn der Fahrer von einem niedrigen zu einem höheren Assistenzniveau hoch schalten müsste.

Im Zusammenhang mit den verschiedenen Modi sei noch einmal auf die Überlegungen in ▶ Abschn. 9.3 hingewiesen, wonach nur durch eine simultane Beteiligung von Fahrer und Assistenzsystem an der Fahraufgabe eine signifikante Verringerung der Gesamtfehlerwahrscheinlichkeit erreicht werden kann. Inwieweit dies in den Modi AS und VA noch gegeben ist, hängt erheblich von

17 In dem ursprünglichen Konzept war vorgesehen, dass sich die jeweils aktiven Tasten auch im Zustand AUTON gegen den versenkten Ring erhaben absetzen. Allerdings ließ sich dies in der prototypischen Realisierung nicht verwirklichen.

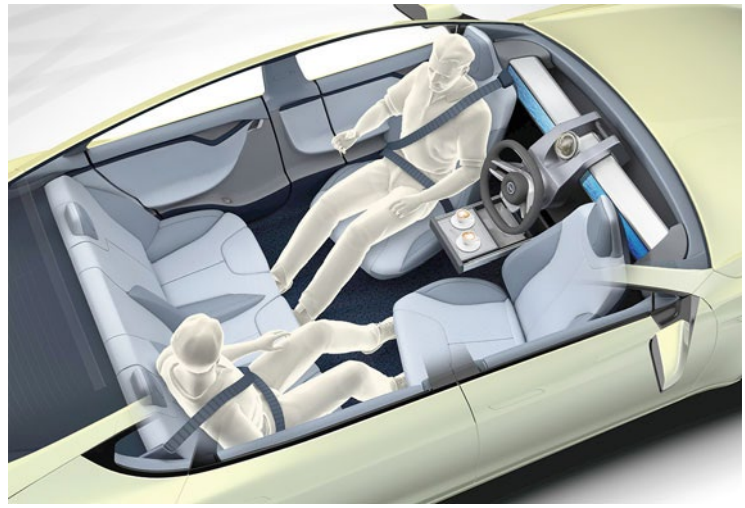


Abb. 9.32 Rinspeed Konzeptstudie XchangeE (Rinderknecht 2014)

der Häufigkeit ab, mit der eine Interaktion seitens des Fahrers gefordert wird. Bereits für das heutige ACC werden in der Literatur Bedenken geäußert, dass der Fahrer dadurch seine Aufmerksamkeit von dem Fahrprozess abwendet und sich vermehrt tertiären Aufgaben zuwendet (siehe die Argumentation in ▶ Abschn. 9.2.1). Es ist zudem fraglich, ob der erhoffte Sicherheitsgewinn bei vollkommen autonomen Fahren (Modus AUTON) überhaupt erreicht werden kann. Dennoch spielt das autonom fahrende Fahrzeug in der heutigen Diskussion eine bedeutende Rolle. Als Beispiel dafür, welche gestalterischen Konsequenzen sich daraus ergeben könnten, wird auf die Konzeptstudie von Rinspeed hingewiesen (Rinderknecht 2014; Abb. 9.32). Berücksichtigt man die bereits zitierte Arbeit von Damböck (2014), wonach eine Mindestzeit von 6–8 Sekunden notwendig ist, um sich bei der Aufforderung zur Übernahme der Fahraufgabe aus sechs jetzt wieder einer tertiären Tätigkeit wieder auf die Fahraufgabe zu konzentrieren, so scheint es allerdings unmöglich, bei gänzlichem Umorientierung des Fahrzeuginnenraums innerhalb einer derartig kurzen Zeit wieder eine Fahrerposition einzunehmen.

Literatur

Verwendete Literatur

Acarman, T., Liu, Y., Zgüner, Ö.Ü.: Intelligent cruise control stop and go with and without communication. In: Institute Of Electrical And Electronics Engineers, Inc (IEEE) (Hrsg.) American Control Conference, S. 4356–4361. IEEE, Minneapolis, USA (2006)

Akamatsu, M., Green, P., Bengler, K.: Automotive Technology and Human Factors Research: Past, Present, and Future. In International Journal of Vehicular Technology (2013). Article ID 526180, 27 pages, http://dx.doi.org/10.1155/2013/526180 doi:10.1155/2013/526180

Alkim, P.T., Bootsma, G., Hoogendoorn, P.S.: Field Operational Test "The Assisted Driver". In: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc (IEEE) (Hrsg.) IEEE Intelligent Vehicles Symposium: Tagung Istanbul, Turkey, S. 1198–1203. IEEE Computer Society Press, Istandbul (2007)

Altmüller, T.: Driver Monitoring and Drowsiness Detection by Steering Signal Analysis. Dissertation an der Universität der Bundeswehr München, Neubiberg (2007)

Aparicio, F.: EEVC WG19- Activities on primary and secondary safety interaction. In NHTSA (Hrsg.): Proceedings in the 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)(Paper Number 05-9462), Washington D.C. (2005)

Bartels, A., Steinmeyer, S., Brosig, S., Spichalsky, C.: Fahrstreifenwechselassistenz. In: Winner, Hakuli, H.S., Wolf, G. (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme – Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 2. Aufl. ATZ/MTZ – Fachbuch, Wiesbaden (2012). Kap 36

Bergmeier, U.: Kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem – Entwicklung und experimentelle Absicherung. Dissertation an der technischen Universität München (2009)

Bolte, U.: Das aktive Stellteil – ein ergonomisches Bedienkonzept Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 17 "Biotechnik". VDI-Verlag, Düsseldorf (1991)

Bosch: Sicherheits- und Komfortsysteme - Funktion, Regelung und Komponenten. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden (2004)

Bosch-Studie zu Fahrerassistenzsystemen: Fahrerassistenzsysteme – wie viel Unterstützung wünschen deutsche Autofahrer? (2012). www. Bosch-kraftfahrzeugtechnik.de

Bubb, H.: Untersuchung über die Anzeige des Bremsweges im Kraftfahrzeug. Dissertation, Technische Universität München (1975)

Bubb, H.: Menschliche Zuverlässigkeit und sicheres Fahren – ein Widerspruch? In: Winner, H., Bruder, R. (Hrsg.) Maßstäbe des sicheren Fahrens Darmstädter Kolloquium, Ergonomie, Stuttgart, 6./7. März 2013. S. 107–132. (2013)

Buld, S., Krüger, H.-P.: Wirkung von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit: Projekt: EMPHASIS. Effort-Management und Performance-Handling in sicherheitsrelevanten Situationen (2002)

Buld, S., Krüger, H.-P.: Die Auswirkung von Teilautomation auf das Fahrverhalten. In: Grandt, M. (Hrsg.) Entscheidungsunterstützung für die Fahrzeug- und Prozessführung DGLR-Bericht, Bd. 2003-04, S. 241–253. (2003)

Cauzard, J.P.: SATRE 3 – Results: Differences in Attitude and Opinions of European Motorists with Respect to Traffic Safety Measures and Regulations. In: Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.) Sicher fahren in Europa 5. Symposium, Bd. M161, Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft, Bremerhaven (2003)

Daimler: Zehn Jahre BremsassistentMercedes-Sicherheitssystem bewirkt deutlichen Rückgang schwerer Fußgänger- und Auffahrunfälle. Daimler AG, (2006). Internetquelle: http://media.daimler.com/dcmedia/0--921-49-825551-1-0-0-0-0-1-12635-614226-0-1-0-0-0-0-0.html

Daimler: Reagieren – Pre-SAFE®-Bremse und BAS+: Automatische Vollbremsung. Daimler AG, (2011). Internetquelle: http://www.daimler.com/dccom/0-5-1210220-49-1210348-1-0-0-1210338-0-0-13-0-0-0-0-0-0-0.html

Daimler AG: Bitte nicht einschlafen. Daimler HighTechReport: Faszination Technologie, 2/2008 (2008)

Damböck, D.: Automationseffekte im Fahrzeug – von der Reaktion zur Übernahme. Dissertationsschrift an der Technischen Universität München (2014)

Damböck, D., Weißgerber, T., Kienle, M., Bengler, K.: Evaluation of a Contact Analog Head-Up Display for Highly Automated Driving 4th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (2012)

Doisl, C.: Systemergonomische Analyse von Anzeige- und Bedienkonzepten zur Unterstützung des Parkvorgangs. Dissertationsschrift an der Technischen Universität München (2008)

Donner, E., Winkle, T., Walz, R., Schwarz, J.: RESPONSE 3 Code of Practice für die Entwicklung , Validierung und Markteinführung von Fahrerassistenzsystemen. VDA, Technischer Kongress, Sindelfingen (2007)

Dragutinovic, N., Brookhuis, A.K., Hagenzieker, P.M., Marchau, A.V.: Behavioural Effects of Advanced Cruise Control Use - a meta-analytic approach. European Journal of Transport and Infrastructure Research **5**(4), 267–280 (2005)

Eckstein, L.: Entwicklung und Überprüfung eines Bedienkonzepts und von Algorithmen zum Fahren eines Kraftfahrzeugs mit aktiven Sidesticks Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 12, Bd. 471. VDI-Verlag, Düsseldorf (2001)

Eichberger, A., Tomasch, E., Rohm, R., Steffan, H., Hirschberg, W.: Detailed analysis of the benefit of different traffic safety systems in fatal accidents. In: EVU (Hrsg.) Proceedings of theannual EVU meeting, S. 301–315. EVU-Jahrestagung, Prag (2010)

Eichinger, A. Untersuchungskonzepte für die Evaluation von Systemen zur Erkennung des Fahrerzustandes. BASt-Bericht F 80 (2011)

Eick, E.-M., Debus, G.: Adaptation effects in an automated car following scenario. In: Underwood, G. (Hrsg.) International Conference of Traffic and Transport Psychology: Tagung Amsterdam, Netherlands, S. 243–255 (2005)

Engel, B.: ABS verlängert bei Schnee den Bremsweg. Welt online, 05.01.2009 (Internetquelle: abgerufen am 04.09.2010: http://www.welt.de/article2972775/ABS-verlaenger-bei-Schnee-den-Bremsweg (2009)

Fancher, P., Ervin, R., Sayer, J., Hagan, M., Bogard, S., Bareket, Z., Mefford, M., Haugen, J.: Intelligent Cruise Control Field Operational Test (1998)

Filzek, B.: Abstandsverhalten auf Autobahnen – Fahrer und ACC im Vergleich. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau, Dissertation, 2002 (2002)

Flemisch, F.O., Bengler, K., Bubb, H., Winner, H., Bruder, R.: Towards cooperative guidance and control of highly automated vehicles: H-Mode and Conduct-by-Wire. Ergonomics **02**, 343–360 (2014)

Franz, B., Kauer, M., Schreiber, M., Blanke, A., Distler, S., Bruder, R., Geyer, S.: Maneuver-Based Driving Today and in the Future – Development of a New Human-Machine Interface for Conduct-by-Wire. Paper presented at the 6. VDI Tagung - Der Fahrer im 21. Jahrhundert, Braunschweig, Germany (November 8–9 2011)

Freyer, J.: Vernetzung von Fahrerassistenzsystemen zur Verbesserung des Spurwechselverhaltens von ACC. Neubiberg bei München, Universität der Bundeswehr, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Institut für Arbeitswissenschaft, Dissertation, 2008 (2008)

Gasser, T.: Ergebnisse der Projektgruppe Automatisierung: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach (2012). gasser@bast.de

Gayko, J.: Lane Departure Warning. In: Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 2. Aufl., S. 543–553. ATZ/MTZ – Fachbuch, Wiebaden (2009)

Gayko, J.: Lane Keeping Support. In: Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme – Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 2. Aufl. ATZ/MTZ – Fachbuch, Wiebaden (2012). Kap. 35

Gelau, C., Gasser, T., Seeck, A.: Fahrerassistenz und Verkehrssicherheit. In: Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme – Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 2. Aufl. ATZ/MTZ – Fachbuch, Wiebaden (2012). Kap 3

Götz, M., Kleinkes, M., Pietzonka, S., Schiermeister, N.: Künftige Entwicklungen von LED-Scheinwerfern. ATZ **09**(111), 620–627 (2009)

Grimm, M., Casenave, S.: DBL: A Feature that adds Safety to Night Time Traffic. In: International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Technische Universität Darmstadt, S. 355–363. Utz Verlag, München (2007)

Gründl, M.: Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen. Inauguraldissertation Universität Regensburg (2005)

Gulde, D.: Opel-Eye and Blaupunkt.Gerät im Vergleich. Auto Motor Sport online (2009). http://www.auto-motor-und-sport.de/testbericht/verkehrsschilder-erkennung-im-test-13242415.html, Zugegriffen: 04.06.2009

Hoedemaeker, M., Brookhuis, A.K.: Behavioural adaptation to driving with an adaptive cruise control (ACC). Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour **1**, 95–106 (1998)

Hörwick, M.: Sicherheitskonzept für hochautomatisierte Fahrerassistenzsysteme. Dissertationsschrift an der Technischen Universität München (2011)

Ishida, S., Tanaka, J., Kondo, S., Shingyoji, M.: Development of a driver assistance system SAE 2003 World Congress & Exhibition, Detroit, MI, USA (2003)

ISO 17361: „Intelligent transportation systems. Lane departure warning systems. Performance requirements and test procedures". British Standards Institution ISO-Norm 17387, „Lane Change Decision Aid System" (2007)

ISO 17387: „Lane Change Decision Aid System", British Standards Institution ISO-Norm (2007)

Israel, B.: Potenziale eines kontaktanalogen Head-Up-Displays für den Serieneinsatz. Dissertation, Technische Universität München (2013)

Israel, B., Bubb, H.: Augmeted Reality im Fahrzeug – Möglichkeiten und Grenzen der Darstellung mit dem kontaktanalogen Head-up-Display. In: 5. Fachtagung USEWARE, Baden-Baden (2010)

Jenness, W.J., Lerner, D.N., Mazor, S., Osberg, S.J., Tefft, C.B.: Use of Advanced In-Vehicle Technology by Young and Older Early Adopters. Survey Results on Adaptive Cruise Control Systems (2008)

Katzwinkel, R., Auer, R., Brosig, S., Rohlfs, M., Schöning, V., Schroven, F., Schwitters, F., Wuttke, U.: Einparkassistenz. In: Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 2. Aufl. ATZ/MTZ – Fachbuch, Wiesbaden (2012). Kap. 31

Kesler, M., Mangin, B.: Nutzerorientierte Auslegung von teilautomatisierten Einparkassistenzsystemen. In: Tagungsband zur 4. VDI-Tagung Fahrer im 21. Jahrhundert. VDI-Verlag GmbH, Braunschweig (2007)

Khanh, T.Q., Huhn, W.: Sichtverbesserungssysteme. In: Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 2. Aufl. ATZ/MTZ – Fachbuch, Wiesbaden (2012). Kap. 30

Kienle, M.: Anzeige-Bedienkonzepte hochautomatisierter Fahrzeuge – vom manuellen zum hochautomatisierten Autofahren. Dissertation an der Technischen Universität München (2014)

Kienle, M.: Kooperative Interaktionskonzepte zum Fahren eines teilautomatisierten Fahrzeugs. Dissertation an der technischen Universität München (2015)

Kleine-Besten, T., Kersken, U., Pöchmüller, W., Schepers, H.: Navigation und Telematik. In: Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 2. Aufl. ATZ/MTZ – Fachbuch, Wiesbaden (2012). Kap 39

Knoll, P., Langwieder, K.: Der Sicherheitseffekt von ESP in Realunfällen – Überlegungen zum volkswirtschaftlichen Nutzen von prädiktiven Fahrerassistenzsystemen. In: TUM/TÜV Süd (Hrsg.) Tagungsband der Tagung „Sicherheit durch Fahrerassistenz". TÜV-Süd, Garching (2006)

König, W.: Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrerassistenzsystemen. In: Winner,, Hakuli, H.S., Wolf, G. (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 2. Aufl. ATZ/MTZ – Fachbuch, Wiesbaden (2012) Kap. 4

König, W., Weiss, K.-E., Gehrke, H., Haller, R.: S.A.N.T.O.S. Situationsangepasste und nutzertypzentrierte Optimierung von Systemen zur Fahrerunterstützung GfA Herbstkonferenz über Ergonomie und Verkehrssicherheit, Technische Universität München, 12.-13.10.2000. (2000)

König, W., Weiß, K.E., Mayser, Ch.: S.A.N.T.O.S – A Concept for Integrated Driver Assistance, Electronic Systems for Vehicles, Baden Baden (2003) sowie www.santos.web.de

Kovordányi, R.: When will Advanced Driver Support Systems be User-Adaptive? The Case of Adaptive Cruise Control. In: AAAI Spring Symposium, 2005 (2005)

Krause, M., Bengler, K.: My Phone, My Car and I – And May be a Traffic Light Assistant. In: Ege, R., Koszalka, L. (Hrsg.) ICONS 2013, The Eighth International Conference on Systems, S. 33–39 (2013)

Lange, C.: Wirkung von Fahrerassistenz auf der Führungsebene in Abhängigkeit der Modalität und des Automatisierungsgrades. Dissertation, Technische Universität München (2008)

Lange, C., Bubb, H., Tönnis, M., Klinker, G.: Sicherheitspotential und Verbrauchsreduzierung durch ein intelligent geregeltes aktives Gaspeda. In: TÜV SÜD AUTOMOTIVE GMBH,

Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München (Hrsg.) 3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz: Tagung München. TÜV-Süd, München (2008)

Langwieder, K.: Wissenschaftlicher Erkenntnisstand zu ESP. Beitrag zu Konferenz 10 Jahre ESP, 23.02.2005. Kongressbericht, Berlin (2005)

Lee, W.-S., Nam, H.-K.: A study on driver acceptance of adaptive cruise control using a driving simulator. In: THE UNIVERSITY OF IOWA (Hrsg.) Driving Simulation Conference: North America 2007 Iowa City, USA, 2007 (2007)

Lexus: LS - Driver Monitoring System. LEXUS (Internetquelle abgerufen am 18.12.2010 http://www.lexus.eu/range/ls/key-features/safety/safety-driver-monitoring-system aspx (2010)

Lindberg, T., Schaller, T., Grandenegger, B.: Stauassistent – Unterstützung des Fahrers durch Übernahme der Quer- und Längsführung im Stau. In: der Fahrer des 21. Jahrhundert – Human Machine Interface, 4. VDI Fachtagung (2007)

Lindberg, T.: Entwicklung einer ABK Metapher für gruppierte Fahrerassistenzsysteme. Dissertation an der technischen Universität Berlin (2012)

Ma, R., Kaber, B.D.: Situation awareness and workload in driving while using adaptive cruise control and a cell phone. International Journal of Industrial Ergonomics **35**(10), 939–953 (2005)

Mages, M., Hopstock, M., Klanner, F.: Kreuzungsassistenz. In: Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 2. Aufl. ATZ/MTZ – Fachbuch, Wiesbaden (2012). Kap 37

Maier, F.: Fahrerassistenzsysteme in der Fahrausbildung. Dissertation an der Technischen Universität München (2014)

Oei, H.-L., Polak, H.P.: Intelligent Speed Adaptation (ISA) and Road Safety. IATSS Research **26**, 45–51 (2002)

Ojeda, L., Nathan, F., Brouwer, F.T.R., Hoedemaeker, M.D. (Hrsg.): Driver support and information systems: Experiments on learning, appropriation and effects of adaptiveness (2006)

Penka, A.: Vergleichende Untersuchung zu Fahrerassistenzsystemen mit unterschiedlichen aktiven Bedienelementen. Dissertation Technische Universität München (2001)

Pereira, M., Bruyas, M.-P., Kaufmann, C., Britschgi, V., Gil, J., Zaoral, A.: Reported Use of Speed Control Systems: Cruise Control and Speed Limiter IET Intelligent Transport Systems, (2013)

Peter, J. W.: Kann die Sicherheitsfahrschaltung SIFA die Dienstfähigkeit von Triebfahrzeugfahrern gewährleisten? Inaugural-Dissertation and der Philipps-Universität Marburg/Lahn, Marburg/Lahn (1980)

Popiv, D.: Enhancement of Driver Anticipation and Its Implications on Efficiency and Safety. Dissertationsschrift an der Technischen Universität München (2011)

Popiv, D., Lange, C., Bubb, H.: Driving with and without ACC: evaluated Differences. In: 54. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Tagung München, 2008, S. 141–145 (2008)

Rakha, H., Hankey, J., Patterson, A., Van Aerde, M.: Field Evaluation of Safety Impacts of Adaptive Cruise Control. Journal of Intelligent Transportation Systems **6**(3), 225–259 (2001)

Raste, T.: Fahrdynamikregelung mit Brems- und Lenkeingriff. In: Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme – Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 2. Aufl. ATZ/MTZ – Fachbuch, Wiesbaden (2012). Kap. 26

Rinderknecht, F.M.: Konzeptstudie XchangeE (2014). www.rinspeed.eu

Sacher, H.: Gesamtheitliche Analyse des Bedienverhaltens von Fahrzeugfunktionen in der täglichen Nutzung. Dissertation, Technische Universität München (2009)

Sacher, H., Bubb, H.: Wie nutzen Fahrzeugführer das adaptive cruise control (ACC)? In: TÜV SÜD AUTOMOTIVE GMBH, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München (Hrsg.) 2. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz: Tagung München 2006. TÜV-Süd, München (2006)

Schittenhelm, H.: The Vision of Accident free Driving – how efficient are we actually in avoiding or mitigating longitudinal real world accidents. In NHTSA (Hrsg.): Proceedings in the 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles conference (ESV) (Paper Number 09-0510) Stuttgart (2009)

Schneid, M.: Entwicklung und Erprobung eines kontaktanalogen Head-Up-Displays im Fahrzeug. Dissertation, Technische Universität München (2009)

Abele, J., Kerlen, C., Krueger, S., Baum, H., Geißler, T., Grawenhoff, S., Schneider, J., Schulz, W.H., SEISS: In: VDI/VDE Innovation & Technik GmbH & Institute for Transport Economics at the University of Cologne (Hrsg.) Exploratory Study on the Potential Socio-Economic Impact of the Introduction of Intelligent Safety Systems in Road Vehicles. VDI Verlag GmbH, Teltow/Köln (2005)

Seppelt, D.B., Lees, N.M., Lee, D.J.: Driver distraction and reliance: Adaptive cruise control in the context of sensor reliability and algorithm limits. In: Third International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design: Tagung Rockport, USA 2005. S. 255–261 (2005)

Stanton, A.N., Young, M., McCaulder, B.: Drive-by-Wire: the case of driver workload and reclaiming control with adaptive cruise control. Safety Science **27**(2/3), 149–159 (1997)

Strasser, P.: Vernetzung von Test- und Simulationsmethoden für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen. Dissertation, Technische Universität München (2012)

Tricot, N., Rajaonah, B., Pacaux, M.-P., Popieul, J.-C.: Driver's behaviors and human-machine interactions characterization for the design of an advanced driving assistance system. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers, INC (IEEE) (Hrsg.) IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics: Tagung The Hague, Netherlands, Bd. 4, S. 3976–3981. IEEE Computer Society Press, Washington D.C. (2004)

Viti, F., Hoogendoorn, P.S., Alkim, P.T., Bootsma, G.: Driving behavior interaction with ACC: results from a Field Operational

Test in the Netherlands. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers, INC (IEEE) (Hrsg.) IEEE Intelligent Vehicles Symposium: Tagung Istanbul, Turkey 2007. S. 745–750. IEEE Computer Society Press, Washington D.C. (2007)

Walter, M., Fechner, T., Hellmann, W., Thiel, R.: Lane Departure Warning. In: Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme – Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 2. Aufl. ATZ/MTZ – Fachbuch, Wiesbaden (2012). Kap. 34

Weinberger, M.: Einfluss von Adaptiven Cruise Control Systemen auf das Fahrerverhalten. Dissertationsschrift an der TU-München (2001)

Weinberger, M., Winner, H., Bubb, H.: Adaptive cruise control field operational test – the learning phase. JSAE Review **22**, 487 (2001). Elsevier

Weißgerber, T., Damböck, D., Kienle, M., Bengler, K.: Auswirkungen einer kontaktanalogen Anzeige auf die Querführung hochautomatisierter Fahrzeuge 28.VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit, Wolfsburg. Germany (2012)

Weißmann, W: Die (un)heimlichen Helfer. Fahrschule, 6/209, 12–14 (2009)

Wimmer, M.: Entwicklung und Erprobung von Mensch-Maschine-Systemen zur automatischen Fahrzeugführung. Dissertationsschrift an der Universität der Bundeswehr München (2014)

Wimmer, M., Siedersberger, K.-H., Meuerle, J., Färber, B.: Evaluierung des Fahrerüberwachungs- und Interaktionskonzeptes Potentialtrigger für hochautomatisierte Fahrerassistenzsysteme. In: Kolrep, H., Jürgensohn, T. (Hrsg.) 28. VDI/VW- Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit Mensch-Maschine-Systeme der Reihe Forschungs-Berichte VDI, Bd. 22, S. 123–135 (2012)

Winner, H., Hakuli, S.: Conduct-by-Wire – Following a New Paradigm for Driving into the Future. In: Proceedings of FISITA World Automotive Congress (2006)

Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 2. Aufl. ATZ/MTZ – Fachbuch, Wiesbaden (2012)

Winner, H., Danner, B., Steinle, J.: Adaptive Cruise Control. In: Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 2. Aufl. ATZ/MTZ – Fachbuch, Wiesbaden (2012)

Winner, H., Hakuli, S., Bruder, R., Konigorski, U., Schiele, B.: Conduct-by-Wire – ein neues Paradigma für die Weiterentwicklung der Fahrerassistenz 4. Workshop Fahrerassistenzsysteme, Löwenstein, 2006 (2006)

van Zanten, A., Kost, F.: Bremsenbasierte Assistenzfunktionen. In: Winner, Hakuli, H.S., Wolf, G. (Hrsg.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort, 2. Aufl. ATZ/MTZ – Fachbuch, Wiesbaden (2012)

Weiterführende Literatur

Deutscher Verkehrssicherheitsrat e. V.: Fahrerassistenzsysteme - Innovationen im Dienste der Sicherheit/13ten Schriftenreihe Verkehrssicherheit/12tes DVR Forum - Sicherheit und Mobilität – München 21.09.2006 - S. 36 (2006)

Dutch Ministry of Transport: „Roads to the Future: The Assisted Driver". Report from the Dutch Ministry of Transport, April 2007 (2007)

König, W., Weiß, K.-E., Mayser, C.: S.A.N.T.O.S Situations – angepasste und Nutzer-Typ- zentrierte Optimierung von Systemen zur Fahrerunterstützung. Gemeinsamer Projektabschlussbericht Der Robert Bosch GmbH und der BMW group. BMFT, Bonn (2002)

Lindberg, T., Tönert, L., Rötting, M., Bengler, M.: Integration aktueller und zukünftiger Fahrerassistenzsysteme – wie lässt sich der Lösungsraum für die HMI-Entwicklung strukturieren? Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme. 8. Berliner Werkstatt – Mensch-Maschine-Systeme. VDI Verlag, 187-188 und 457-463 [CD] (7.-9. Okt.2009)

Methoden der ergonomischen Fahrzeugentwicklung

Heiner Bubb

10.1 Ergonomie im Fahrzeugentwicklungsprozess – 584

10.2 Virtual Reality – 588

10.3 Simulation anthropometrischer Bedingungen – 590
10.3.1 Sitzkiste – 590
10.3.2 Variabler Ergonomieprüfstand – 591
10.3.3 Anwendung von Virtual Reality – 592

10.4 Simulation fahr- und verkehrsdynamischer Aspekte – 598
10.4.1 Motivation für Fahrsimulatoren und deren technische Herausforderung – 598
10.4.2 Simulatortechniken – 600
10.4.3 Aussagekraft von Fahrsimulatoren unterschiedlichen Niveaus – 606
10.4.4 Nutzung von Augmented Reality im Realfahrzeug – 609

10.5 Versuche im Realfahrzeug – 611
10.5.1 Versuche auf abgesperrtem Gelände – 611
10.5.2 Versuche im öffentlichen Straßenverkehr – 613
10.5.3 Kundenrückmeldungen – 614

Literatur – 615

H. Bubb et al., *Automobilergonomie,* ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-8348-2297-0_10, © Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

10.1 Ergonomie im Fahrzeugentwicklungsprozess

Der Produktentstehungsprozess (kurz PEP) eines neuen Kraftfahrzeugmodells ist durch hohe Komplexität charakterisiert, welche vor allem durch das Zusammenspiel zahlreicher kreativer Mitarbeiter sowohl innerhalb der Organisation des Automobilherstellers (OEM, Original Equipment Manufacturer) als auch im Lieferantenumfeld und bei diversen Dienstleistern bedingt ist (Widmann 2011). In der Summe können über 1000 Beteiligte interdisziplinär und lokal in einem Simultanious-Engineering-Prozess miteinander vernetzt sein. Es ist nicht Aufgabe dieses Kapitels die verschiedenen Organisationsformen des PEP darzulegen, sondern es wird nur kurz auf dessen zeitlichen Ablauf und dies mit besonderem Blick auf den Einsatz der Ergonomie eingegangen. ◘ Abbildung 10.1 zeigt die wesentlichen Elemente dieses zeitlichen Ablaufs. Im Bereich vor der eigentlichen Produktdefinition werden in Forschung, Advanced Design, Innovationsmanagement und Scouting (Trendforschung) weitgehend sehr frei neue Ideen kreiert, formuliert, dargestellt und teilweise experimentell erforscht. Diese Prozesse laufen kontinuierlich und permanent unabhängig von Fahrzeugmodellzyklen. Über die Attraktivität eines Fahrzeuges entscheiden letztlich neben der zielgenauen Positionierung im angestrebten Kundensegment mit Blick auf Markenimages, Design, Produkteigenschaften und Preis nicht zuletzt innovative Technikinhalte (Widmann 2011). Innovationen prägen dabei das Markenimage (z. B.: Sicherheitsfahrgastzelle ↔ Mercedes; „quattro©“ – permanenter Vierradantrieb ↔ Audi; Doppelkupplungsgetriebe ↔ VW; Reihensechszylinder in der unteren Mittelklasse ↔ BMW). Zunehmend werden auch Innovation aus dem Feld der Ergonomie solche imageanhebende Bedeutung erlangen (z. B.: zum Fahrer ausgerichtetes Armaturenbrett, HUD ↔ BMW). Gerade deshalb entstehen heute viele Innovationen auf dem ergonomischen Gebiet vor allen in der Forschung (sowohl Firmenforschung wie Einbindung von Forschungsinstituten und Hochschule). Im Bereich der Vorentwicklung findet eine erste Integration solcher Innovation in die Fahrzeugumgebung statt. Das Ziel dabei ist, die Eigenschaftspotenziale der Innovation in Fahrzeugen und ihre Fähigkeit zur Serienentwicklung zu überprüfen und nachzuweisen.

Die eigentliche *Produktplanung* beginnt mit einer Analyse der zukünftigen Kundenbedürfnisse. Diese Analysen gehen sowohl von dem in der eigenen Organisation gewonnen Know-how aber auch von Szenarienforschungen einschlägiger Institute aus. Neben vielen Fragen der zukünftigen wirtschaftlichen Entwicklung in den globalen Märkten, der Verfügbarkeit von Ressourcen, veränderter Steuerpolitik und v. a.m. spielt heute bezüglich der Ergonomie speziell die Frage der Veränderung der Alterspyramide auf das Käuferverhalten eine herausragende Rolle. Am Ende der Produktplanungsphase ist das zukünftige Fahrzeug hinsichtlich seiner Eigenschaften beschrieben, Kostenblöcke sind zugeordnet und der planerische Nachweis der Rentabilität ist erbracht. Im weiteren Verlauf des PEP ist von diesen Zielsetzungen auszugehen. Mit den verfügbaren Kapazitäten ist dafür Sorge zu tragen, dass sie erreicht werden (siehe ◘ Abb. 10.1).

Im Rahmen der hier besonders interessierenden *Konzeptentwicklung* wird das Fahrzeug aufgrund der zuvor festgelegten vielfältigen Anforderungen im Detail definiert (Ziel- und Konzeptdefinition). Was die zur Verfügung stehende Technik anlangt,ist dabei hinsichtlich der Ergonomie zu unterscheiden zwischen der Entwicklung des anthropometrischen Packaging und der systemergonomsich orientierten Gestaltung der Anzeige- und Bedieninteraktion (siehe ◘ Abb. 10.2).

Der Konzeptentwickler für den anthropometrischen Bereich steht vor der Aufgabe, ein Package zur erarbeiten, das die Realisierung der zuvor beschriebenen Eigenschaften zulässt. Er startet dabei mit einem sog. Technikmodell, das – unabhängig vom Design – ein virtuelles Gesamtfahrzeug darstellt. Mit Blick auf eventuelle Vorgänger und Konkurrenzmodelle werden neue Konzepte erdacht oder alte verbessert. In dieser Phase können mittels der virtuellen Menschmodelle bereits erste und vor allem sehr grundlegende ergonomische Forderungen eingebracht und berücksichtigt werden. Durch den Einsatz der CAD-Technologie ist es möglich, die Daten des noch virtuellen Fahrzeugmodells den sich ändernden Designmodellen ständig parametrisch anzupassen. Auch die verschiedenen Methoden der virtuellen Realität (VR) kommen

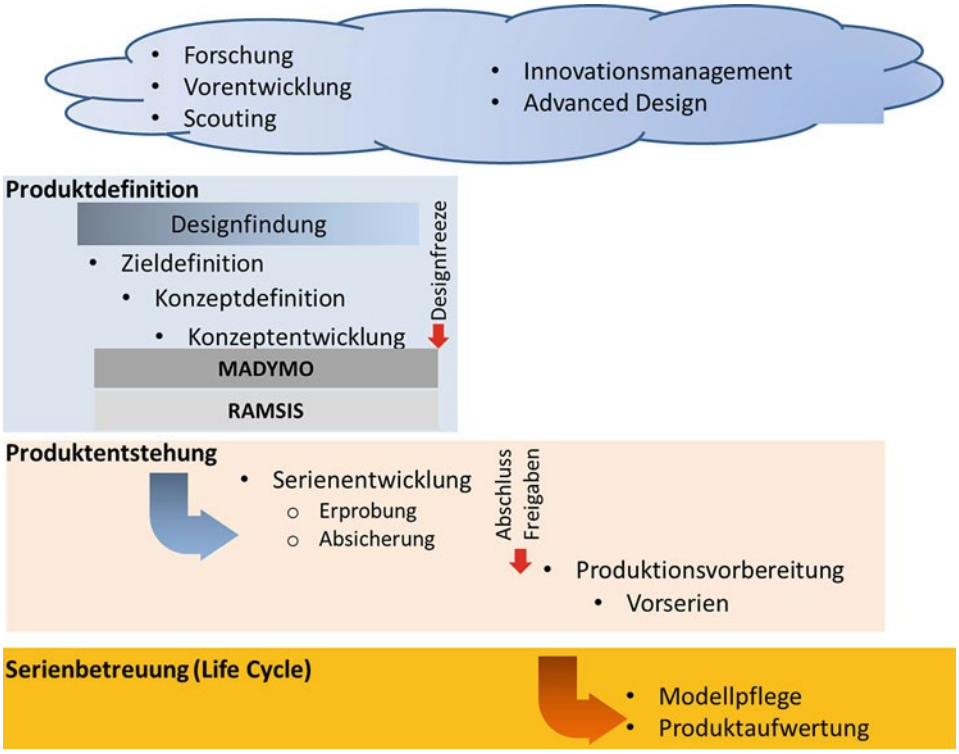


Abb. 10.1 Produktentstehungsprozess: Von der Forschung bis zur Serienbetreuung (nach Widmann 2011 und Wagner 2011)

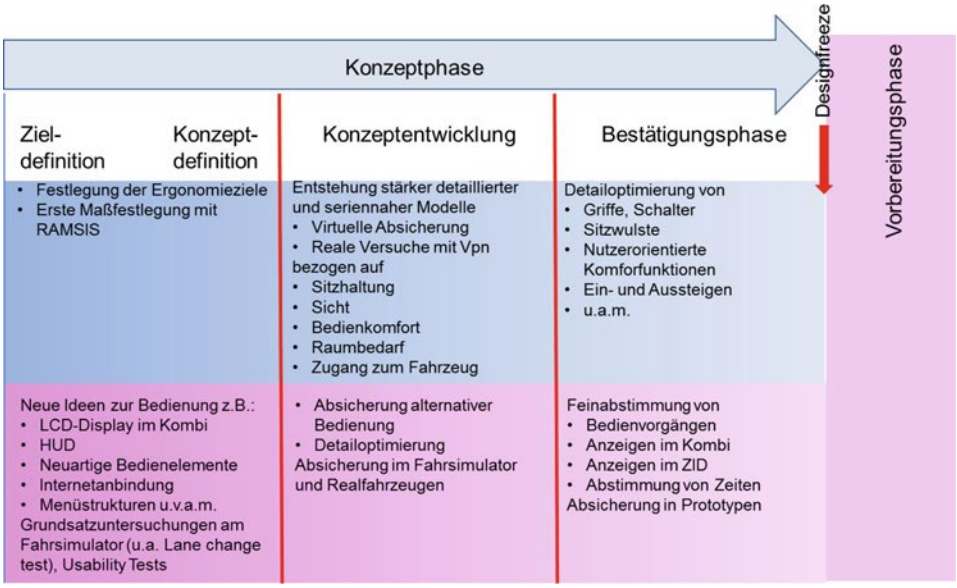


Abb. 10.2 Einordnung der Ergonomie in die Konzeptphase der Fahrzeugentwicklung

hier ins Spiel. Wie Widmann ausführt, dient dieses Technikmodell den Designern als Vorgabe für diverse Modellentwürfe. In der nächsten Phase der Konzeptentwicklung stehen bereits stärker detaillierte und seriennähere reale Modelle zur Verfügung. Neben weiteren virtuellen Absicherungen werden mit diesen auch reale Versuche mit Probanden durchgeführt. Dazu werden Modelle aus Hartschaum gefertigt. Sie enthalten nach und nach alle abzusichernden Entwicklungsstände aus den Design-, Package- und technischen Abteilungen. In Zusammenarbeit mit der virtuellen Absicherung werden Erreichbarkeiten und Freiräume überprüft, die Gurtauslegung optimiert und die Sicht auf die Instrumente sichergestellt. Für die virtuelle Absicherung ist es dabei sinnvoll, fest vorgegebene Regeln festzulegen, die letztlich objektivierbare und reproduzierbare Ergebnisse sichern. Im Gegensatz dazu muss man bei den Untersuchungen mit Probanden in den realen Sitzkisten mit Streuungen und auch Abweichungen von den virtuellen Ergebnissen rechnen. Durch kategorisierte und detaillierte Versuchspläne kann man diese Streuungen in Grenzen halten und insbesondere Abweichungen nachvollziehbar machen (siehe hierzu ▶ Kap. 11). Die Abstimmung zwischen diesen beiden Vorgehensweisen ermöglicht am Ende dieser Phase ein nach ergonomischen Gesichtspunkten akzeptables Design und des Packagings. Es definiert damit die Bauräume, in denen sich die einzelnen Detailausführungen dann weiter optimieren lassen. In der sich anschließenden Bestätigungsphase werden schließlich im Detail Griffe und Schalter ergonomisch ausgeformt und deren Lage und Ausrichtung noch optimiert sowie Ausführungen von Sitzwulsten und Armauflagen nutzerorientiert und komfortabel ausgelegt. Am Ende dieser Phase steht die Bestätigung des gesamten Produktes, das nun endgültig in die Produktionsvorbereitung in Form von Vorserien gehen kann.

Parallel zu dem geschilderten anthropometrischen Gestaltungsprozess entstehen in der Phase der Ziel- und Konzeptdefinition neue Ideen zur Bedienung bzw. zu den Anzeigen, z. B. werden Überlegungen angestellt, ob im Instrumentenkombi anstatt konventioneller Anzeigen ein LCD zum Einsatz kommen soll, ob ein Head-up-Display vorzusehen ist, alternative Menüstrukturen werden erdacht, z. B. werden neue Ideen zur Bedienung des Automatikgetriebes und insbesondere zur Interaktion mit den Fahrerassistenzsystemen entwickelt. All diese neuen Ideen sind unter systemergonomischen Gesichtspunkten zunächst theoretisch zu entwickeln und zu argumentieren. Sie erfahren dann vorerst noch in rudimentärer Form (z. B. Bildersequenzen auf Power-Point-Niveau) eine erste Evaluation in teilweise einfachen Fahrsimulatoren (z. B. unter Anwendung des Lane chance tests; siehe ▶ Abschn. 10.4; Herrler 2006). In der nächsten Phase der Konzeptentwicklung stehen auch im Bereich der Anzeigen und Bedienelemente nun mehr seriennahe Realisierungen zur Verfügung, die teilweise in Simulatoren, teilweise aber bereits im Realfahrzeug mit Probanden abzusichern sind. Analog zu der anthropometrischen Entwicklung sind in der Bestätigungsphase noch Feinabstimmungen bezüglich der Bedienvorgänge, der Anzeigen im Kombi und im zentralen Display durchzuführen und insbesondere ist – gerade was die Fahrerassistenzsysteme anlangt – die zeitliche Abstimmung der einzelnen Vorgänge in einen endgültigen Zustand zu bringen.

Während der gesamten geschilderten Entwicklung werden sog. Synchropunkte bzw. Meilensteine (mile stones) gesetzt, die als eine Zäsur wirken, zu der alle bis zu diesem Zeitpunkt beteiligten Fachbereiche ein definiertes Ergebnis vorzulegen haben. Sie bieten die Gelegenheit, den erreichten Ist- mit dem Sollstand zu vergleichen und gegebenenfalls Initiativen zu ergreifen, um den Sollzustand nachträglich sicherzustellen. Als letzte Zäsur wird die Konzeptentwicklung mit dem sog. Designfreeze beendet, das einen nicht mehr veränderbaren Entwicklungsstand festschreibt. Es schließt sich nun die Serienentwicklung an, die durch die Abschlussfreigabe beendet wird. Wie Wagner (2011) ausführt, sind in der ganzen Phase vom Beginn des Planungsauftrags bis zum Abschluss der Freigabe für die Produktionsvorbereitung Menschmodelle wie beispielsweise RAMSIS für die anthropometrische Gestaltung des Fahrzeugs und MADYMO für die korrekte Erarbeitung der passiven Sicherheit im Einsatz. Dabei werden diese Modelle in der frühen Phase der Entwicklung im Wesentlichen für Konzeption und Konstruktion herangezogen, während sie in der letzten Phase der Serienentwicklung vor-

nehmlich zur Überprüfung genutzt werden, ob die Vorgaben auch wirklich eingehalten worden sind.

Die Berücksichtigung des Menschen bei der Entwicklung eines hochkomplexen technischen Systems wie dem Kraftfahrzeug stellt eine besondere Herausforderung dar, weil das „weiche" Systemelement Mensch mit der „harten" Technik konfrontiert wird. Dies hat zur Folge, dass ungünstige technische Bedingungen durchaus von der Flexibilität des Nutzers aufgefangen werden können, was die Erfüllung ergonomischer Forderungen scheinbar weniger dringend erscheinen lässt[1]. Dennoch führen aber beispielsweise ungünstige anthropometrische Bedingungen zu Diskomfort und auf die Dauer gesehen sogar zu Schmerzen. Besonders in Verbindung mit der Handhabung moderner Assistenzsysteme, die ihren Nutzen nur ausspielen können, wenn sie auch verwendet werden, spielt die Frage der Anpassung der Technik an die individuellen und tagesformabhängigen unterschiedlichen Neigungen und Fähigkeiten eine essenzielle Rolle. Um im Rahmen der Entwicklung all diese Aspekte so weitgehend wie möglich zu berücksichtigen, haben sich typische Entwicklungsszenarien herauskristallisiert, die sowohl für die rein technische Entwicklung als auch für die Einbindung des Menschen allgemeine Gültigkeit haben. Für die folgende Kategorisierung unterscheidet man, ausgehend von dem Paradigma des Regelkreises:

- *Software in the Loop (SIL):* Das Testobjekt (z. B. das Package des Fahrzeugs, ein Assistenzsystem) wird auf einem Entwicklungsrechner simuliert. Alle anderen Komponenten des Regelkreises sind ebenfalls in simulierter Version realisiert, d. h. auch der Fahrer (im als Beispiel gewählten Fall des Package können dafür anthropometrische Menschmodelle herangezogen werden, im Fall des Assistenzsystems ist eine Modellierung des menschlichen Regelungsverhaltens notwendig; siehe hierzu ▶ Kap. 5). Es besteht im Allgemeinen keine Forderung nach Echtzeit, sodass der Testablauf jederzeit unterbrochen werden kann. SIL kann bereits in sehr früher Phase der Entwicklung eingesetzt werden, erfordert je nach Simulationstiefe allerdings erhebliches Expertenwissen.
- *Hardware in the Loop (HIL)*: Das Testobjekt ist mit all seinen Eingangs- und Ausgangsschnittstellen real, alle übrigen Komponenten des Regelkreises werden simuliert. Diese Variante spielt für die Behandlung ergonomischer Fragen eine eher untergeordnete Rolle. Es sind für die Überprüfung der technischen Eigenschaften des Fahrzeugs verschiedene Verfahren entwickelt worden, durch welche die Belastung durch menschliche Einwirkungen auf reproduzierbare Weise simuliert wird (z. B. Belastung des Sitzes beim Ein- und Aussteigen durch einen Roboter mit speziellen Bewegungsprogramm; „Kupplungsroboter" zur Überprüfung der Standfestigkeit der Kupplung einschließlich Kupplungspedal bei sehr häufiger Wiederholung der Betätigung u. v. a. m.) Noch relativ selten ist die Version, dass der Fahrer gänzlich durch einen Steuerroboter ersetzt wird, was besser reproduzierbare Versuchsbedingungen für das Testobjekt ermöglicht.
- *Driver in the Loop (DIL):* Der Fahrer ist real, die übrigen Komponenten können gänzlich simuliert sein oder partiell real und partiell simuliert sein. Im Fall der Überprüfung anthropometrischer Fragestellungen kommen hier die Verwendung von sog. Sitzkisten und die Techniken der virtuellen Realität (VR; CAVE© bzw. HMD; siehe ▶ Abschn. 10.3) zum Einsatz. Für Fragen der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion ist der Fahrsimulator das Mittel der Wahl. Insbesondere bei dem Testobjekt (z. B. eine spezielle Variante eines Assistenzsystems) kann es sich um ein reales, ein simuliertes oder ein Rapid-Prototyping-Steuergerät handeln. Die Zielrichtung des DIL sind hauptsächlich ergonomische Fragestellungen und die frühzeitige Erkundung von Kundenakzeptanz.
- *Vehicle in the Loop (VIL):* Fahrer und Fahrzeug sind real, die Umwelt, insbesondere andere Verkehrsteilnehmer werden simuliert. Eine besonders aufwendige Variante dieser Testversion ist die Nutzung von Augmented Reality (AR), wo die Fahraufgabe, bestehend aus Fahrstrecke

1 Es sei in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass die ersten Fahrzeuge nicht einmal über einen verstellbaren Fahrersitz verfügten. Menschen unterschiedlicher anthropometrischer Abmessungen passen sich im Wohnbereich ja auch den gleichen Stühlen an.

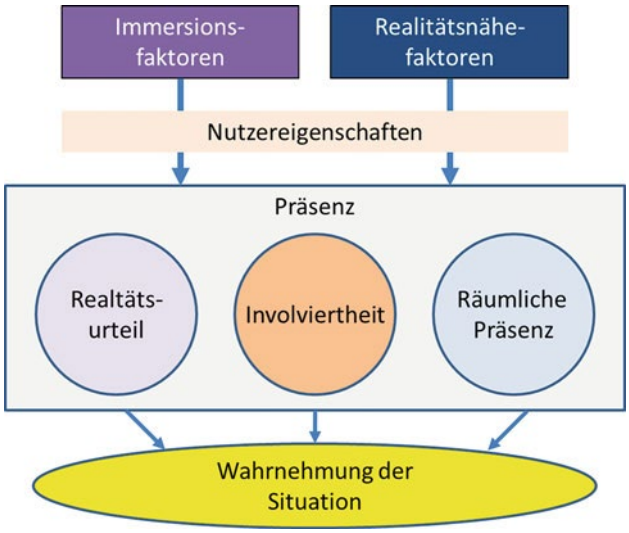


Abb. 10.3 Präsenzmodell modifiziert nach Hofmann (2002)

und anderen Verkehrsteilnehmern simuliert wird und mittels Head-Mounted-Technologie dem Fahrer vermittelt wird, dessen Fahrzeug sich dabei real auf einem abgesperrten Testgelände bewegt (siehe ▶ Abschn. 10.4.4). Das Testobjekt kann bei dieser Variante selbst wie bei DIL ein reales, simuliertes oder ein Rapid-Prototyping-Steuergerät sein.

- *Realtest (RT):* Alle Komponenten sind real, wobei das Testobjekt selbst ebenfalls in der endgültig verbauten Version getestet werden kann oder in Form eines Rapid Prototyping Steuergeräts. Versuche dieser Art können auf einem abgesperrten Testgelände durchgeführt werden oder unter Berücksichtigung besonderer Vorkehrungen auch im öffentlichen Straßenverkehr (siehe ▶ Abschn. 10.5).

10.2 Virtual Reality

Wenn dem Menschen in einer Versuchssituation etwas gezeigt wird, das zwar mit der später in der Realität gegebenen Anwendung in Verbindung steht, was sich für ihn aber sichtbar von der eigentlich im Alltag erlebten Situationen abhebt, ist immer die Frage zu stellen, inwieweit ein so gewonnenes Urteil anwendungsrelevant ist. Bei der Entwicklung eines neuen Fahrzeugs musste man schon immer Teile im Labor ausprobieren, bevor man einen Test in der praktischen Realumgebung machen konnte. Diese Aussage gilt auch für die Frage, wie der Fahrer und damit der zukünftige Kunde das Fahrzeug wahrnimmt. Der Vermittlung des Äußeren dienen Hardwaremodelle, die von der Designabteilung zunächst in verkleinertem Maßstab und später in einer 1:1 Darstellung der Außenhaut aufgebaut werden. Ein bewährtes Mittel, den Raumeindruck und die Möglichkeiten der Raumausnutzung eines neuen Fahrzeugs zu erkunden, stellt die so genannte Sitzkiste dar, die den Innenraum allerdings im unbewegten Zustand repräsentiert.

Durch den rasanten Fortschritt der Rechnertechnologie ist die Darstellung virtueller Welten mit einer solchen Präzision möglich geworden, dass viele Entscheidungen, die früher an den teuer aufzubauenden Modellen gefällt werden mussten, heute schon zu einem frühen Zeitpunkt am Bildschirm des Rechners – natürlich unter Zuhilfenahme geeigneter Präsentationstechniken (z. B. „Powerwall“[2]) – getroffen werden.

Die Möglichkeit, im Rechner erzeugte virtuelle Welten dem Nutzer anschaulich verfügbar zu machen, hat die Frage, wie solche virtuellen Welten

2 Bei der Powerwall handelt es sich um eine großflächige Projektionseinrichtung (im allgemeinen mit Rückprojektion), die ein virtuell vorhandenes Fahrzeug in Originalgröße darzustellen erlaubt. Meist verwendet man eine Stereoprojektion, um auch die räumliche Wirkung zu vermitteln.

erlebt werden, zum Gegenstand vielfältiger wissenschaftlicher Forschung werden lassen. Die meisten Ergebnisse dieser Forschung lassen sich auch auf das Erleben von hardwaremäßig verfügbaren Modellen des zukünftigen Fahrzeugs übertragen. Deshalb wird der Behandlung der einzelnen Entwicklungstechniken zunächst das Ergebnis dieser wissenschaftlichen Analyse virtueller Welten vorangestellt.

Riedl (2012) schreibt: „Der Begriff Virtuelle Realität wird in der Fachliteratur häufig in seiner englischen Entsprechung verwendet: ***Virtual Reality***, abgekürzt ***VR***. Diese Kombination zweier Wörter mit eigentlich gegensätzlicher Bedeutung ist nicht unumstritten, kann aber im Allgemeinen mit einer, vom Computer simulierten Wirklichkeit' (Duden 2009) gleich gesetzt werden. Schrader (2003), Stäbler (2007) und weitere Autoren stellen fest, dass sich hierzu in der Literatur unterschiedlichste Begrifflichkeiten wie Virtual Environment, Virtual Presence, Artifcial Reality oder Cyberspace finden lassen." VR soll im vorliegenden Rahmen als Oberbegriff für die Gesamtheit der virtuellen Technologien verstanden werden. „Diese Technologien erlauben es dem Nutzer in der Regel, virtuelle Objekte sowohl zu betrachten als auch zu manipulieren, gehen aber über die Möglichkeiten eines normalen Bildschirmarbeitsplatzes mit dreidimensionaler Grafikdarstellung aus dem CAX-Bereich hinaus, beispielsweise durch die Darstellung auf stereoskopischen Displays oder Projektionsumgebungen"(Riedl 2012). Das Hauptanliegen der virtuellen Realität ist es, den Nutzer in die rechnerbasierte dreidimensionale Welt zu integrieren. Diese Integration beschränkt sich aber nicht, wie häufig angenommen wird, nur auf die visuelle Information, sondern sollte möglichst alle Sinneskanäle des Menschen abdecken. Je mehr Sinneskanäle von einem VR-System angesprochen werden, desto umfassender fühlt sich der Nutzer in die virtuelle Welt eingebunden, das heißt desto größer ist der Grad der sog. Immersion (Hofmann 2002). Dabei beschreibt der Begriff ***Immersion*** (lat. immergere = eintauchen, eindringen) den Grad des Eintauchens eines Nutzers in eine virtuelle Umgebung (Bartle 2003).

Bei geeigneter Auslegung der Technik kann für den Nutzer der Eindruck entstehen, ein Teil der virtuellen Welt zu sein. Dieses Phänomen wird als ***Präsenz*** bezeichnet. Es stellt einen kognitiven Zustand dar, dessen Maß der Ausprägung neben den technischen Bedingungen auch von den individuellen Eigenschaften des Nutzers (d. h. u. a. seiner Bereitschaft sich auf die virtuelle bzw. Versuchs- Situation einzulassen) abhängt. Nach dem Modell, das Hofmann (2002) durch ein sorgsames Abwägen von in der Literatur verfügbaren Modellen zur Beschreibung der Wahrnehmung von VR zusammengestellt hat, kommt Präsenz durch die sog. Immersionsfaktoren und die Realitätsfaktoren zustande (◘ Abb. 10.3). Zu den Immersionsfaktoren zählen alle Einflüsse, die das Eintauchen in die virtuelle Welt begünstigen, wie korrekte Veränderung der dargestellten Bilder in Abhängigkeit von der eigenen Position, zusätzliche akustische, haptische und ggf. kinästhetische und olfaktorischen Reize. Die Realitätsfaktoren beschreiben die Korrektheit der Reize, also z. B. die detaillierte Darstellung von Oberflächen (z. B. genarbtes Leder im Fahrzeuginnenraum, Texturen auf der Straße und den Häusern in der Fahrumgebung, Blätter an den dargestellten Bäumen, realistisches Motorgeräusch u. v. a. m.).

Präsenz wird danach gemäß den Vorschlägen von Schubert et al. (1999) und Regenbrecht (1999) als mehrdimensionaler kognitiver Zustand aufgefasst. Dieser setzt sich zusammen aus dem „Realitätsurteil" (Eindruck der Ähnlichkeit der virtuellen mit einer vergleichbaren realen Umgebung), der „Involviertheit" (selektive Aufmerksamkeit für die virtuelle Umgebung) und der „räumlichen Präsenz" (der Nutzer hat den Eindruck, sich physisch nicht in seiner realen, sondern in der computergenerierten virtuellen Umgebung zu befinden). Präsenz muss nicht dadurch zustande kommen, dass alle drei Komponenten perfekt realisiert sind. So kann es beispielsweise bei der Bereitschaft, sich in die Welt eines Videospiels einzulassen (Involviertheit) auch dann zu einem ausgeprägten Präsenzgefühl kommen, wenn das Realitätsurteil mäßig und die räumliche Präsenz praktisch nicht vorhanden ist. Angewendet auf die ergonomische Fahrzeugentwicklung bedeutet das beispielsweise, dass eine Versuchsperson den räumlichen Eindruck in einer Sitzkiste (s. o.) auch dann beurteilen kann, wenn die Umgebung ein Laborraum (verfälschte räumliche Präsenz) und das Modell unbeweglich ist (partiell mangelndes Realitätsurteil). Ein gut entwickeltes

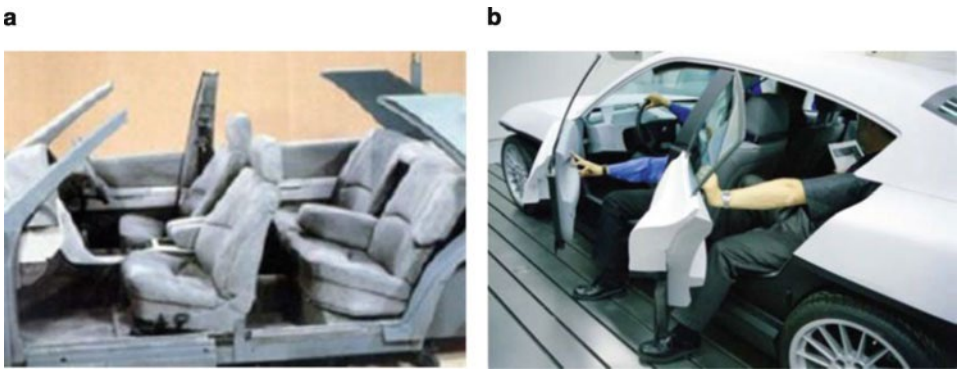


Abb. 10.4 Sitzkiste (**a** Schrader 2003), **b** BMW

Präsenzgefühl ist aber – wie auch immer es zustande kommt – die Voraussetzung dafür, dass die zu beurteilende Situation richtig wahrgenommen wird.

10.3 Simulation anthropometrischer Bedingungen

Obwohl im Rechner verfügbare Menschmodelle (sog. „Softdummies"; für den Kraftfahrzeugbereich spielt heute das Menschmodell RAMSIS eine wichtige Rolle, siehe ▶ Abschn. 5.2.2 und 7.2.1) verfügbar sind, durch die viele, vor allem die anthropometrische Gestaltung des Fahrerplatzes sowie der übrigen Passagiere anlangende Fragen bereits in der Konzeptionsphase – sozusagen stellvertretend für mögliche Versuchspersonen – im CAD beantwortet werden können, wird man auf individuelle Urteile nicht verzichten können, die in der Fahrzeugentwicklung von ausgewählten Versuchspersonen in sog. Sitzkisten bzw. Mock-Up's erfragt werden. Viele der hardwaremäßig aufgebauten Mock-Up's werden heute mit den verschiedenen Möglichkeiten der VR-Technologie verbunden und erweitern so diese Art der Überprüfung in erheblichem Maße.

10.3.1 Sitzkiste

Die Erstellung von Sitzkisten für die Bewertung der Innenraumverhältnisse eines zu konzipierenden Fahrzeugs hat in der Fahrzeugindustrie eine lange Tradition. Meist werden die Sitzkisten in ihrer Grundstruktur aus Holz aufgebaut (daher kommt wohl auch die Bezeichnung „..kiste"). Mittels des in den Designabteilungen heute weit gehend verwendeten speziellen Hartschaummaterials kann, noch bevor ein fahrfertiges Modell zur Beurteilung zur Verfügung steht, schon der ästhetische Eindruck des In- und auch Exterieurs beurteilt werden. Insbesondere Aspekte, die mit den rein geometrisch orientierten Menschmodellen nicht oder nur mit viel Intuition abgeschätzt werden können, wie der ästhetische Eindruck der räumlichen Positionierung von Instrumenten und Schaltern, der Eindruck der Neigung der Frontscheibe in Verbindung mit den A-Säulen, der Türverkleidung, der Gestaltung der Armstützen, der Positionierung und Gestaltung von Türöffnern, das Sitzgefühl, das für einen Sportwagen anders sein muss als beispielsweise für einen VAN, insgesamt der gesamte Raumeindruck und vieles andere mehr können damit beurteilt werden. Allerdings ist der Bau solcher Sitzkisten kostenaufwendig. Eine einmal erstellte Sitzkiste erlaubt zudem immer nur die Beurteilung des Maßkonzeptes, für das sie realisiert worden ist. Veränderungen insbesondere der geometrischen Dimensionen sind dabei nur in geringfügigem Maße möglich (Abb. 10.4).

Für viele Untersuchungen zur Fahrerhaltung werden häufig solche Sitzkisten oder auch Teilkarosserien bereits in Produktion befindlicher Fahrzeug verwendet. Insbesondere die Position der Augenpunkte ist dabei neben anderen Aspekten, wie der Winkelstellung der Extremitäten, Druckverteilung im Sitz u. v. a. m. von Interesse. Um unter diesen nur in geringem Maße ein Präsenzgefühl erzeugenden Bedingungen zu einigermaßen validen Ergebnissen zu kommen, empfiehlt es sich, vor der Sitzkiste ein

Bild – möglichst einer geraden Straße – aufzustellen bzw. zu projizieren. Es ist dabei wichtig, dass die Blickwinkelverhältnisse korrekt sind und dass sich der Horizont des Bildes auf Augenhöhe befindet. Dadurch wird immerhin eine gewisse räumliche Präsenz zu erzeugt.

10.3.2 Variabler Ergonomieprüfstand

Parallel zum Einsatz von CAD in der Konstruktion sind auch variable Mock-Up's im Einsatz, die elektromotorisch verstellt werden können und die bidirektional mit dem CAD-System verbunden sind. Die zu Grunde liegende Idee ist dabei, dass die im CAD vorhandenen Maße unmittelbaren auf das Mock-Up übertragen werden können und dass umgekehrt Veränderungen am Mock-Up, die im Rahmen eines Versuchs von den Probanden gewünscht werden, im CAD registriert und gegebenenfalls zu geänderten Zeichnungsvorlagen verwendet werden können. Als Beispiel dient hier ein variables Fahrerplatzmodell, das bei der Daimler AG aufgebaut worden ist: Es handelt sich dabei um ein verfahrbares Grundgestell, auf dem sich der stilisierte Aufbau eines Kraftfahrzeugs mit A-, B- und C-Säulen befindet (siehe Abb. 10.5). Die Säulen bestehen aus variablen Vierkantelementen mit innerem Teleskopantrieb. Sie tragen ein Dach, dessen Ausdehnung durch eine Rollokonstruktion ebenfalls variabel ist. Die Position von Lenkrad, Pedalen, Sitzen und Boden lässt sich durch Elektromotore verstellen. Insgesamt 80 solcher Motoren sorgen dafür, dass nahezu alle einen Kraftfahrzeuginnenraum bestimmenden Maße verändert werden können. Die Variabilität reicht dabei von der flachen Sitzposition in einem Sportwagen über die Konfiguration in einem normalen PKW bis hin zu sehr aufrechten Positionen in Vans. Der variable Ergonomie-Prüfstand kann mit zwei vorderen Sitzen und zwei hinteren Sitzen bzw. einer Sitzbank ausgerüstet werden. Abhängig von der jeweiligen Fragestellung lässt sich der Prüfstand auch noch mit untersuchungsspezifischen Anbauteilen wie z. B. Türen oder Säulenverkleidungen bestücken. Er kann mit einem Fahrsimulator verbunden werden. Wegsensoren an den Verstellorganen ermöglichen die Rückmeldung über den jeweiligen Einstellungszustand. So ist es möglich, über einen Steuerrechner die Verbindung zu dem CAD-System in Form einer bidirektionalen Schnittstelle herzustellen. Damit kann jedes im CAD-System erarbeitete Karosseriekonzept unmittelbar auf den variablen Ergonomie-Prüfstand übertragen werden und umgekehrt. Somit liegen alle wesentlichen Packagemaße, die am Ergonomie-Prüfstand eingestellt werden, unmittelbar im CAD-System als Eckdaten vor. Da der Ergonomie-Prüfstand neben der Darstellung unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte auch die typunabhängige Ermittlung von Auswirkungen einer Karosserieänderung sowie den Vergleich mit Konkurrenzkonzepten ermöglichen soll, liegen dem beschriebenen technischen Layout von der Bedienungsseite folgende Betriebsarten zugrunde:

1. *interaktiver Modus:* hier wird durch den Versuchsleiter über ein Steuerpult in Rücksprache mit der Versuchsperson ein bestimmtes Karosseriekonzept erarbeitet. Es ist zudem möglich, eine der zu variierenden Abmessungen auf die Hupentaste am Lenkrad zu schalten und deren Einstellung durch die Versuchsperson direkt vornehmen zulassen.
2. *Automatikmodus:* hier wird entweder ein CAD-Datensatz oder ein (z. B. aus einem früheren Versuch) gespeicherter Datensatz geladen.

Für den variablen Ergonomie-Prüfstand werden von Braun (1997) folgende Anwendungsmöglichkeiten angegeben:

- Erstellung von Konzeptparametern (direkt oder durch CAD-Daten),
- Optimierung von Konzeptparametern mit Hilfe von Probanden,
- Konzeptspezifische Untersuchungen (z. B. Vorgänger - Nachfolgeruntersuchungen, Untersuchung kritischer Eckdaten mit Probanden)
- Ergonomische Grundlagenuntersuchungen; hierfür stellen die Firmen einen Versuchspersonenpool zusammen, dessen Mitglieder durch die Vermessung von ca. 40 charakteristischen Körpermaßen definiert sind. Dadurch ist es möglich, Versuchspersonengruppen nach anthropometrischen Gesichtspunkten, die für eine bestimmte Fragestellung von Bedeutung sein können, zusammenzustellen.

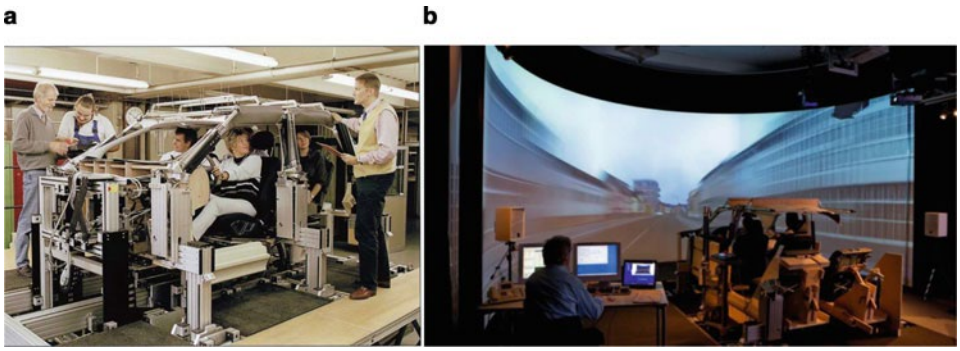


Abb. 10.5 **a** Elektromotorisch variables Mock-Up (Daimler), **b** in Verbindung mit einem Fahrsimulator

Der technische Aufbau solcher variablen Mock-Up's kann jedoch prinzipiell nicht den ästhetischen Anspruch der zuvor besprochenen Sitzkisten bieten. Es ist deshalb die Frage zu beantworten, ob das vom subjektiven Eindruck her eher abstrakt nüchterne variable Mock-Up ein ähnliches Raumempfinden wiedergibt, wie entsprechende Realfahrzeuge. Braun (1997) hat deshalb ein solches variables Fahrerplatzmodell mit entsprechenden realen Referenzmodellen (drei konzeptionell unterschiedliche Fahrzeugmodelle: Mercedes S-Klasse, Geländewagen, Roadster) verglichen, wobei die Versuchspersonen nach dem Zufallsprinzip bestimmte Fragen im realen und im virtuellen Modell beantworteten, ohne zu wissen, dass im Prüfstand exakt die Echtfahrzeuge realisiert sind. Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass im virtuellen Fahrzeugmodell ca. 88 % der Fragen richtig beantwortet wurden, während im realen Fahrzeugmodell dieser Prozentsatz bei 97 % lag. Bei der Auffindbarkeit von Stellteilen konnten keine Unterschiede festgestellt werden, während bei den Bewertungen, bei denen auch ein haptisches Feedback notwendig ist (Erreichbarkeit und Bedienbarkeit) deutliche Unterschiede auftraten. Insgesamt benötigten die Versuchspersonen im virtuellen Modell für die Beurteilungen allerdings signifikant mehr Zeit. Die verwendeten Fahrzeugmodelle hatten keinen Einfluss auf die Urteilsgüte.

Variable Mock-up's, wie hier eines beispielhaft beschrieben wurde, werden heute in fast allen Entwicklungsabteilungen der Fahrzeugindustrie genutzt, um mithilfe von Probanden grundsätzliche Ergonomieuntersuchungen durchzuführen.

10.3.3 Anwendung von Virtual Reality

Mit den Darstellungsmöglichkeiten, die die moderne Computertechnologie bietet, ist es immer attraktiver geworden, Probanden die zukünftigen Innenräume von Kraftfahrzeugen in einer virtuellen Welt beurteilen zulassen. Die Technologie für die optische Präsentation ist dabei am weitesten fortgeschritten. Um eine möglichst gute Immersion zu erwirken, sollten auch akustische, kinästhetische, haptische sowie olfaktorische Ausgabesysteme eingesetzt werden. Mit Ausnahme der Simulation akustischer Reize ist die technologische Entwicklung hier jedoch sehr viel weniger fortgeschritten. Gerade der Mangel an haptischen Reizen ist für die Beurteilung von Fahrzeuginnenräumen sehr hinderlich. Man behilft sich teilweise mit einer optischen Substitution, in dem man das Berühren von Oberflächen optisch markiert, z. B. durch rote Einfärbung der Fläche. Allerdings ist diese Maßnahme nur als eine weitgehend unzureichende Substitution des korrekten haptischen Reizes anzusehen (s. u.). Es gibt auch Versuche, den Probanden mit speziellen Handschuhen zu versehen und das Berühren von Oberflächen durch einen elektrischen Reiz zu signalisieren. Allerdings kann auch auf diese Weise das komplexe haptische Empfinden, das bei der Betätigung eines Schalters entsteht, nicht erreicht werden.

Für die optische Präsentation haben sich im Wesentlichen zwei unterschiedliche Technologien etabliert: In der CAVE™ werden mittels Rückprojektion die computergenerierten Videobilder auf 5 ggf. sogar 6 den Nutzer umschließende Flächen projiziert. Bei dem Head-Mounted-Display-Ver-

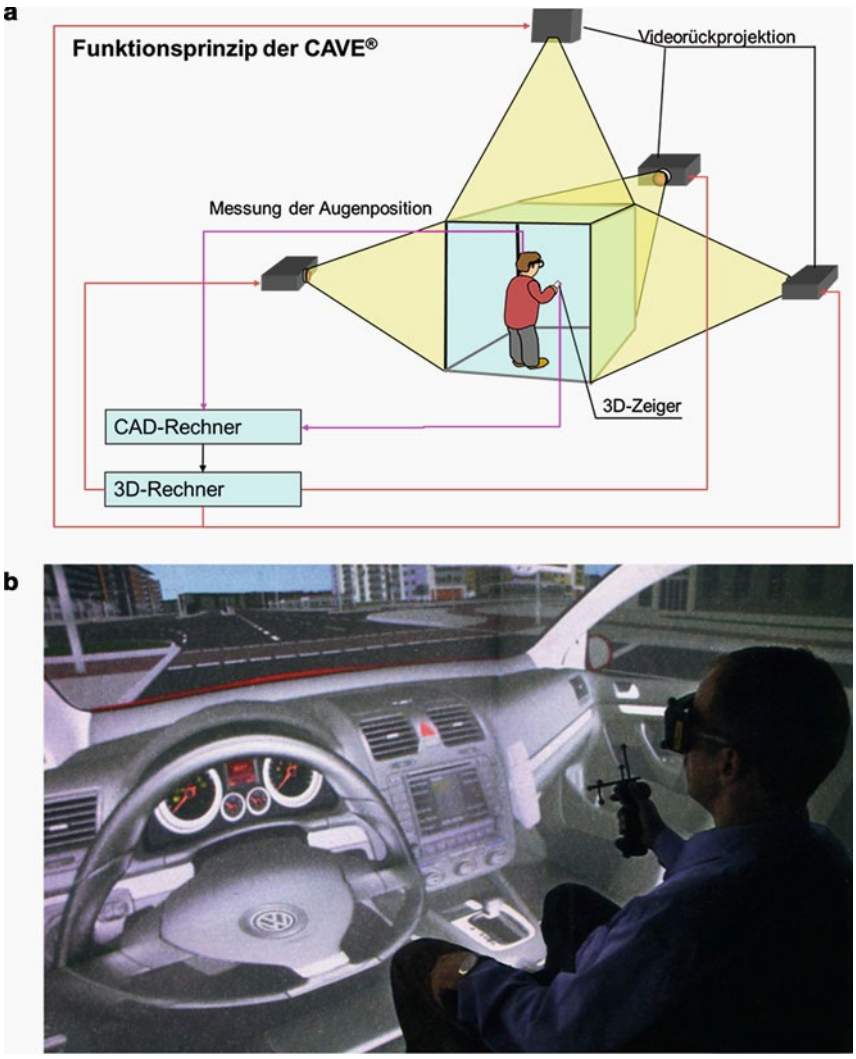


Abb. 10.6 Funktionsprinzip der CAVE© (**a**) und Sicht aus dem Blickwinkel eines außenstehenden Beobachters (**b**)

fahren (HMD) sieht der Proband die virtuelle Welt durch vor den Augen befindliche Okulare, hinter denen sich zwei fest mit dem Helm verbundene Displays befinden. Beiden technologischen Varianten ist gemein, dass die Kopfposition gemessen wird (sog. tracking) und ein entsprechend korrigiertes Bild dem Nutzer gezeigt wird. In Abhängigkeit von der Leistung des Rechners, der die Bilder generiert, kann es dabei zu merklichen Verzögerungen zwischen der neuen Kopfposition und dem nachziehenden visuellen Eindruck kommen, was bei empfindlichen Personen zu unangenehmen Kinetoseerscheinungen führt (siehe hierzu auch ▶ Abschn. 3.1.3 und ◘ Abb. 3.11).

10.3.3.1 CAVE™

◘ Abbildung 10.6 zeigt das Funktionsprinzip der CAVE™. Um für den Betrachter einen räumlichen Stereoeindruck zu erwirken, werden in einer Variante pro Projektionsfläche zwei Projektoren verwendet, welche die Bilder für das linke und rechte Auge in unterschiedlicher Polarisationsrichtung erzeugen. Der Nutzer muss in diesem Fall eine Polarisationsbrille tragen, um mit jedem Auge das korrekte Bild zu sehen. Bei der anderen Variante wird pro Projektionsfläche zwar nur ein Projektor verwendet, aber für jede Projektionsfläche wird jeweils die Perspektive für das linke und für das rechte Auge abwechselnd dargestellt. In diesem Fall muss der

Nutzer eine sog. Shutterbrille tragen, die mit den Projektionsfeldern synchronisiert ist, so dass jeweils dem linken und dem rechten Auge abwechselnd das richtige Bild zugespielt wird. Mit einem 3D-Zeiger ist er in der Lage, bestimmte Punkte zu markieren oder sogar sich selbst im virtuellen Raum zu bewegen, d. h. korrekt gesagt, den Raum um sich so zu bewegen, wie er sich ihm bei einer Eigenbewegung darstellen würde. Letztere Anwendung spielt im Zusammenhang mit der Beurteilung von Fahrzeuginnenräumen eine eher untergeordnete Rolle, da in der CAVE™ meist ein realer Sitz mit Lenkrad angebracht wird, auf dem der Proband Platz nimmt. Ein Vorteil des CAVE™-Prinzips ist im Gegensatz zum nachfolgend beschriebenen HMD-Verfahren, dass der Proband seinen eigenen Körper unverfälscht sehen kann.

Eine wesentliche Frage bei der Anwendung der CAVE™ ist, wie auch schon bei dem variablen Ergonomieprüfstand, inwieweit das in der virtuellen Welt wahrgenommene Raumgefühl mit dem der Realität übereinstimmt. Hofmann (2002) hat sich besonders mit der Frage auseinandergesetzt, inwieweit die in diesem Versuchsstand wahrgenommenen Entfernungen korrekt sind. Er geht dabei davon aus, dass der Mensch in der realen Welt deren Stimuli nutzt, um daraus auf der Basis der daraus gebildeten inneren Modelle Aktionen im so erschlossenen Raum abzuleiten. Diese Wechselwirkung kann auf physiologischer und auf kognitiver Ebene erfolgen. Die Informationsquellen für die egozentrische absolute Entfernungswahrnehmung sind die binokulare Disparität, die Konvergenz und die Akkommodation, die für die exozentrische Tiefenwahrnehmung die Bewegungsparallaxe und Informationen wie relative Helligkeit, Verdeckung, relative Größe, relative optische Dichte, Höhe im Gesichtsfeld, lineare Perspektive, atmosphärische Perspektive und kinetische Tiefe. All diese Informationsquellen führen im Betrachter schließlich zu einer in sich widerspruchsfreien Entfernungsinformation. Es kann unterstellt werden, dass dieser Wirkungsmechanismus auch in der virtuellen Umgebung Gültigkeit hat. Allerdings können dort die eigenen Regeln des virtuellen Raums zu anderen Raumwahrnehmungen führen. Auf Grund der verwendeten Technik ergeben sich spezifische Besonderheiten:

- In projektionsbasierten VR-Systemen wirken virtuelle Objekte leicht transluzent.
- In den meisten VR-Systemen ist der Blickwinkel auf die virtuelle Umgebung eingeschränkt.
- Die Auflösung der Darstellung ist technisch begrenzt, was die Qualität der Stimuli für Entfernungs- und Tiefenwahrnehmung verringert.
- Die Darstellung der virtuellen Umgebung wird häufig nicht schnell genug an die Kopfbewegungen des Nutzers angepasst.
- Ungenauigkeiten der Messung der Kopfposition des Nutzers können zu subjektiv verzerrten Bilddarstellungen führen.
- Akkommodations- und Konvergenzinformation stimmen nicht miteinander überein, da zum Scharfsehen auf die Entfernung der Projektionswände akkommodiert werden muss.
- Bei Darstellung der Stereoskopie mittels des Shutterbrillensystems kann es durch Nachbilder zu unzureichender Entkopplung der Bilder für die beiden Augen kommen.
- Bei dem vom Trageverhalten an sich komfortablen Verfahren mittels Polarisationsfiltern kann es bei Kopfdrehungen um die horizontale Achse zu Doppelbildern kommen.

Hofmann (2002) fand bei seinen Untersuchungen: Die Bildaufbaurate wurde als ein wesentlicher Immersionsfaktor identifiziert. Sie bewirkt eine temporäre Verzerrung der Darstellung, die dazu führt, dass die virtuellen Objekte bis zu 4 % vergrößert wahrgenommen werden. Das hat für die praktische Anwendung erhebliche Auswirkung, wenn es z. B. darum geht, Innenraumkonzepte mittels VR zu beurteilen. Als Erklärung wird folgender Mechanismus vermutet: Durch die Kopfbewegung ergeben sich bei niedriger Bildaufbaurate temporäre Verschiebungen des virtuellen Objektes, die der Nutzer als eine scheinbare Vergrößerung des Objektes interpretiert. Das wirkt sich auch auf die Varianz der Messwerte aus: Sie wird bei der systematischen Beeinflussung bei niedriger Bildaufbaurate geringer, während sie bei hoher Aufbaurate gemäß der natürlichen Varianz der Bewegung größer wird.

Für die Wirkung der Realitätsnähe auf die Raumwahrnehmung wird auf der Basis der experimentellen Ergebnisse folgender Mechanismus vermutet: in natürlicher Umgebung nimmt die Leuchtdichte eines

fremdlichtbeleuchteten Gegenstands mit der 4. Potenz der Entfernung ab. Bei der Darstellung mit geringer Realitätsnähe ist wegen der fehlenden Texturen die Leuchtdichte durchwegs höher. Die Oberfläche muss deshalb dem Nutzer unter Zugrundelegung seiner natürlichen Erfahrung als näher erscheinen.

Aus den Untersuchungen von Hofmann können zusammenfassend folgende Ergebnisse festgehalten werden:

- Alle drei Präsenzkomponenten haben signifikanten Einfluss auf die Raumwahrnehmung. Mit steigender Involviertheit und räumlicher Präsenz werden die Cockpits größer, mit steigendem Realitätsurteil kleiner wahrgenommen.
- Die Wahrnehmung der Cockpitbreite (horizontale Skalierung) wird von keiner der Präsenzkomponenten beeinflusst.

Als ein wesentlicher Effekt wird hierbei der Konflikt zwischen der Akkommodation auf die in unveränderlicher Entfernung befindlichen Projektionsleinwände und die durch die optischen Reize vermittelten davon abweichenden Entfernungen gesehen. Beim Betreten der virtuellen Umgebung (CAVE®) wird die akkommodative Information wegen der Ungewohntheit der Konfliktsituation unterdrückt. Mit wachsender räumlicher Präsenz und Involviertheit steigt ihr Gewicht jedoch und damit die Größe der wahrgenommenen Entfernung. Bei gleicher objektiver Abbildungsgröße auf der Retina wird das entsprechende Objekt folglich größer wahrgenommen. Zwar ordnet der Wahrnehmungsmechanismus der Akkommodationsinformation in dieser Konfliktsituation weniger Gewicht zu, da in der VR-Umgebung Konvergenz, absolute Bewegungsparallaxe und vertikale Disparität in sich konsistente Information liefern. Der Akkommodationseinfluss selbst wird allerdings durch die akkommodative Konvergenz, die Kalibrierung der horizontalen Disparität, durch die wegen der niedrigen Beleuchtungsstärken hervorgehobene Bedeutung der Schärfentiefe, sowie durch akkommodative Stimuli von realen Gegenständen in der CAVE® wieder verstärkt.

Die beschriebenen Konflikt-Effekte spielen vor allem für den Erstnutzer einer VR eine wichtige Rolle. Bei häufiger Nutzung kann von einem Gewöhnungseffekt ausgegangen werden, der umso stärker ist, je mehr der Nutzer die virtuelle Umgebung als seine aktuelle, direkte Umgebung akzeptiert. Das macht aber gerade die räumliche Präsenz und Involviertheit aus. Ein hohes Realitätsurteil hat dem gegenüber den umgekehrten Effekt, dass unter diesem Einfluss die aus dem Alltag gewohnten Wahrnehmungsregeln größeres Gewicht erhalten. Aus dieser Modellvorstellung lassen sich Maßnahmen ableiten, wie eine unerwünschte Fehleinschätzung der Größe in der VR-Umgebung verhindert werden kann. Nachdem diese wesentlich durch die Bewegung des Nutzer zustande kommt, bieten sich als Kompensationsmöglichkeiten

- Einschränkung der Beweglichkeit des Nutzers (meist ungeeignet)
- Maximierung der Bildaufbaurate (stößt bei gewünschter hoher Detailgenauigkeit ggf. auf technische Grenzen)
- Kontrolle der Bildaufbaurate und Prognose des dadurch bewirkten Effektes (Kalibrierexperimente sind notwendig, aber ungenau, da die individuelle Reaktion kaum vorhersehbar ist).

10.3.3.2 HMD-Technologie

Bei der Head-Mounted-Display-Technologie (HMD) trägt der Proband einen Helm, der ihm die virtuelle Welt über zwei Okulare getrennt für beide Augen vermittelt. Damit ist eine stereoskopische Sicht unmittelbar gewährleistet. ◘ Abbildung 10.7 zeigt die prinzipielle Anordnung. Über ein Trackingsystem wird nicht nur die Kopfposition des Probanden erfasst, was für die korrekte Berechnung der Perspektive der im HMD dargestellten virtuellen Welt notwendig ist, sondern über Datenhandschuhe auch die Position der Hände. Diese wird benötigt, um damit ein Menschmodell (hier RAMSIS) zu steuern, damit der Proband im HMD die Position seiner eigenen Hände und Arme sehen kann. Die Sicht durch die Okulare impliziert mehrere Einschränkungen. Wie bei der CAVE™ kommt es zu einem Wahrnehmungskonflikt zwischen der Akkommodationsebene und der über die sonstigen Reize wahrgenommenen Entfernung (es ist deshalb ratsam, die Okulare so zu justieren, dass auf die mittlere Entfernung der Objekte im Fahrzeuginnenraum zu akkommodieren ist, also ca. 0.8–1.2 m).

◘ Abbildung 10.8 zeigt einen variablen Ergonomie-Prüfstands der – ähnlich wie der unter ▶ Abschn. 10.3.2 beschriebene – bidirektional mit dem CAD-System verbunden ist. Damit ist es möglich,

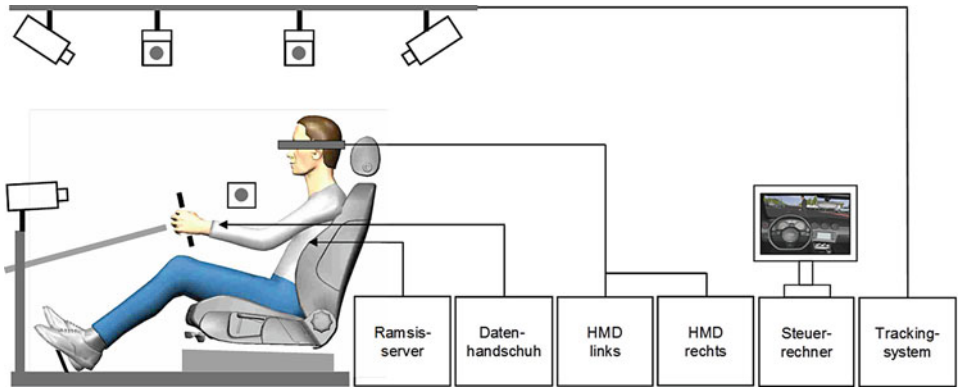


Abb. 10.7 Prinzipielle Anordnung eines Ergonomieprüfstands mit HMD-Technologie (Voss 2008)

im Dialog mit den Probanden unmittelbar Änderungen vorzunehmen. Im unteren Teil des Bildes ist der Datenhelm abgebildet. Bisher bereiten die schweren Helme für die Anwendung große Probleme (Voss 2008; Riedl 2012). Allerdings kann man davon ausgehen, dass mit dem zunehmenden Einsatz von solchen Helmen/Datenbrillen im Consumerbereich diese immer komfortabler, mit größerem Blickfeld, besserer Auflösung und zudem zu einem akzeptablen Preis zur Verfügung stehen werden. Gewisse Probleme bleiben aber unabhängig von dieser Entwicklung erhalten. Wie Riedl (2012) in umfangreichen Vergleichen feststellt, ist insbesondere für die realitätsnahe Positionierung des Probanden im Ergonomieprüfstand die korrekte Ausrichtung des virtuellen Horizonts am realen Horizont unabdingbar.

Voss (2008) hat sich mit der notwendigen Genauigkeit der Übereinstimmung von virtueller, optischer und realer, propriozeptiver Wahrnehmung auseinandergesetzt. Nach den vorliegenden Ergebnissen kann für rotatorische Divergenz eine 5-Perzentil-Wahnehmungsschwelle von 2° und für die translatorische Divergenz eine von 6 mm festgehalten werden. Da dieser Wert im Allgemeinen oberhalb der Genauigkeit der Einmessung per Hand und Maßstab liegt, ist eigentlich immer von einem genügenden haptischen Orientierungsgefühl in VR-Umgebung auszugehen. Der Vorteil der HMD Technologie liegt darin, dass eine rudimentäre haptische Rückmeldung simuliert werden kann, indem zum Beispiel durch ein reales Brett das Eindringen der Hand in die virtuelle gezeigte Armaturentafel zumindest grob verhindert wird. Wie Voss allerdings auch zeigt, gilt dies nicht mehr für komplexe Bewegungen. Es wurde ein Vergleich am Beispiel eines aktuellen Fahrzeugmodells vorgenommen, bei dem es sich im realen Fall um ein 1:1 Mock-Up aus Holz bzw. Modellbauschäumen handelte („Sitzkiste"). Der Versuch bezog sich auf Sicht- und Greifuntersuchungen. In der virtuellen Versuchssituation war ein Kollisionserkennungssystem integriert, das der Versuchsperson eine optische Rückmeldung gab, wenn virtuelle Bauteile berührt wurden. Bezüglich der Sichtuntersuchungen zeigte sich kein Unterschied zwischen dem realen Mock-Up und der virtuellen Darstellung. Dies wurde in einer späteren Untersuchung unabhängig davon auch noch einmal von Riedl (2012) bestätigt. Bei den Greifuntersuchungen zeigten sich für die Erreichbarkeit der Türinnenbetätigung, die Nutzbarkeit der Armauflage und die Erreichbarkeit des Handschuhkastenöffners signifikante Unterschiede. Auch dies wurde von Riedl am Beispiel der Entnahme eines Bechers aus einem Cup-Halter noch einmal untersucht. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass das virtuelle Modell die Bewertungssituation kritischer darstellt als die Realität. Personen, die Erfahrung im virtuellen Modell haben, kommen dabei zu deutlich realistischeren Einschätzungen. Ansonsten war bei allen Experimenten keine Differenz zwischen VR und Realität auszumachen. Die beobachteten Unterschiede lassen sich also immer mit dem jeweils komplexen haptischen Feedback in der Realität gegenüber der VR erklären.

Riedl (2012) hat eine ganz neue nur mit der HMD-Technologie zu realisierende Versuchsvari-

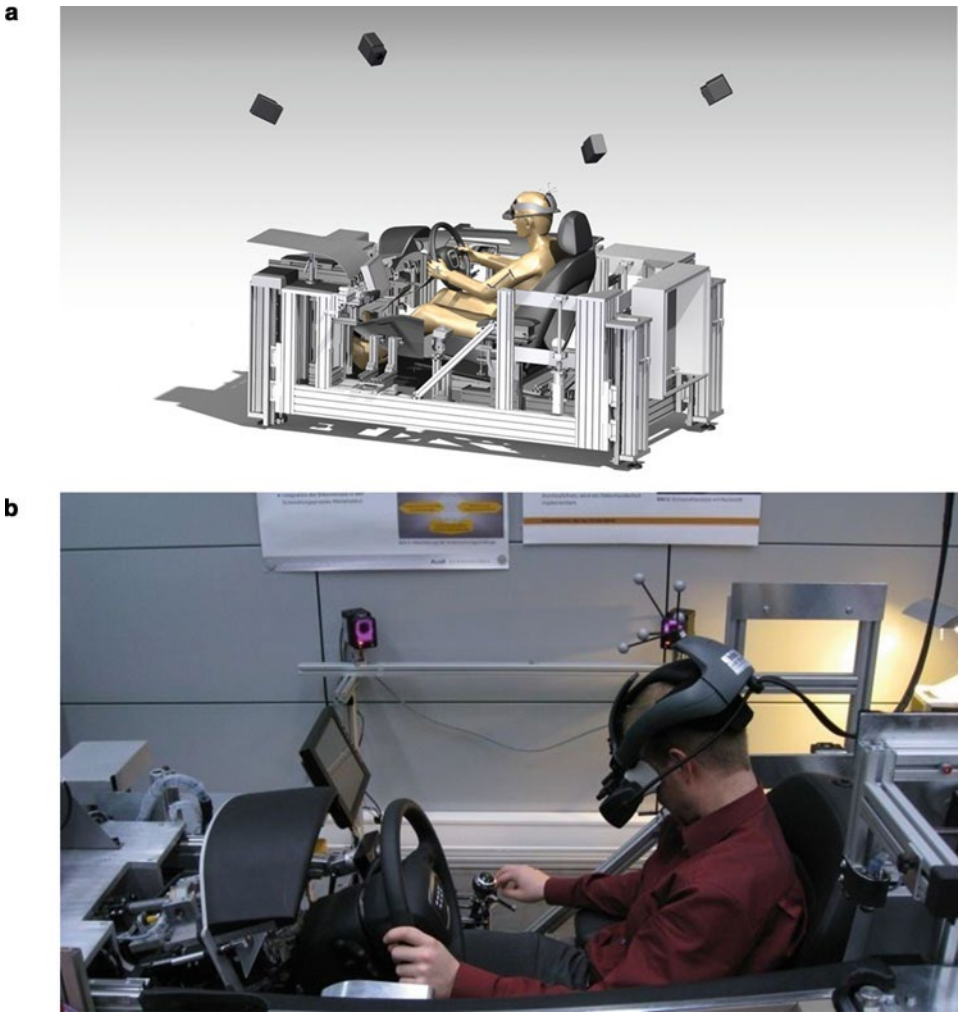


Abb. 10.8 Variabler Ergonomie-Prüfstand (**a**) und HMD im Versuchsstand (**b**; aus Riedl 2012)

ante entwickelt, die sog. *Perzentilsimulation*. Dabei wird ein Anwender in die Perspektive eines beliebigen Körperperzentils hineinversetzt, um ihm den Fahrzeuginnenraum aus dieser Perspektive erleben zu lassen. Die grundlegende Idee dabei ist, die individuelle Körpergröße des Beurteilers als Ausgangsgröße zu nehmen und danach die Fahrzeugdimensionen des variablen Fahrzeugmodells so zu verändern, dass er im Hinblick auf die Sichtbedingungen, die Bewegungsbereiche und die Rückmeldung über die entsprechend positionierten Stellteile, den Fahrzeuginnenraum aus der Perspektiven eines anderen Körperperzentils (vorzugsweise 5. bzw. 95. Perzentil) erlebt. Grundlage für diesen Transferprozess sind die Messung des aktuellen Augenpunktes sowie die der Position der Körperextremitäten (Hände), die in Echtzeit auf ein digitales Menschmodelle übertragen werden (RAMSIS), Information, die wiederum genutzt wird, das variable Fahrzeug-Mock-Up entsprechend zu steuern. Zur Validierung dieses Ansatzes sollten 25 Versuchspersonen die Situation aus der Sicht der 5-Perzentil-Frau erleben, die Probleme schildern und danach eine subjektive Einschätzung über den Unterstützungsgrad und zum Immersionsempfinden der Simulation abgeben. Die Beurteilungen einzelner Aufgaben wurden dabei mit den Diskomfortwerten, die mit dem digitalen Menschmodell

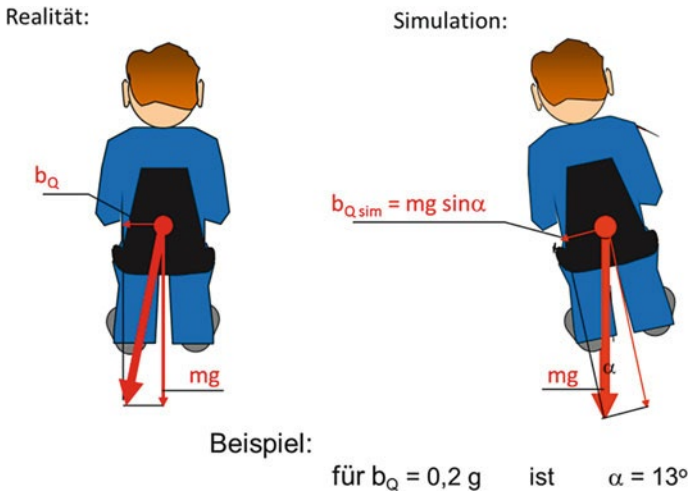


Abb. 10.9 Notwendige Verkippung der Simulatorkabine für das Erzeugen der Illusion einer Quer- bzw. Längsbeschleunigung von 0,2 g

RAMSIS gewonnen werden können, verglichen. Die Beurteilungen für die meisten Körperhaltungen stimmen danach gut überein. Große Unterschiede ergeben sich bei den Haltungen, die nach Erfahrung der Probanden nur kurzfristig eingenommen werden müssen (Lichtschalter, Türöffner) oder die nur im Fahrzeug im Stillstand eingenommen werden (Handschuhkastenöffner). Insgesamt attestieren die Versuchspersonen der Perzentilsimulation einen hohen Nutzen für Ergonomieuntersuchungen.

Prinzipiell wäre es sowohl bei dem CAVE™- als auch bei dem HMD-Verfahren möglich, die nur statisch simulierte Außensicht mit einem Fahrsimulator zu verbinden (siehe auch Abb. 10.5b). Bisher machte die eingeschränkte Rechnertechnologie solche Anwendungen praktisch unmöglich. Mit dem Fortschritt der Rechnertechnologie eröffnet sich hier aber ein weiteres Anwendungsfeld.

10.4 Simulation fahr- und verkehrsdynamischer Aspekte

10.4.1 Motivation für Fahrsimulatoren und deren technische Herausforderung

Die immer schnelleren Entwicklungszyklen lassen es auch bei der Fahrwerksentwicklung als gewinnbringend erscheinen, zunehmend mehr Untersuchungen bereits in einem Stadium durchzuführen, in dem das zukünftige Fahrzeug nur virtuell vorhanden ist. Hinzu kommt, dass das immer komplexer werdende Verkehrsgeschehen und die simultan ansteigenden Anforderungen an die Sicherheit Untersuchungen mit dem Menschen, der mit dem Fahrzeug interagiert, notwendig machen. Diese Untersuchungen sind oftmals zu einem Zeitpunkt notwendig, zu dem das neue Fahrzeug als Hardware gar nicht zur Verfügung steht. Insbesondere, wenn es um die Evaluation von innovativen Ideen zu Fahrerassistenzsystemen gerade in der Anfangsphase der Entwicklung geht, durch welche die Verkehrssicherheit erhöht, aber auch der Fahrkomfort verbessert werden soll, sind Versuche mit realen Fahrzeugen nahezu ausgeschlossen. Gerade solche Versuche können aus ethischen Gründen nicht im Realfahrzeug durchgeführt werden, um eine Gefährdung der Versuchspersonen auszuschließen. Dies sind alles Gründe, Versuche in Simulatoren durchzuführen. Mit den zunehmend besser werdenden Möglichkeiten der Rechnertechnologie sind solche Simulatoren für viele Entwicklungsbereiche immer mehr in den Bereich der Möglichkeiten gerückt. Allerdings existiert oftmals die Frage, welcher Aufwand für die Klärung bestimmter Fragen tatsächlich notwendig ist.

Nach ▶ Abschn. 10.2 müssen die Immersionsfaktoren und die Realitätsfaktoren möglichst hoch sein, um der Versuchsperson im Simulator ein intensives Präsenzerleben zu vermitteln, damit sie

ein Verhalten zeigt, das sich in der Realität wiederfindet. Im Wesentlichen werden die Immersionsfaktoren durch das korrekte zeitliche und örtliche Ineinandergreifen der auf die Sinnesorgane wirkenden Reize und die Realitätsfaktoren durch eine möglichst gute Wiedergabequalität der einzelnen Reize erreicht. Wie bereits in ▶ Kap. 3 (◘ Abb. 3.1) dargestellt sind für die Informationsaufnahme beim Führen eines Fahrzeugs die vier Sinneskanäle Gesichts-, Gehör-, Gleichgewichts- und Hautsinn ausschlaggebend. Die computergenerierte Videotechnik ist heute in der Lage, den Gesichtssinn mit beeindruckenden Szenen zu bedienen. Prinzipiell ist durch die fortschreitende HiFi-Technologie auch sehr gute akustische Simulation möglich. Durch die Verwendung von originalen Fahrkabinen einschließlich der dort verbauten Bedienelemente kann auch der Hautsinn (Haptik) mit sehr realitätsnaher Information versorgt werden. Ein prinzipielles Problem stellt die Bedienung des Gleichgewichtssinns und damit verbunden auch des Teils des Hautsinns dar, der bei der Berührung des Fahrzeugs Beschleunigungssignale erfährt (Sitz, Lenkrad, Armlehnen usw.). Häufig versucht man diese Beschleunigung durch Verkippen der Simulatorkabine zu erreichen (siehe ◘ Abb. 10.9). Um beispielsweise eine Beschleunigung von 0,2 g (im Straßenverkehr oft auftretende Komfortbeschleunigungen) zu erzeugen, ist ein Verkippen um $\alpha = 13°$ notwendig (die dadurch bewirkte Reduzierung der Schwerkraft wird praktisch nicht wahrgenommen), wobei zugleich die gesamte Sichtsimulation mitzuverdrehen ist. Der Verkippungsvorgang selbst wird aber über das Vestibularorgan als solcher wahrgenommen. Durch eine sog. Wash-out-Strategie versucht man diesen Eindruck zu verhindern. Man beschleunigt dazu die Versuchsperson zunächst real translatorisch, nimmt diese Beschleunigung aber langsam zurück und ersetzt sie – von der Versuchsperson unbemerkt – durch die Kipplage. Unter Annahme der Wahrnehmungsschwelle für Rotationsbeschleunigung von $b_{rot} < 0{,}41°/s^2$ dauert dieser Vorgang ca. 8 s. Die gleichzeitig reduzierte Translationsbeschleunigung benötigt für diese Zeit einen Weg von 171 m! Dieser Weg müsste durch einen entsprechend dimensionierten X-Y-Schlitten (für Translationsbeschleunigung in Längs- und Querrichtung) bereitgestellt werden. Diese Dimensionierung wäre aber nur für moderate Komfortbeschleunigungen ausreichend. Nach anfänglicher Euphorie über die Möglichkeiten von Simulationstechnik ist deshalb nach heutiger Auffassung die frühzeitige Optimierung von Fahrwerken mit Hilfe von Simulatoren auch unter Einbeziehung von Versuchsfahrern praktisch nicht zu bewerkstelligen.

Wegen dieser einschränkenden Überlegungen ist somit die Frage nach der Güte von Simulationsergebnissen überhaupt zu stellen. In der Literatur wird in diesem Zusammenhang zwischen den Begriffen der sog. absoluten und der relativen Validität unterschieden (Negele 2007; Abendroth et al. 2012). *Absolute Validität* ist durch die qualitative und quantitative Übereinstimmung der zur Beschreibung des Fahrerverhaltens herangezogenen Parameter zwischen Simulator- und entsprechenden Echtversuchen gekennzeichnet[3]. Sie erfordert zumindest den Nachweis, dass ein fehlender oder unzureichender Reiz (s. o.) keinen Einfluss auf das Ergebnis hat. Für die Erfüllung der primären Fahraufgabe, also der Geschwindigkeitswahl und der Spurhaltung, konnte Negele (2007) keine absolute Validität in den von ihm betrachteten Quellen (Blana und Golias 1999; Buld u. Krüger 2001) finden. Erst nach einer gewissen Eingewöhnungsphase wird die Geschwindigkeit (in der Anfangsphase wird zumindest von erfahrenen Fahrern eher zu schnell gefahren) in einem Bereich gehalten, welcher der realen Fahrt in etwa entspricht (siehe auch die Versuche von Abendroth et al. 2012). Auch nach Erfahrung des Autors neigen Versuchspersonen gerade in sog. statischen Fahrsimulatoren (ohne Simulation der Bewegungsreize) dazu, die volle Leistung beim Beschleunigen abzurufen und ebenso zu extremen Bremsmanövern. Die Spurhaltungsgüte ist in einem solchen Simulator meist deutlich schlechter als in der Realität. Wegen der geringeren optischen Bildschärfe (s. u.) werden im Simulator aber größere Abstände gehalten als in der Realität.

3 Im Allgemeinen ist dieser Nachweis allein deswegen nicht zu erbringen, weil es sehr aufwändig und nur bei geeigneter Software überhaupt möglich ist, die gleiche typologische Situation der Realität im Simulator wiederzugeben, und es praktisch unmöglich ist, die ständig wechselnde Verkehrssituation der Realität originalgetreu im Simulator zu reproduzieren.

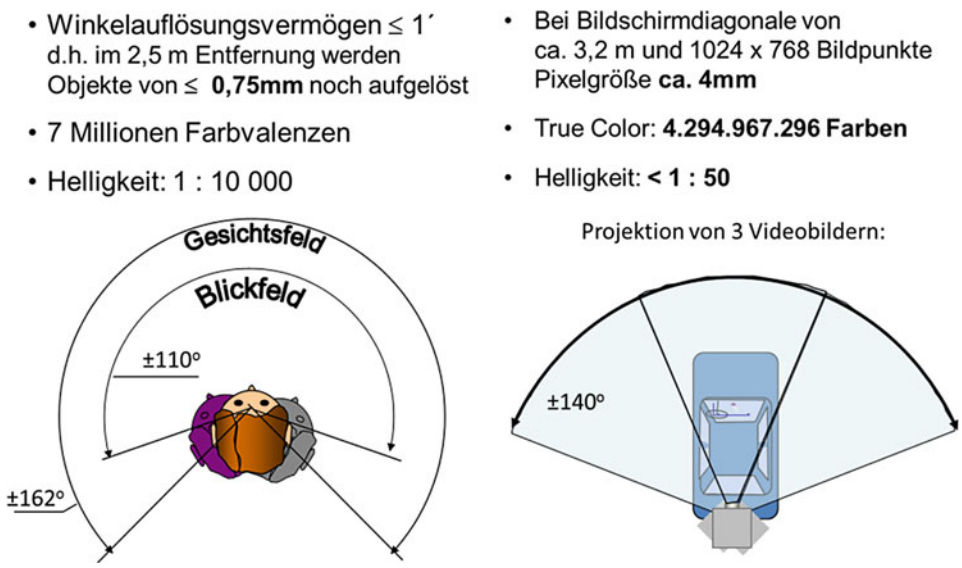


Abb. 10.10 Notwendiges Blickfeld auf die Videobilder in einem Fahrsimulator

Negele (2007) hält fest, dass für die *relative Validität*[4] demgegenüber nicht zwangsläufig die vollkommene Übereinstimmung der physikalischen Simulationsparameter mit der Realität erforderlich ist. Ob die relative Validität in einem für die Anwendung ausreichenden Maß gegeben ist, hängt davon ab, ob der Proband die Simulatorfahrt als die Regelaufgabe „Führen eines Fahrzeugs" erkennt und akzeptiert. Entscheidend hierfür ist das Entstehen eines hinreichenden Präsenzgefühls, also das Erleben, in der simulierten Welt zu sein und sich in ihr zu bewegen. Dass dieser Effekt gut zu erreichen ist, wird aus folgenden einfachen Beobachtungen anschaulich: auch wenn in einem statischen Fahrsimulator keine Rückspiegelinformationen bereitgestellt werden, kann beobachtet werden, dass auch beim Spurwechsel auf der Autobahn in den Rückspiegel geschaut und auch der Schulterblick durchgeführt wird. Beim Anhalten des Fahrzeuges wird bei einem Simulator mit originaler Fahrzeugkabine oft beobachtet, dass die Handbremse gezogen wird und dass sich die Versuchsperson beim Aussteigen aus dem Simulatorfahrzeug gegen den – nicht vorhandenen – rückwärtigen Verkehr absichert. Dies alles zeigt, dass bei hinreichend guter Immersion Verhaltensmuster angeregt und abgerufen werden, die im realen Verkehr erworben worden sind. Insofern können Fragestellungen, welche die Nutzung solcher innerer Modelle voraussetzen, im Simulator durchaus bearbeitet und deren Ergebnisse mit aller Vorsicht auf das Verhalten im realen Fahrgeschehen übertragen werden. Fahrsimulatoren eignen sich also besonders für die Bewertung sekundärer bzw. tertiärer Aufgaben und für vergleichende Studien.

4 Relative Validität liegt vor, wenn die zu vergleichenden Kennwerte im Simulator dieselbe Tendenz wie im Feldversuch aufweisen, aber sich in ihrer absoluten Größe voneinander unterscheiden (Blana 1996). Nach den Erfahrungen des Autors kommt es praktisch nie vor, dass eine im Simulator gefundene Tendenz sich in der Realität umkehrt.

10.4.2 Simulatortechniken

Bezüglich der Simulatortechnik werden im Folgenden die Hardware- und Software-Voraussetzungen eines Fahrsimulators knapp aufgezeigt und beschrieben (in Negele 2007 findet sich eine ausführliche Diskussion der verschiedenen Techniken für Fahrsimulatoren).

Nachdem über 80 % aller für den Fahrprozess wichtigen Informationen über den optischen Kanal vermittelt werden, ist der Sichtsimulation die größte Bedeutung beizumessen. Der Abstand des Bildmediums vom Auge ist dabei für den geometrischen Entwurf des Simulators ausschlaggebend. Um eine

praxisgerechte Akkommodation des Auges zu erreichen, ist ein Abstand von min. 2,5–3 m zu empfehlen. Der Blickwechsel vom Interieur (z. B. I-Kombi) zur Fahrszene ist somit ohne Auswirkungen auf die Immersion möglich. Für den horizontalen und vertikalen Sichtbereich ist die Verdeckung ein entscheidender Einflussfaktor für das Präsensempfinden. Auf einen 360° Sichtbereich kann häufig aufgrund der meist verdeckten rückwärtigen Sicht (Fahrzeug selbst, Blick über Rückspiegel) sowie bei Anwendungen, die keinen hohen Grad an Präsenzempfinden und vollständigen Blickwinkel fordern, verzichtet werden. Allerdings spielt die horizontale Breite des Sichtfelds für das Verhalten im Simulator eine entscheidende Rolle. Kapstein et al. (1996) stellten in einem dynamischen Fahrsimulator beispielsweise fest, dass ab einem Gesichtsfeld von 120° ein Bremsvorgang kontrollierter abläuft als bei deutlich niedrigerem Gesichtsfeld. Auch Jamson (2000) beobachtet, das bis zu diesem Wert von 120° die Geschwindigkeitsabschätzung besser wird, danach aber kaum noch Verbesserungen festzustellen sind. Der Schwerpunkt für die Auslegung liegt also bei alledem klar in der Frontsicht. Für die Auslegung ist vom horizontalen Sichtbereich auszugehen, sodann der vertikale Sichtbereich und der Abstand des Bildmediums vom Auge zu bestimmen und somit die Bildgröße zu definieren (◘ Abb. 10.10).

Das für die geometrischen Ergonomieuntersuchungen gut nutzbare Head-Mounted Display (▶ Abschn. 10.3.3.2) ist gegenwärtig jedoch für Untersuchungen im Bereiche der Fahrer-Fahrzeug Kommunikation als nicht geeignet einzustufen. Das Head-Tracking mit dem Nachführen der Simulation bezüglich der Augenposition des Probanden wäre zwar theoretisch ein Gewinn, bisher sind dafür aber keine Entwicklungssimulatoren bekannt, was wohl auf das träge Nachrechnen der aktuellen kopfbedingten Position zurückzuführen ist, was zusätzlich zu Kinetoseeffekten führt. Für einen mehrkanaligen Sichtbereich ist eine Bearbeitung der Überlappungsbereiche notwendig (Edge-Blending). Aufgrund der Sehschärfe (1 Winkelminute ≈ 0,01°) des Menschen und des Abstands zum Bildmedium kann die Bildauflösung berechnet werden (siehe auch ◘ Abb. 10.10), welche sich erheblich auf die Kosten auswirkt. Die Auflösung richtet sich auch nach dem Anspruch an Lesbarkeit von Objekten (Verkehrszeichen usw.). Der obere Grenzwert für eine sehr gute Immersion liegt bei 2–3 Bogenminuten/Pixel. Man unterscheidet Auf- und Rückprojektion, wobei letztere normalerweise eigentlich schon aus Gründen des verfügbaren Raums nur bei dem Konzept Fixed-Screen sinnvoll ist. Für die Bildberechnung steht demgegenüber die verzögerungs- und ruckfreie Darstellung im Vordergrund, welche für eine gute Immersion wichtiger als die Auflösung zu erachten ist. Für die Bilddarstellung ist zwischen Monitor und Projektion mit Leinwand zu unterscheiden. Während es bei dem Projektionsprinzip prinzipiell möglich ist, durch Anwendung mehrerer Projektoren (meist genügen für den Frontalbereich 3 Projektoren) ein hinreichend großes Blickfeld für den Fahrer im Simulator zu erzeugen, ist dies auch mit den heute verfügbaren großen Monitoren nur schwer möglich. Insbesondere gibt es bisher kein Verfahren, mit dem der Übergang von einem zum anderen Monitor für den Betrachter quasi unsichtbar wird (Edge-Blending). Unabhängig von dem verwendeten Bilderzeugungsmedium ist für eine gute Immersion die korrekte Blickwinkeldarstellung notwendig. ◘ Abbildung 10.11 zeigt die entsprechenden geometrischen Verhältnisse. Die Mindestforderung ist, dass sich der Horizont auf dem Bild exakt in Augenhöhe h des Probanden befindet[5]. Die virtuelle Augenhöhe, die in dem Softwareprogramm verwendet wird, muss mit dieser realen Augenhöhe übereinstimmen. Am besten nutzt man ein gerades Stück Fahrbahn in dem Softwareprogramm und liest die Position y_L des virtuellen Fahrerauges zur linken Fahrbahn und y_R zur rechten Fahrbahn ab. Bei dem Abstand d_S der Leinwand bzw. des Bildschirms zum realen Fahrerauge muss sich eine quer über der Fahrbahn liegende Linie, die sich im virtuellen Abstand d vom virtuellen Fahrerauge befindet um den Abstand h_S unterhalb der Horizontlinie befinden. Es gilt:

$$h_S = \frac{h \cdot d_S}{d} \tag{10.1}$$

5 Bei genügend großem Abstand d_S der Leinwand bzw. des Bildschirms vom Fahrerauge genügt es, die Horizonthöhe auf die mittlere Höhe des Fahrerauges einzustellen. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass das menschliche Auge extrem tolerant für Verfälschungen der Blickwinkel ist und dass infolgedessen Fehler in der Einrichtung durch bloßes Betrachten nicht erkannt werden. Für eine gute Immersion ist aber die korrekte Blickwinkeleinhaltung unabdingbar.

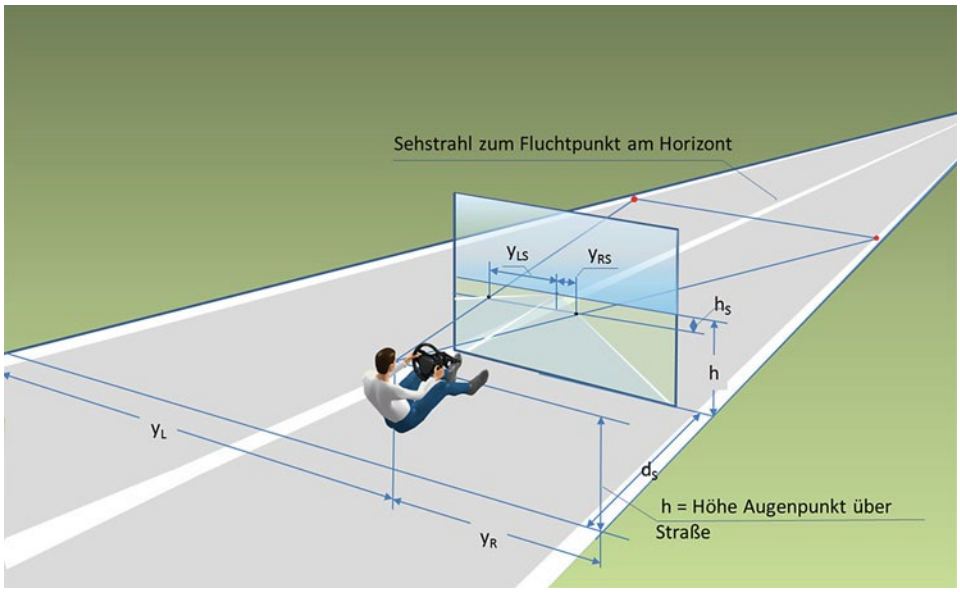


Abb. 10.11 Geometrieverhältnisse für die Einstellung der korrekten Blickwinkel

Entsprechendes gilt für die horizontalen Abstände y_{LS} und y_{RS} der kalibrierenden querliegenden Linie zu den Fahrbahnrändern:

$$y_{RS} = \frac{y_R \cdot d_S}{d} \quad \text{und} \quad y_{LS} = \frac{y_{RL} \cdot d_S}{d} \tag{10.2}$$

Wenn nur ein kleiner Bildschirm zur Verfügung steht, kann man mittels einer großen Fresnellinse die korrekten Blickwinkelverhältnisse herstellen (Abb. 10.12). Für den nötigen Abstand a des Bildschirms von der Fresnellinse mit der Brennweite f gilt, wenn die anzuzeigende Entfernung d auf dem Bildschirm h_B unterhalb der Horizontlinie liegt:

$$a = \frac{h_B \cdot d}{h} \tag{10.3}$$

Eine weitere Steigerung der Immersion kann erreicht werden, wenn auf den beiden Außenspiegeln und im Innenraumrückspiegel entsprechende Informationen dargeboten werden. In vielen Fällen wird man für diesen Zweck kleine Bildschirme verwenden. Eine wesentlich realistischere Darstellung erreicht man allerdings, wenn man auch für die Rückspiegel eine Projektionswand verwendet, da dann die natürlichen Körper- und Kopfbewegungen zur Erweiterung des Einblickwinkels in den Rückspiegel einen ähnlichen Effekt wie in der Realität bewirken. Wegen der unterschiedlichen Perspektiven muss man in diesem Fall allerdings drei Projektoren verwenden. Abbildung 10.13b gibt dafür ein Beispiel.

Wie bereits erwähnt, stellt die *Bewegungssimulation* einen wichtigen Immersionsfaktor dar, wobei sie zugleich höchste Anforderungen an die Simulationstechnik stellt[6]. Das Bewegungssystem soll translatorische und rotatorische Beschleunigungen nachbilden. Aus den von Negele zusammengestellten Veröffentlichungen kann allerdings keine einheitliche Aussage bzgl. des Nutzens eines Bewegungssystems gezogen werden. Dies ist darin begründet, dass technische Vergleichswerte durch das jeweilige Motion-Cueing (Bewegungswahrnehmung) verfälscht werden, meist keine Werte direkt aus der Fahrzeugkabine vorhanden sind, die Gesamtheit der Sinneseindrücke für verschiedene Simulatoren unterschiedlich ist und die gewonnenen Daten vom Versuchsablauf abhängen. Für die Konzipierung eines Fahrsimulators gelten folgende Aussagen: Ein gut abgestimmtes Bewegungssystem bewirkt keine Verschlechterung des Fahrerverhaltens (Referenz

6 Auch hier wird auf die ausführliche Arbeit von Negele (2007) verwiesen.

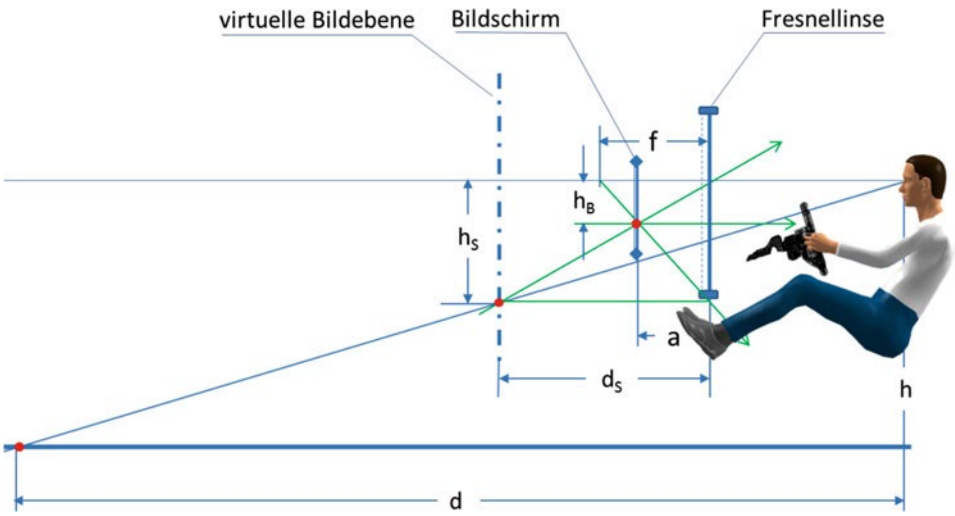


Abb. 10.12 Herstellung korrekter Blickwinkelverhältnisse zur Verbesserung der Immersion bei kleinem Bildschirm (die grünen Linien charakterisieren die Konstruktion des virtuellen Bildes gemäß den Regeln der geometrischen Optik

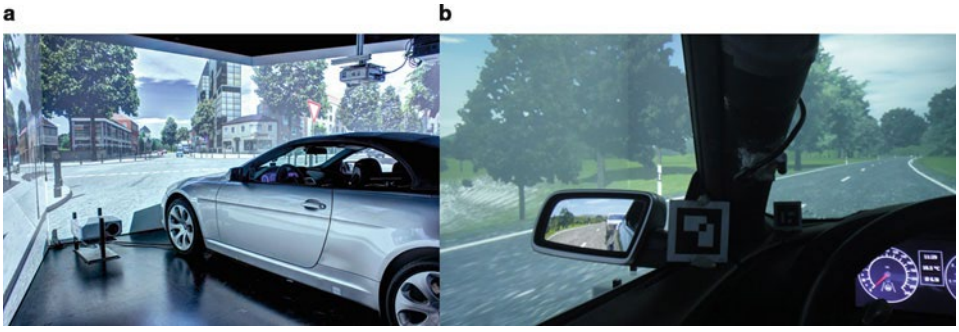


Abb. 10.13 Projektionseinrichtung für Rückspiegel (**a**) und Rückspiegelsicht (**b**; Beispiel: Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ergonomie der Technischen Universität München)

ist das Fahren in der Realität), wirkt auf der Stabilisierungsebene der primären Fahraufgabe und wirkt sich positiv beim Erfüllen einer Nebenaufgabe aus.

Für die Darstellung der realen Beschleunigung werden drei Methoden unterschieden.

1. Eine translatorische Bewegung wird in eine Neigung überführt (Neigungssimulation, Wahrnehmungsschwelle 25°) und über eine Rückführung zur Nulllage abgeschlossen (Wash-out, Wahrnehmungsschwelle 2–6 °/sec² s. o.). Abbildung 10.14 zeigt als Beispiel für eine aufwändige Simulationstechnik den NADS-Simulator. Durch die Verwendung eines Hexapods sind einerseits in einem kleinen Bereich sowohl Rotations- als auch Translationsbewegungen möglich. Für größere Längsbeschleunigungen sitzt die gesamte Simulationstechnik auf einem X-Y-Verfahrschlitten, der u. a. dazu genutzt wird, Spurwechselvorgänge korrekt abzubilden.
2. Bei dieser Methode werden die Daten aus der Fahrdynamik mit einem Faktor skaliert, um so die notwendigen Verfahrwege kleiner zu halten. Oftmals versucht man so mit den Bewegungsmöglichkeiten eines Hexapods auszukommen. Der Skalierungsfaktor kann jedoch nicht über den gesamten Frequenzbereich konstant gehalten werden.
3. Eine weitere Methode ist die Darstellung der translatorischen Beschleunigung durch Fliehkräfte. Dabei wird das Mock-Up auf einem

Abb. 10.14 NADS-Simulator auf Hexapod und x-y Verfahrschlitten zur Simulation kinästhetischer Reize unter Nutzung von Wash-out-Effekten

XY-Schlitten mit Rotationsplattform montiert. Dadurch ist eine gute Darstellung der translatorischen Beschleunigung möglich. Derzeit besteht allerdings keine Möglichkeit, ohne Skalierungsfaktor den gesamten Beschleunigungsbereich abzudecken.

Werden die einwirkenden Bewegungen auf den Fahrer mit den Möglichkeiten des Bewegungssystems verglichen, können vier signifikante Ausführungsstufen abgeleitet werden. Die Aufbaubewegung (Nick-, Wank- und Hubbewegung), welche selbst durch kleine Bewegungssysteme zu sehr guten Ergebnissen führen (s. u.). Die Aufbaubewegung und Bahnbewegungsinformation auf Stabilisierungsniveau verbessern die Spurhaltung. Die abzubildenden Frequenzen liegen im Bereich von 1,5 Hz. Die Aufbaubewegung und Bahnbewegungsinformation auf hochfrequentem Fahrdynamikniveau kann nur auf größeren Bewegungssystemen realisiert werden (Verfahrweg ± 1,5 m). Die abzubildenden Frequenzen liegen ebenfalls im Bereich von 1,5 Hz, müssen aber länger gehalten werden (Wash-out kaschiert durch Rückführung der Aufbaubewegung). Die Aufbaubewegung und länger andauernde Bahnbewegungsinformationen stellen den höchsten Anspruch und fordern kombinierte Systeme (siehe auch Abb. 10.14). Die translatorischen Verfahrvorrichtungen sind dabei gegenüber den uneingeschränkten Vorgaben der Realität nur in einem eingeschränkten Bereich nutzbar (siehe Argumentation zu Beginn dieses Teilkapitels). Eigene Erfahrungen mit Simulatortechnik und -versuche legen nahe, dass es bei der Bewegungssimulation weniger auf die genaue Wiedergabe der in der Realität vorliegenden Beschleunigungen ankommt, sondern eher auf die exakten zeitlichen Relationen. So kann es vollkommen ausreichend sein, die Fahrzeugkabine auf hydraulisch oder elektrisch aktivierbare Pulser zu setzen und beim Anfahren bzw. Beschleunigen durch kurzes Einknicken des Aufbaus, der aber zeitlich in korrekten Bezug zur Realität steht (< 200 ms beim Bremsen) ein kinästhetisches Gefühl der Reaktion zu vermitteln. Ähnliches gilt für Lenkbewegungen. Erfahrungen mit simulierter Stadtdurchfahrt legen nahe, dass die Gierbewegung korrekt wiedergegeben werden müsste, was notwendig macht, dass der ganze Simulationsaufbau auf eine durch die Simulationssoftware gesteuerte Drehscheibe zu montieren ist.

Die *Geräuschsimulation* in Lautstärke und Richtung stellt einen sehr wichtigen Beitrag zum Erzeugen eines guten Präsenzempfindens innerhalb der Simulationsumgebung dar. Zudem wird durch die Geräuschdarbietung das Regelverhalten des Menschen positiv beeinflusst. Neben den fahrzustandsabhängigen Geräuschen spielen dabei auch die vielfältigen Stand- und Nebengeräusche, die der Fahrer mit der Fahrt im Kraftfahrzeug in Verbindung bringt, eine wichtige Rolle. Dazu zählen auch die „fühlbaren" Geräusche (< 20 Hz). Diese können durch Körperschallwandler oder Hydropuls-Zylinder erzeugt werden, wobei eine Darstellung über das Bewegungssystem als unangenehm empfunden

wird. Für die Verteilung und mögliche Überlagerungen sind Equalizer vorzusehen. Die Positionierung aller beteiligten Geräuschquellen ist dabei sehr wichtig. Das bedeutet beispielsweise, dass die das Motorgeräusch simulierenden Spektren eher aus Lautsprechern im Frontbereich der Kabine kommen sollten, während Geräusche, die dem Fahrwerk zuzuordnen sind, aus hinteren, möglichst niedrig montierten Lautsprechern kommen sollten.

Der Aufbau eines realen *Mock-ups* hat direkten Einfluss auf das Präsenzempfinden der Probanden. Für die Ausprägung der Mensch-Maschine-Schnittstelle ist die Aufgabenstellung maßgebend. In Abhängigkeit von der Fragestellung kann sich diese von einfachen Bedienelementen über das reale Interieur bis zu freiprogrammierbaren Bedien- und Anzeigenelementen erstrecken.

Von großer Bedeutung ist die *Lenksimulation*. Die Eingabewerte des Rückstellmomentes erhält das Modell von der Fahrdynamik. An das Moment werden sehr hohe Ansprüche gestellt (Reaktionszeit des lokalen Haltereflex 0,02sec, Kraftauflösung der Hand 2 % der Haltekraft, wobei die hohe vibrotaktile Empfindlichkeit der Hand zu berücksichtigen ist). Außerdem kann es von Vorteil sein, das Konzept „Hardware in the loop" (HIL) anzuwenden (d. h. es wird eine in der Serie verwendete – im Allgemeinen elektrische – Lenkung verwendet, die von der Software des virtuellen Fahrzeugmodells angesteuert wird). Das Fahrpedal kann durch ein elektronisches Pedal (Serie) realisiert werden. Für das Bremspedal sind verschiedene zufriedenstellende Federlösungen realisiert worden.

Obwohl heute auf dem Spielesektor aus Sicht der Grafik und auch der dynamischen Reaktion zu niedrigen Preisen erstaunliche *Simulationsprogramme* verfügbar sind, die aber leider für versuchstechnische Zwecke kaum anpassbar sind, stellt die Software eines Fahrsimulators immer noch einen sehr kostspieligen Faktor dar. Die Datenbasis für in der Fahrzeugentwicklung einsetzbare Software ist die virtuelle Repräsentation der Umgebung und beinhaltet die Terrainbeschreibung, Fahrbahnverlauf, Fahrbahneigenschaften, Modelle, logische Informationen und Texturen. Hochwertige Modelle und Texturen verbessern das Präsenzempfinden und die Regeltätigkeit durch einen realitätsnahen Geschwindigkeits- und Entfernungseindruck. Es können drei Arten von Datenbasen unterschieden werden.

- Die *statische Datenbasis* enthält eine einzige maßstabsgetreue Karte der gesamten Landschaft, innerhalb welcher der ganze Simulationsbetrieb abläuft. Änderungen, die womöglich aus versuchstechnischen Gründen wünschenswert sind, sind nur in sehr eingeschränktem Maße möglich (meist beschränkt auf variables Setzen von Verkehrszeichen!).
- Bei der *modular statischen Datenbasis* werden Landschaft und Straßenverlauf aus vorgegebenen, statischen und lokal geometrisch konsistenten Modulen zusammengesetzt.
- Bei der *dynamischen Datenbasis* wird nicht ein Straßenverlauf vorgegeben, sondern eine Logik, welche Straßenstücke als Bestandteil von Umgebungsmodulen während der Simulation aneinanderreiht (Kaussner et al. 2001, 2004). Daraus resultiert ein vom Fahrerverhalten und ggf. auch von der Verkehrssituation abhängiger Straßenverlauf, der global geometrisch nicht konsistent sein muss. Bei den beiden modularen Ansätzen ergeben sich aufgrund der nicht zwangsläufig gegebenen geometrischen Konsistenz und der erforderlichen „Passung" zwischen allen Modulen Einschränkungen hinsichtlich der Ausgestaltung der umgebenden Landschaft. So ist bei diesen beiden Typen eine weitreichende Sicht aufgrund der Modularchitektur der Landschaft häufig problematisch (Negele 2007).

Die perspektivische Berechnung muss korrekt sein (siehe ◘ Abb. 10.11). Der Realitätsgrad kann ggf. unterschieden werden in Nahbereiche und Fernbereich, d. h. es gibt Ausstattungen, die nur im Nahbereich (Stabilisierungsaufgabe) oder nur im Fernbereich (Hinweisreize für die Bahnführung) eine hohe Qualität aufweisen müssen. Die Verkehrssimulation beinhaltet Fahrzeugmodelle, welche aufgrund eines vordefinierten Regelsatzes den Kurs der autonomen Fahrzeuge bestimmen. Für bestimmte Szenarien gerade in Verbindung mit der möglichen Wirkung von Assistenzsystemen, aber auch in Verbindung mit Sichtuntersuchungen (siehe u. a. die Untersuchungen von Remlinger 2013) auf den Fahrer müssen Fahrzeuge ereignisabhängig eingesetzt werden können.

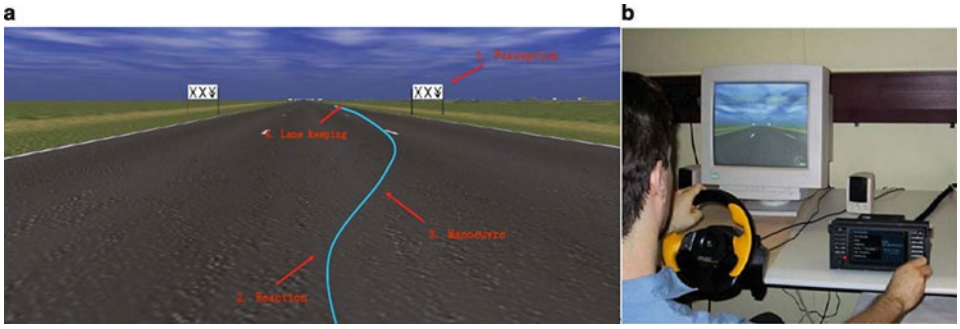


Abb. 10.15 Darstellung der Fahraufgabe im Lane-Change-Test-Programm (**a**) und häufig anzutreffender Versuchsaufbau (**b**)

10.4.3 Aussagekraft von Fahrsimulatoren unterschiedlichen Niveaus

Simulatoren, welche ein sehr gutes Präsenzerlebnis ermöglichen, sind nach den Ausführungen des ▶ Abschn. 10.4.2 sehr aufwändig und damit auch sehr kostspielig. Es erhebt sich folglich die Frage, welche Abstriche an technischem Aufwand man in Verbindung mit spezifischen Fragestellungen akzeptieren kann. Nach Negele (2007) sollte man zur Beantwortung dieser Frage in folgenden Schritten vorgehen:

1. Ermittlung der Reiz-Reaktionsmechanismen, die einer bestimmten Fahraufgabe zu Grunde liegen.
2. Auf der Grundlage des Schrittes 1 Aussage über die Möglichkeit des Menschen, fehlende Wahrnehmungen im Simulator mental auszugleichen, um so dennoch valide Ergebnisse zu erzielen.
3. Ableitung des Simulatorkonzepts und der erforderlichen Technik.

Zu Schritt 1: Die notwendigen Reize, die ein Simulator bereitzustellen hat, können auf der Grundlage der verschiedenen Niveaus der Fahraufgabe ermittelt werden. So ist auf der Ebene der *Stabilisierungsaufgabe,* welche der *primären Fahraufgabe* zu zuordnen ist, insbesondere der Geschwindigkeitseindruck und die Position des Fahrzeugs auf der Straße von ausschlaggebender Bedeutung. Der Geschwindigkeitseindruck wird dabei mehr durch die Bildauflösung im zentralen Sehbereich bestimmt als durch periphere Bewegungsreize, welche hinwieder einen guten Eindruck der Bewegungsrichtung bewirken. Nicht nur die Qualität der Bildauflösung ist aber von Bedeutung, sondern besonders das Vorhandensein von Bezugspunkten, die sich korrekt entsprechend der eigenen Geschwindigkeit bewegen. Weiterhin ist auf den wichtigen Einfluss des Gehörs hinzuweisen, wodurch wesentlich das Geschwindigkeitsniveau geschätzt wird. Bezüglich der richtigen Wahrnehmung der Position auf der Straße hat eine dem Erfahrungsbereich der Versuchsperson entsprechende Fahrzeugkabine große Bedeutung[7]. Da mit den der Simulation zugänglichen Methoden eine vollständige Nachbildung der realen Beschleunigungsreize nicht möglich ist, muss in Simulatoren immer mit einem von der Realität abweichenden Beschleunigungs- und Bremsverhalten gerechnet werden. Von besonderer Bedeutung ist weiterhin die möglichst originalgetreue Simulation von haptischen Reizen durch die Bedienelemente.

Auf der *Bahnführungsebene* basiert die Bildung der Soll-Geschwindigkeit und des Soll-Kurses ausschließlich auf dem Geschwindigkeitseindruck und auf der optischen Einschätzung des Abstandes zu den Objekten der Umgebung, woraus mental Größen wie Time-to-Collision und Time-to-Line-Crossing gebildet werden. Damit sind nochmals erhöhte Anforde-

7 In Videospielen kompensiert man die nicht vorhandene Kabine oft dadurch, dass das Ego-Fahrzeug im unteren Teil des Bildes dargestellt wird, auf das man im Sinne einer Bird-View-Anzeige blickt. Diese Darstellungsform ist jedoch für die Anwendung im wissenschaftlichen Bereich oder für frühzeitige Beantwortung von Fragen in der Fahrzeugentwicklung vollkommen ungeeignet, weil sie aus der primär als Kompensationsaufgabe aufzufassenden Aufgabe des Fahrens partiell eine Folgeaufgabe macht.

rungen an die Auflösung der dargestellten Szenerie sowie an die verschiedener Witterungszustände abzuleiten. Insbesondere eine realistische Darstellung des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer ist von ausschlaggebender Bedeutung. Dazu gehört auch die Darstellung der Szenerie im Rückspiegel.

Für Untersuchungen *sekundärer Fahraufgaben* sollte die primäre Fahraufgabe hinsichtlich der schnelleren Erlernbarkeit und des Präsenzempfindens so gut nachgebildet sein, dass eine länger andauernde Normalfahrt problemlos möglich ist. Es ist auf die Notwendigkeit einer gleichmäßigen wenig lichtstarken Beleuchtung des Fahrzeuginnenraums hinzuweisen, die der das Präsenzempfinden störenden Wahrnehmung einer Tagesfahrt – betrachtet aus einem dunklen Fahrzeuginnenraum – entgegen wirkt.

Die für sekundäre Aufgaben relevanten Anforderungen gelten grundsätzlich auch für *tertiäre Aufgaben.* Da tertiäre Aufgaben aber nicht in Verbindung mit der Fahraufgabe stehen, können zu deren Untersuchung auch von den obigen Forderungen weitgehend abweichende Simulatoren, z. B. in Form von Trackingaufgaben, verwendet werden. Hierfür ist der so genannte Lane-Change-Test ein Quasi-Standard geworden. Es handelt sich hierbei um ein auf jedem PC implementierbares Programm, das mit den Bedienelementen einer Spielkonsole (Lenkrad, Fahrpedal und Bremspedal) verbunden wird. Die Fahraufgabe besteht darin, bei konstant zu haltender Geschwindigkeit (zum Beispiel 100 km/h) das Fahrzeug auf einem Fahrstreifen einer dreispurigen Autobahn zu halten und die Spur zu wechseln, wenn durch ein Verkehrszeichen dazu aufgefordert wird (siehe ◘ Abb. 10.15a). Für die Verwendung dieses Programms werden im Allgemeinen keine Vorschriften bezüglich der anthropometrischen Bedingungen oder der Blickwinkelverhältnisse gemacht, so dass der Versuchsaufbau häufig aus einem Bürostuhl und einem auf einem gewöhnlichen Arbeitstisch befindlichen PC-Bildschirm besteht (siehe ◘ Abb. 10.15b). Unter diesen Bedingungen kann kaum vom Entstehen einer hinreichenden Involviertheit oder gar eines ausreichenden Präsenzgefühl ausgegangen werden. Wenn überhaupt – kann Versuchen mit dieser Anordnung nur eine relative Validität zugesprochen werden.

Für die Nutzung von mehr elaborierten Fahrsimulatoren sprechen also auch bei Fragen zu tertiären Aufgaben durchaus Gründe, wie die Entbehrlichkeit des Erlernens einer speziellen Trackingaufgabe oder einer untypischen Fahraufgabe und der erleichterte gedankliche Transfer des getesteten Systems in die reale Fahraufgabe.

Handeln im Straßenverkehr ist immer auch soziales Handeln. Viele soziale Konventionen, die im Straßenverkehr Gültigkeit haben, sind in dieser Form im Simulator nicht gegeben. Durch das Koppeln von zwei Simulatoren (die Fahrzeugposition im Simulator 1 wird als Fremdfahrzeug im Simulator 2 gezeigt und umgekehrt), wie es unter anderen auch bei Kampfflugzeugsimulatoren angewendet wird, kann man zwar versuchen, ein wenig menschliche Individualität in die Simulation einzubringen, da aber indirekte Informationen, wie die Körperhaltung des „gegnerischen" Fahrers oder dessen Gestik nicht simulierbar ist, stößt man hier neben dem Problem der Simulation kinästhetischer Reize an eine weitere Grenze der Simulationstechnik. Für die korrekte Interpretation von Simulatorergebnissen spielen dann auch Faktoren eine Rolle, wie die Erfahrung der Versuchspersonen mit Simulatoren, die Nichtsimulierbarkeit existenziellen Engagements und auch die Tendenz der Versuchspersonen, „eine gute Figur zu machen".

Zu Schritt 2: Negele (2007) hat ein System zur Klassifizierung von fahrzeugtechnischen Anwendungen erstellt, das es ermöglicht abzuschätzen, bis zu welchem Grad eine Abweichung von der Realität zulässig ist. Diese Systematik basiert darauf, die verschiedenen Niveaus der Fahraufgabe den unterschiedlichen Niveaus des Fahrerverhaltens nach Rasmussen gegenüber zu stellen (siehe ◘ Abb. 10.16). Daraus ergeben sich 15 Anwendungsklassen. Dem System kann allgemein entnommen werden: je größer der bewusste kognitive Aufwand zum Erledigen einer Aufgabe ist, umso mehr kann von einem strengen Realitätsbezug abgewichen werden. Auf der Grundlage der Annahme, dass im Bereich der Fahrzeugentwicklung in der Regel erfahrene Normalfahrer als Versuchspersonen herangezogen werden, bleiben auch einige Kategorien unbesetzt. So gibt es beispielsweise für den normal erfahrenen Fahrer keine

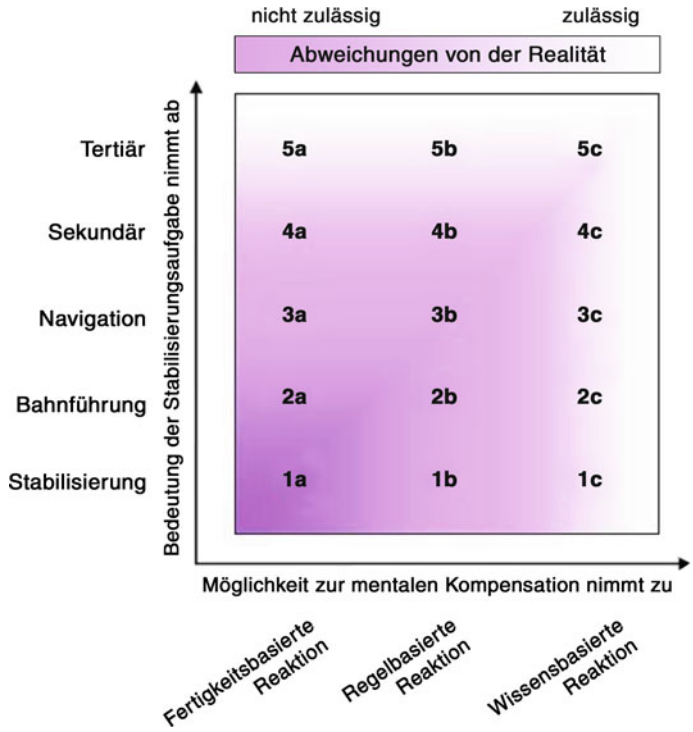


Abb. 10.16 Klassifizierung fahrzeugtechnischer Anwendungen (aus Negele 2007)

10

Handlungen auf der Stabilisierungsebene, welche wissensbasiert ablaufen, wie es bei einem Fahranfänger der Fall ist (1 c). Das bedeutet zum Beispiel auch, dass ein Schulungssimulator für Fahranfänger keine besonderen Anforderungen an die Bewegungssimulation stellt. Auch fertigkeitsbasiertes Navigieren (3a), wie es z. B. dem täglichen Weg zur Arbeit entspricht, kann im Simulator kaum abgebildet werden.

Trotz dieser Klassifizierung ist es für den Entwickler unerlässlich, eine genaue Vorstellung davon zu haben, auf welche Parameter das Versuchsergebnis sensibel reagieren wird, um dies in den Details der Spezifikation zu berücksichtigen.

Zu Schritt 3: Um dem Fahrzeugentwickler die Einordnung seiner Anwendung zu erleichtern, beschreibt Negele auf der Grundlage der Matrix die folgenden 6 typischen Ausführungen von Fahrzeugsimulatoren:

1. Die Untersuchung *fertigkeitsbasierter Stabilisierung* stellt die höchste Anforderung an die primäre Fahraufgabe und damit an die Bewegungssimulation. Typisch für die Simulatorkonfiguration ist in diesem Falle die Priorisierung der Bewegungssimulation vor der Sichtsimulation. Falls Untersuchungen zur Vertikaldynamik anstehen, sind nochmals besondere Anforderungen an die originalgetreue Simulation der Querbewegung notwendig (Beispiel siehe Abb. 10.14).
2. Bei der verkehrstechnischen Untersuchung der *regelbasierten Bahnführung* ist vorrangig auf die Qualität und Flexibilität der Datenbasis und der Verkehrssimulation zu achten. Insbesondere muss die Software ermöglichen, Verkehrssituationen durch das Verhalten des Fahrers zu triggern, um so jeden Probanden mit der gewünschten Situation zu konfrontieren. Um eine möglichst gute Involviertheit zu erreichen, ist auch die primäre Fahraufgabe in ausreichender Qualität abzubilden. Bewegungsinformation ist hingegen nur insofern relevant, als die primäre Fahraufgabe annähernd so einfach wie in der Realität zu bewältigen ist. Ein typisches Beispiel für einen Simulator, der diese Ansprüche erfüllt, zeigt Abb. 10.13.
3. Für die Simulation von Aufgaben, welche die *regel- und wissensbasierte Navigation* zum Ge-

genstand haben, kann ein Fahrsimulator im Zusammenhang mit der Navigation reproduzierbare Bedingungen für Grundlagenuntersuchungen über die Orientierung des Menschen in einer nicht vertrauten Umgebung liefern. Diese Anwendung muss von Untersuchungen zur Mensch-Maschine-Schnittstelle, die die Bedienung des Navigationsgerätes zum Gegenstand hat, unterschieden werden. Die Anforderungen an den Simulator sind hinsichtlich der Sicht-Wiedergabe nicht so hoch wie in den zuerst genannten Fällen. Auf eine Bewegungssimulation kann ganz verzichtet werden. Der Erkenntnisgewinn wird bei derartigen Untersuchungen in der Regel durch Befragung und Beobachtung des Fahrers am besten in Verbindung mit Blickerfassungssystemen erreicht.

4. Bei der Untersuchung *regelbasierter sekundärer Aufgaben* (z. B. Setzen des Richtungsanzeigers) dient die primäre Fahraufgabe vor allem dazu, den erforderlichen Kontext an Verkehrssituationen zu schaffen. Bei solchen Aufgaben ist das Präsenzempfinden besonders wichtig, welches durch die Simulation möglichst aller relevanten Sinnesorgane und durch die Einstellung des Probanden selbst bestimmt ist. Damit werden an Sicht-, Geräusch- und Bewegungssimulation relativ hohe Anforderungen gestellt. Wenn allerdings sekundäre, fahrdynamisch nicht wirksame Systeme untersucht werden (beispielsweise das Schalten verschiedener Wirscherfunktionen), ergeben sich für die Bewegungssimulation nur geringfügige Anforderungen.
5. Bei *wissensbasierten sekundären Aufgaben* (z. B. Nutzungsverhalten von Fahrerassistenzsystemen) sind die zu testenden Funktionen und ihre Auswirkungen auf den Fahrvorgang weitgehend unbekannt. Im Rahmen von Vorentwicklungen können durch solche Versuche erste Hinweise auf das Zusammenspiel von Fahrer und Fahrassistenzsystem und deren Akzeptanz gefunden werden. Die Abweichungen der vom Simulator erzeugten von der realen Fahraufgabe können dabei größer sein. Das gilt jedoch nicht, wenn der Test Aussagen über die Praxistauglichkeit eines Fahrassistenzsystems machen soll. Damit ist das Anforderungsprofil an den Simulator ähnlich dem für regelbasierte sekundäre Aufgaben[8]. Wie Zöller et al. (2013) aber argumentieren, ist für die Untersuchung der fahrdynamischen Einbindung von Assistenzsystemen die – möglichst absolute – Validität von Fahrsimulatoruntersuchungen erst noch zu erforschen.
6. Bei der Untersuchung *regel- und wissensbasierter tertiärer Aufgaben* (z. B. neue Infotainmentsysteme) ergeben sich wegen der Abkopplung von der eigentlichen primären Fahraufgabe größere Freiheitsgrade bei der Aufgabenerfüllung und damit eine höhere Personenabhängigkeit des Verhaltens. Die Fahraufgabe muss damit so gestaltet sein, dass sie möglichst wenig Streuung in die Ergebnisse einbringt. Diese Randbedingungen sind denen für regel- und wissensbasierte sekundäre Aufgaben sehr ähnlich. Untersuchungen dieser Art werden oft mit dem oben erwähnten Lane-Change-Test durchgeführt (Abb. 10.15). Um ein Mindestmaß an Involviertheit zu erreichen, sollte dabei aber wenigstens auf die Einhaltung der korrekten Blickwinkelverhältnisse geachtet werden (zum Beispiel durch Verwendung einer Fresnellinse, siehe auch Abb. 10.12).

10.4.4 Nutzung von Augmented Reality im Realfahrzeug

Das Hauptproblem von Fahrsimulatoren, nämlich durch die nicht vorhandene oder nur eingeschränkte kinästhetische Rückmeldung ein unzureichendes Gefühl für das Fahren und die Fahrdynamik zu bewirken, hat Bock (2008) durch Anwendung von Augmented Reality (AR) zu kompensieren versucht. Er verwendet dazu ein reales Fahrzeug, das auf einem abgesperrten Testgelände mit gegebenem Straßenverlauf bewegt wird. Der

8 Es sei hier darauf hingewiesen, dass bei regelmäßiger Nutzung in der Realität ein kontinuierlicher Übergang von wissensbasierter zu regelbasierter bis hin zu fertigkeitsbasierter Nutzung gegeben ist. Die Einbindung von Bedienvorgängen für Fahrerassistenzsysteme in Abhängigkeit von komplexen Verkehrssituationen kann dort zwei und mehr Wochen benötigen (Weinberger 2001). Ein solcher in der Realität ablaufender Vorgang lässt sich kaum mit Simulatortechnik nachbilden.

Abb. 10.17 Optical See Through HMD Saab AddVisor (SAABTECH 2006, aus Bock 2008)

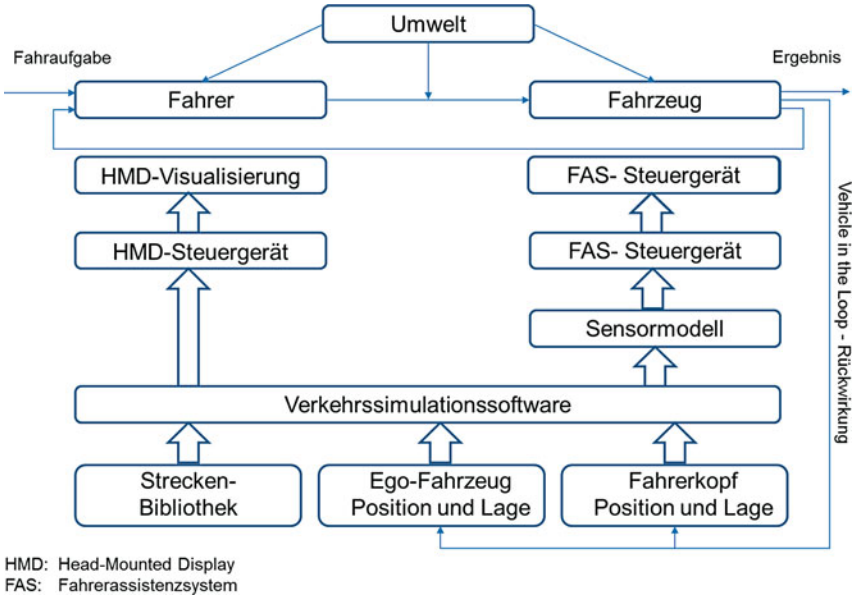


Abb. 10.18 Funktionale Architektur des Vehicle in the Loop Prüfaufbaus (aus Bock 2008)

Abb. 10.19 Sicht der Versuchsperson durch das HMD auf die reale Strecke mit simulierten virtuellen Fahrzeugen (Aus Bock 2008)

Fahrer betrachtet die reale Straße durch ein HMD mit halbdurchlässigen Spiegeln (siehe Abb. 10.17).

Über diese können virtuelle Fremdfahrzeuge eingespiegelt werden, deren Position und Bewegung über ein im Testfahrzeug befindliches Fahrsimulatorprogramm errechnet wird. Voraussetzung für das Funktionieren dieses Systems ist die 1:1-Rekonstruktion der realen Teststrecke in der Simulatorsoftware sowie die Messung der aktuellen Position des Fahrzeugs auf der Strecke und der Kopfposition des Fahrers im Fahrzeug. An das Simulatorprogramm wird nun das reale oder ein prototypisches Assistenzsystem angeschlossen, das auf die virtuellen Fahrzeuge in Abhängigkeit von der Position des Realfahrzeugs reagiert (SIL). Das Zusammenspiel der verschiedenen Komponenten ist in Abb. 10.18 dargestellt.

Abbildung 10.19 gibt die Sicht wieder, die sich der Versuchsperson durch diese Anordnung bietet. Damit ist es ihr also möglich, die Reaktion des Assistenzsystems auf die virtuellen Fahrzeuge in realer Fahrt erleben. Der von Bock realisierte Vorschlag stellt eine „Vehicle-in the Loop"-Lösung (VIL) dar.

Es wendet sich vornehmlich an Versuchsingenieure, was allein schon daraus hervorgeht, dass die Versuche auf einem abgesperrten Gelände, das genau vermessen sein muss, durchgeführt werden müssen. Durch Vergleichsfahrten zwischen Situationen, die im Realfahrzeug durchfahren und die mit diesem VIL-System bewältigt wurden, konnte Bock zeigen, inwieweit bei Anwendung dieses Systems valide Aussagen zu erwarten sind. Er hat diese Versuche auch in Situationen durchgeführt, in denen kein Assistenzsystem aktiv war. So konnte er zeigen, dass der Abstand zum virtuellen Vorderfahrzeug vergleichbar zu den Versuchen im Realfahrzeug abgeschätzt wurde. Die Versuchspersonen reagieren auf die eingeblendeten Fahrzeuge mit ähnlichen Reaktionszeiten und akzeptieren diese als Verkehrsteilnehmer. Überwiegend zeigen sie bei Fahrten mit dem virtuellen Vorderfahrzeug vergleichbares Fahrerverhalten wie im realen Versuch. Insbesondere traten keine Symptome der Simulatorkrankheit wie im Fahrsimulator auf. Es zeigten sich allerdings auch Einschätzungsschwierigkeiten bei Beschleunigungsmanövern des Vorderfahrzeuges im Kurvenverlauf und bei der Einschätzung der Spurzugehörigkeit weit entfernter Fahrzeuge. Auf unerwartet kritische Spurwechselmanöver des vorausfahrenden virtuellen Fahrzeugs reagierte nur ein Teil der Probanden vergleichbar mit der realen Situation. Bock argumentiert, dass der größte Teil dieser Differenzen auf die noch unzureichende technische Realisierung mittels des HMD zurückzuführen sind. Im Zug der schon mehrfach erwähnten, durch die Spielesoftware vorangetriebenen Weiterentwicklung von HMDs dürften diese Probleme aber in Zukunft zu bewältigen sein.

10.5 Versuche im Realfahrzeug

10.5.1 Versuche auf abgesperrtem Gelände

Fast alle Automobilunternehmen verfügen heute über ein eigenes Testgelände, auf dem Fahrzeugprototypen erprobt und untersucht werden können. Im Allgemeinen werden dort Versuche von erfahrenen Testfahrern durchgeführt, die für solche Aufgaben speziell geschult sind. Nur in Ausnahmefällen bzw. auf Testgeländen, die z. B. Forschungsinstituten gehören, werden Versuchsfahrten mit Laien durchgeführt, die nach Möglichkeit ein Repräsentativ für die späteren Kunden darstellen sollen. Da sich solche Versuche häufig mit der Reaktion der Probanden auf unvorhergesehene Situationen befassen, müssen diese so gestaltet sein, dass eine Gefährdung der Personen ausgeschlossen ist. Dazu ist nicht selten erheblicher technischer Aufwand notwendig. Ein in diesem Zusammenhang häufig angewendetes Verfahren ist der Einsatz von so genannten „Luftautos" (Abb. 10.20). Es handelt sich dabei um aus Kunststoff gefertigte aufblasbare Fahrzeugmodelle, die die Dimensionen und das äußere Aussehen eines realen Fahrzeugs haben, wobei eine Kollision mit diesem wegen ihrer Leichtigkeit folgenlos bleibt. Auf ähnliche Weise können auch sog. „Dummys", welche auch andere Verkehrsteilnehmer (z. B. Fußgänger, Kinder) repräsentieren, eingesetzt werden. Für manche Versuchssituationen ist es notwendig, dass sich ein solches Luftauto bzw. Dummy bewegt. Dann ist mit einem oftmals aufwändigen Seilzugsystem diese Bewegung zu simulieren, wobei diese dann womöglich von der Reaktion des eigentlichen Versuchsfahrzeugs abhängt. Es ist hier nicht der Platz, den technischen Aufwand, der für solche Versuchskonstellation notwendig ist, zu beschreiben. Zudem hängt dieser auch

Abb. 10.20 Verwendung eines Luftautos bei der Überprüfung der Wirkung des Notbremsassistenten

immer erheblich von der jeweiligen Fragestellung ab. Als ein Beispiel, wie eine solche Interaktion abläuft, sei das zusammen mit Honda R&D und dem Institut für Fahrzeugtechnik der Universität Darmstadt entwickelte System EVITA genannt (Hoffmann 2008; siehe auch Abb. 10.21). Es besteht aus der Kombination von einem Zugfahrzeug, einem Anhänger und dem nachfolgenden Versuchsfahrzeug, in dem sich der Proband befindet, dessen Reaktionsweise – z. B. bei Ablenkung oder bei einer verspäteten Reaktion eines Assistenzsystems, das einen Auffahrunfall vermeiden soll – untersucht werden soll. Während der stationären Folgefahrt bremst der Anhänger („Dummy Target") für den das nachfolgende Fahrzeug lenkenden Probanden überraschend. Unabhängig davon, ob der Proband auf das Manöver rechtzeitig reagiert oder nicht, wird der Anhänger quasi im letzten Moment aktiv mittels eines Seilzugsystems aus dem Kollisionsbereich gezogen.

In vielen Fällen sind bei solchen Versuchen – wie bei diesem Beispiel – zwei Fahrzeuge involviert, ein so genanntes Targetfahrzeug und das eigentliche Versuchsfahrzeug, in dem sich der Proband mit dem zu beurteilenden Assistenzsystem befindet. Durch das Targetfahrzeug wird die zu untersuchende Situation induziert. So hat beispielsweise Strasser (2011) für die Objektivierung von Assistenzsystemeigenschaften (hier ACC) durch Probandenurteile folgende Testszenarien definiert (siehe auch ▶ Abschn. 9.2.1.3):

- *Auffahren auf eine Kolonne*: für alle drei Einstellungen „sportlich", „Sicherheit" und „Komfort" sollte das System früh, aber mit eher schwacher Dynamik reagieren.
- *Überholen*: Das System sollte prompt reagieren und den Überholvorgang mit mäßiger Beschleunigung umsetzen.
- *Einscherer*: Ziel der Abstimmung sollte sein, dass das System eher früh mit moderat starker Dynamik reagiert.
- *Ausscherer*: Der Nutzer will, dass das System auf den Ausscherer schnell reagiert. Wie stark die Beschleunigung dann sein soll, hängt offensichtlich stark vom Fahrertyp ab.

Wimmer (2014) hat verschiedene Interaktionsmöglichkeiten für zukünftige Assistenzsysteme in einem realen Fahrzeug aufgebaut und die verschiedenen Automatisierungsmodi sowie den Wechsel zwischen diesen mit neutralen Probanden auf einem abgesperrten Testgelände untersucht. Auch hier wurden verschiedene Testszenarien ähnlich den oben erwähnten definiert und die Reaktion der Probanden beobachtet.

Neben diesen beschriebenen 2-Fahrzeug-Versuchen finden aber auf abgesperrtem Gelände auch Versuche mit nur einem Fahrzeug statt. Im Wesentlichen wird dann die Reaktion (Zeit und Fehler) bei der Bedienung tertiärer (seltener sekundärer) Aufgaben beobachtet. Solche Versuche können aber auch, wenn der Messaufbau zur Beobachtung der Reaktion es zulässt, im öffentlichen Straßenverkehr durchgeführt werden. Andere Versuche fordern die besonderen Gegebenheiten des Testgeländes.

Abb. 10.21 Targetfahrzeug mit dem Anhänger EVITA, welcher auch unter extremen Bedingungen eine Kollision mit dem Versuchsfahrzeug verhindert (Quelle Fahrzeugtechnik, TU-Darmstadt)

Beispielsweise werden Versuche zum Diskomfort, bedingt durch den Einfluss mechanischer Schwingungen, auf entsprechend präparierten Strecken des Testgeländes durchgeführt bzw. die dort gemessenen Bewegungen werden dann später im Labor simuliert (Bitter 2005).

Die erwähnten Untersuchungen dienen hier nur als Beispiele, welcher Art die Versuche mit Probanden auf abgesperrtem Testgelände sein können. Bei alledem ist auf die außergewöhnliche Situation hinzuweisen, in der sich die Probanden befinden: meist wissen sie, um was es geht. Sie sind in der ungewohnten Umgebung außergewöhnlich konzentriert und sie wollen „einen guten Eindruck machen". Die Ergebnisse sind auch unter Berücksichtigung dieses Aspektes zu interpretieren; denn in der Realität des täglichen Autoverkehrs verfallen die Personen in ihre gewohnten Verhaltensmuster und zeigen bei weitem nicht die Aufmerksamkeit wie in den Versuchen, so dass die Reaktionen dort womöglich stark von denen der Versuchsbedingungen abweichen.

10.5.2 Versuche im öffentlichen Straßenverkehr

Wegen der gewünschten Realitätsnähe und auch wegen der Verfügbarkeit finden viele Versuche im öffentlichen Straßenverkehr statt. Hier gilt erstrecht das oberste Gebot, die Sicherheit der Probanden und anderer Verkehrsteilnehmer nicht mehr zu beeinträchtigen, als dies durch die normale Teilnahme am Straßenverkehr gegeben ist. Die Versuche im öffentlichen Straßenverkehr sind vor allem dann erforderlich, wenn es um die Messung von Effekten geht, die die sich erst nach längerer Zeit einstellen (z. B. Langzeitdiskomfort) oder bei denen die eingeschliffenen Gewohnheiten eine besondere Rolle spielen (z. B. Bereitschaft zur Ablenkung durch tertiäre Aufgaben). Versuchsfahrten von vier und mehr Stunden im Simulator sind keiner Versuchsperson zuzumuten und auf Testgeländen für externe Probanden praktisch nicht durchführbar.

Viele Versuche auf öffentlichen Straßen haben deshalb den Komfort- insbesondere Sitzkomfortaspekt zum Gegenstand. Meist ist dann der Fahrersitz mit einer Sitzdruckmatte belegt (z. B. Zenk 2008). Häufig wird auch die Fahrerhaltung mit verschiedenen Kamerasystemen beobachtet (z. B. Kolling 1997; Estermann 1999).

Mit den Versuchen im öffentlichen Straßenverkehr will man u. a. das Fahrerverhalten im Fahralltag erfassen. Im Allgemeinen wird dazu ein Versuchsfahrzeug präpariert, das über entsprechende Aufzeichnungsmöglichkeiten verfügt (oft Daten aus dem CAN-Bus wie Geschwindigkeit, Querbeschleunigung, auch Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug sofern ein ACC an Bord ist). Die Versuche werden von einem Versuchsleiter begleitet, der gegebenenfalls in Abhängigkeit von der Fragestellung an den Probanden auch Handlungsaufforderungen gibt, wie z. B. das Ablesen von

bestimmten Informationen von einem Display oder die Erfüllung von akustisch gestellten Aufgaben. In vielen Fällen werden solche Fahrten von geschulten Fahrlehrern begleitet (z. B. Schweigert 2003), die das Verhalten der Probanden in Relation zum Verkehrsgeschehen registrieren. Häufig werden dabei auch physiologische Daten der Probanden erfasst (besonders beliebt ist die Herzfrequenz[9]). Die Aufmerksamkeitszuwendung des Fahrers kann besonders gut durch (seien es fahrzeugfeste, seien es kopfbasierte) Blickerfassungssysteme objektiviert werden. Gerade bei solchen zusätzlich an Probanden vorgenommenen Messungen ist aber besonders auf dessen Sicherheit zu achten. Ein Charakteristikum all dieser Versuche ist, dass neben den angedeuteten objektiven Daten auch subjektive Daten mittels Fragebogen erhoben werden, wobei man versucht, diese subjektiven Eindrücke mit den objektiven Beobachtungen zu korrelieren.

Die bisher erwähnten Versuchskonstellationen haben alle den Nachteil, dass ein Beobachter dabei ist, der das Verhalten der Probanden allein schon durch seine Anwesenheit beeinträchtigt. Deshalb sind auch Versuche entwickelt worden, die ohne einen solchen Versuchsleiter auskommen. Sacher (2006) hat z. B. zwei Versuchswagen mit verschiedenen Messaufnehmern ausgerüstet, die den Probanden über mehrere Wochen zur Verfügbarkeit gestellt worden sind. Bei jedem Start dieser Versuchsfahrzeuge wurde auch ein PC gestartet, der alle Messwerte aufzeichnete. Dadurch erhält man ein relativ objektives Bild vom Nutzerverhalten ohne Beobachtung. Allerdings wird dieser Vorteil dadurch erkauft, dass die Zuordnung des Verhaltens zu äußeren Aufgabenstellungen – seien es solche, die sich aus der individuellen Fahrzeugnutzung ergeben, seien es solche, die sich aus der Verkehrssituation ergeben – nicht bzw. nur auf indirekte Weise möglich ist. Bei den genannten Versuchen hat sich beispielsweise eine genauere Erfassung (z. B. der Zuordnung zu bestimmten Straßenabschnitten oder der Beobachtung des Verkehrsgeschehens durch Aufzeichnung von Kamerabildern) aus datenschutzrechtlichen Gründen verboten.

Diese zuletzt genannten Nachteile treten immer mehr in Erscheinung, je weniger man durch Beobachtung das Verhalten des Fahrers beeinflusst. Eine neuerdings diskutierte Möglichkeit stellt die Nutzung der Daten dar, die von Smartphones aufgezeichnet und mit den Funkstationen des Mobilfunknetzes ausgetauscht werden. Bislang kann man auf diese Art und Weise bestenfalls Information über Verkehrsströme bzw. Geschwindigkeitsverteilungen in bestimmten Streckenabschnitten gewinnen. Informationen über Nutzung von bestimmten fahrzeugspezifischen Systemen oder gar das Verhalten des Fahrers im Fahrzeug sind damit nicht möglich.

Das Extrem dieses Übergangs von immer größerer Realitätsnähe auf Kosten immer weniger detaillierter Kenntnisse über das individuelle Verhalten stellt die Unfallstatistik dar. Zwar versucht man auch hier durch sog. In-Depth-Unfallanalysen[10] im Nachhinein das zum Unfall führende Verhalten zu analysieren, hängt aber von der Gutwilligkeit und der Präzision des Erinnerungsvermögens der Unfallbeteiligten ab.

10.5.3 Kundenrückmeldungen

Für die Akzeptanz von Neuentwicklungen spielt die Rückmeldung seitens der Käufer naturgemäß eine dominante Rolle. Alle Automobilfirmen haben deshalb Abteilungen, welche die Kundenreklamationen systematisch mit Methoden der Statistik auswerten. Die dort gemachten Erfahrungen dienen nicht nur der Verbesserung in der laufenden Serie, sondern geben auch Anregungen für Neuentwicklungen. Neben dieser Verwertung interner Information

9 In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass die Herzfrequenz, wie auch viele andere physiologischen Parameter, bestenfalls ein Indikator für Änderungen der psychischen Beanspruchung ist, in ihrem absoluten Niveau diese aber nicht korrekt repräsentiert.

10 Bei dieser Form der Analyse informierte die Polizei, die zu einem Unfall gerufen wurde, ein Team von Wissenschaftlern, bestehend aus Technikern, Psychologen und Medizinern, die ihre Untersuchungen unabhängig von der Polizei machen. Den Verunfallten, die sich für ein Interview bereit erklärten, wird zuvor zugesichert, dass die Aussagen vertraulich sind und den öffentlichen Unfallaufnahmeorganen oder den späteren Verhandlungspartnern vor Gericht nicht vermittelt werden. So können Äußerungen aufgezeichnet und Beobachtungen gemacht werden, die näher an dem wirklichen Geschehen sind als die offiziellen Polizeierfassungen.

spielen natürlich auch die publizierten Befragungsergebnisse, die im Rahmen der TÜV/Dekra-Untersuchungen oder von Automobilclubs durchgeführt werden, eine wichtige Rolle. Allerdings liefern die dort verwendeten recht pauschalen Fragen oft nur sehr grobe Hinweise. In der Fahrzeugindustrie besondere Beachtung findende Studien werden von der J.D. Power[11] durchgeführt, einem weltweiten Marktinformationsdienstleister, der jährlich Daten und Lösungen für Leistungsverbesserungen, soziale Medien und Kundenzufriedenheit liefert. Die in Deutschland durchgeführten Studien zur Zufriedenheit von Fahrzeugbesitzern mit ein bis drei Jahre alten Fahrzeugen werden „Vehicle Ownership Satisfaction Study™", kurz VOSS bezeichnet. Die Fragen werden in die Oberkategorien „Fahrzeugattraktivität" (27 %), „Unterhaltskosten" (25 %), „Fahrzeugqualität und –zuverlässigkeit" (24 %) und „Servicezufriedenheit" (23 %) eingeteilt (die Angaben in Klammern kennzeichnen die Bedeutung für die Zufriedenheit der Nutzer nach dem Ergebnis der J.D Power 2013 VOSS in Deutschland). Insbesondere die Kategorien Fahrzeugqualität/-zuverlässigkeit und Fahrzeugattraktivität enthalten dabei Fragen, die sich direkt auf Aspekte der Fahrzeugergonomie beziehen.

Eine weitere wichtige Methode, die Akzeptanz der Kundschaft zu finden, stellen die so genannten Car-Kliniken dar, die im Auftrag von den Fahrzeugherstellern durch spezialisierte Marktforschungsunternehmen durchgeführt werden. Die entsprechenden Tests werden oft lange Zeit vor der Markteinführung eines neuen Modells durchgeführt. Die Testpersonen, die nach repräsentativen Gesichtspunkten ausgewählt werden, werden zur Geheimhaltung verpflichtet. Bei den Tests werden neue, meist bis ins Detail ausgearbeitete Prototypen eines geplanten Fahrzeugs präsentiert und in ausführlichen Interviews das Image und die Akzeptanz bezüglich Design, Materialien und Qualitätsanmutung sowie die Kaufmotive untersucht. In besonderen Fällen werden im Rahmen dieser Untersuchungen sogar Testfahrten zur Bewertung der Fahreigenschaften durchgeführt. Neuerdings werden auch virtuelle Car-Kliniken erprobt. Mit unterschiedlichen Visualisierungstechniken (3D-Filme, Powerwall u. a.) werden dabei den Studienteilnehmern Modelle und Details zur Beurteilung vorgeführt. Diese Studien können sogar online realisiert werden und garantieren somit eine bessere regionale Streuung.

Bei all den genannten Techniken ist aber zu berücksichtigen: „Der Kunde erfindet nichts". Es ist bestenfalls zu erwarten, dass durch diese Befragungs- und Interviewtechniken ein optimales Gemisch aus bereits bekannten Lösungen zu Stande kommt.

11 J.D. Power hat seinen Hauptsitz in Westlake Village in Kalifornien und Niederlassungen in Nordamerika, Europa und im Asien-Pazifik Raum. Das Unternehmen gehört zu McGraw-Hill Financial, einem Unternehmen für Finanzdaten, wie die Kreditwürdigkeitsbewertungen, Benchmarks und Analysedienste für die globalen Kapital- und Rohstoffmärkte.

Literatur

Verwendete Literatur

Abendroth, B., Schreiber, M., Bruder, R., Maul, S., Maul, D.: Neue Ansätze zur Beurteilung der Fahrsimulatorvalidität. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 1(1), 1–11 (2012)

Bartle, R.A.: Designing Virtual Worlds New Riders Publishing, Indianapolis (2003)

Bitter, T.: Objektivierung des dynamischen Sitzkomforts, Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, Dissertation, Shaker Verlag 2005 (2005)

Blana, E.: Driving simulator validation: A literature review. Insitute for Transport Studie Working Paper, Bd. 480. University of Leeds, Leeds (1996)

Blana, E., Golias, J.: Behavioural validation of a fixed-base driving simulator. In: Proceedings of DSC 1999 (1999)

Bock, T.: Vehicle in the Loop – Test- und Simulationsumgebung für Fahrerassistenzsysteme Audi Dissertationsreihe, Bd. 10. (2008)

Braun, M.: Entwicklung eines variablen Ergonomie-Prüfstandes mit CAD-Anbindung und Validierung einer Arbeitsmethodik. Dissertation an der Technischen Universität München (1997)

Buld, S., Krüger, H.P.: Validierung Quer- und Längsführung, EMPHASIS Effort-Management und Performance-Handling in sicherheitsrelevanten Situationen Meilensteinbericht. Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften, Universität Würzburg, Würzburg (2001)

Duden: die deutsche Rechtschreibung – Das umfassende Standardwerk auf der Grundlage der aktuellen amtlichen Regeln. Bibliografisches Institut und F.A. Brockhaus, 25. Auflage, vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage (2009)

Estermann, S.: Komfortmodellierung für den 3D-Softdummy RAMSIS unter realen Fahrbedingungen. Dissertation an der Technischen Universität München (1999)

Herrler, M.: Systemergonomie und Usability-Test bei bildschirmbasierten Bedienoberflächen im Automobil. Dissertationsschrift an der Technischen Universität München (2006)
Hoffmann, J.: Das Darmstädter Verfahren zum Testen und Bewerten von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen. Dissertation an der TU-Darmstadt (2008)
Hofmann, J.: Raumwahrnehmung in virtuellen Umgebungen, 1. Aufl. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden (2002)
J.D. VOSS: http://www.jdpower.com/press-releases/2013-germany-vehicle-ownershipsatisfaction-study-voss (2013)
Jamson, H.: Driving Simulator Validity: Issues of Field of view and resolution. In: Proceeding Driving Simulation Conference Paris, 2000. S. 57–64 (2000)
Kapstein, N., van der Horst, A., Hoekstra, W.: The effect of field of view and scene content on the validity of driving simulator for behavioural research. TNO-TM., Soesterberg (1996)
Kaussner, A., Grein, M., Krüger, H.-P.: An Achitecture for Driving Simulator Databases with Generic and Dynamically Changing Road Networks. In: Proceedings of DSC 2001 (2001)
Kaussner, A., Mark, C., Grein, M.: Fahrsimulator-Datenbasen mit dynamisch veränderbaren Straßennetzwerken. IZVW, Würzburg (2004)
Kolling, J.: Validierung und Weiterentwicklung eines CAD-Menschmodells für die Fahrzeuggestaltung. Dissertation an der Technischen Universität München (1997)
Negele H. J.: Anwendungsgerechte Konzipierung von Fahrsimulatoren für die Fahrzeugentwicklung. Dissertation an der Technischen Universität München (2007)
Regenbrecht, H.: Faktoren für Präsenz in Virtueller Architektur. Dissertation an der Bauhaus-Universität Weimar (1999)
Remlinger, W. M.: Analyse von Sichteinschränkungen im Fahrzeug. Dissertation an der Technischen Universität München (2013)
Riedl, M.: Potential eines virtuellen Fahrerplatzmodells in der Fahrzeugentwicklung. Dissertation an der Technischen Universität München (2012)
SAAB-tech: AddVisor150 - High Performance Headmounted Display http://saabtech.se (Juni 2006)
Sacher, H.: Wie nutzen Fahrzeugführer das adaptive cruise control? In: Bericht zur 2. Tagung "Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz" 4.-5. April, 2006. TÜV Süd, München (2006)
Schrader, K.: Entwurf und Realisierung eines Ergonomie-Mock-Ups unter Verwendung von Methoden der Virtuellen Realität, Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig (2003)
Schubert, T., Friedmann, F., Regenbrecht, H.: Embodied Presence in Virtual Environments. In: Paton, R., Neilson, I. (Hrsg.) Visual Representations and Interpretations, S. 269–278. Springer-Verlag, London (1999)
Schweigert, M.: Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben. Dissertation an der Technischen Universität München (2003)
Stäbler, M.: Systemvergleich zweier VR-Systeme vom Datenfluss bis zum Echtzeit-Raytracing, Fachhochschule Ansbach, Studiengang Multimedia und Kommunikation, Diplomarbeit, 2007 (2007)
Strasser, P. S. B.: Vernetzung von Test- und Simulationsmethoden für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen. Dissertation an der Technischen Universität München (2011)
Voss, T.: Untersuchungen zur Beurteilungs- und Entscheidungssicherheit in virtuellen Umgebungen. Dissertation an der Technischen Universität München (2008)
Wagner, P.-O.: Ergonomie und Komfort. In: Braess, H.-H., Seiffert, U. (Hrsg.) Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 6. Aufl. AZT/MTZ- Fachbuch. Vieweg + Teubner Verlag/Springer Fachmedien, Wiesbaden (2011)
Weinberger, M.: Einfluss von ACC- Systemen auf das Fahrverhalten. Dissertation an der Technischen Universität München (2001)
Widmann, U.: Produktentstehungsprozess. In: Braess, H.-H., Seiffert, U. (Hrsg.) Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 6. Aufl. AZT/MTZ- Fachbuch. Vieweg + Teubner Verlag/Springer Fachmedien, Wiesbaden (2011)
Wimmer, M.: Entwicklung und Erprobung von Mensch-Maschine-Systemen zur automatisierten Fahrzeugführung. Dissertation an der Universität der Bundeswehr, München (2014)
Zenk R.: Objektivierung des Sitzkomforts und seine automatische Anpassung. Dissertation an der Technischen Universität München (2008)
Zöller, I., Diedrich, C., Abendroth, B., Bruder, R.: Fahrsimulatorvalididtät – Systematisierung und quantitative Analyse bisheriger Forschungen. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 4(4), 197–206 (2013)

Weiterführende Literatur

Geiger, M.: Berührungslose Bedienung von Infotainment-Systemen im Fahrzeug. Dissertation, Technische Universität München (2003)
Kapstein, N., Korteling, J.E.: The Effect of Image Resolution on Driving Simulator Validity, TNO Human Factors. TNO, Soesterberg (1998). Report TM-98-A048

Messmethoden

Heiner Bubb, Klaus Bengler, Christian Lange, Carmen Aringer, Nicole Trübswetter, unter Mitarbeit von Antonia Conti, Markus Zimmermann

11.1 Notwendigkeit von Versuchen – 618
11.1.1 Wissenschaftliche Anforderungen an Versuche – 618
11.1.2 Bewertung der Gebrauchstauglichkeit – Usability – 619
11.1.3 Versuchsplanung – 620

11.2 Objektive Messungen – 621
11.2.1 Erfassung der individuellen Anthropometrie – 621
11.2.2 Erfassung von Körperhaltung und -bewegung – 623
11.2.3 Erfassen von Kontaktkräften – 626
11.2.4 Blickbewegung – 630
11.2.5 Leistungsmessungen – 637
11.2.6 Physiologische Parameter – 641

11.3 Subjektive Messungen – 644
11.3.1 Psychophysik – 644
11.3.2 Interview – 649
11.3.3 Standardisierte Fragebögen – 657

Literatur – 659

H. Bubb et al., *Automobilergonomie,* ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-8348-2297-0_11, © Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

11.1 Notwendigkeit von Versuchen

Klaus Bengler

Jede Neuentwicklung von einem Objekt, also auch von einem Fahrzeug, ist nur gerechtfertigt, wenn sie sich durch eine Innovation vor dem bisher vorhandenen, also beispielsweise einem Vorgängermodell oder bisherigen Handlungsweisen, auszeichnet. Die Innovation geht dabei von einer Idee aus, die auf der Grundlage der bisherigen Erfahrung und dem vorhandenen Wissen eine irgendwie geartete Verbesserung vermutet. Da Innovationen im Allgemeinen für ihre Realisierung hohen technischen und finanziellen Aufwand erfordern, ist es notwendig, noch vor einer aufwändigen Verwirklichung einer Produktion und einem Anbieten auf dem Markt abzusichern, ob der erwartete Effekt (z. B. verbesserte Sicherheit, höhere Gebrauchstauglichkeit, besser Attraktivität u. v. a. m.) damit auch wirklich erreicht wird.

Viele Forderungen an die ergonomische Qualität des Produktes Automobil versucht man dabei auf der Grundlage von theoretischen Kenntnissen und zunehmend mit Hilfe von Computereinsatz zu berücksichtigen. Trotz des zunehmenden Einsatzes dieser Techniken, die eine frühe Optimierung im Produktentstehungsprozess gewährleisten, ist man aber auf eine experimentelle Überprüfung der Akzeptanz eines neuen Produktes oder von Teilaspekten dieses Produktes durch den nutzenden Menschen angewiesen. Einerseits will man in vielen Bereichen auf eine Überprüfung mit beurteilenden Menschen nicht verzichten (speziell im Bereich des Packaging) und andererseits sind aber auch oft die entsprechenden theoretischen Kenntnisse noch nicht vorhanden (z. B. bei neuartigen Funktionen) oder nicht in Form von virtuellen Modellen realisiert (z. B. viele kognitive Eigenschaften des Menschen mit Ausnahme der visuellen Informationsaufnahme). Insbesondere wenn es um Probleme der Sicherheit geht, ist eine entsprechende experimentelle Absicherung unverzichtbar.

Diese Absicherung geschieht durch Methoden der Bewertung und Versuche. Gerade wegen der fortschreitenden Entwicklung informationstechnischer Systeme spielt die Bewertung der Gebrauchstauglichkeit neuer Informationssysteme eine wichtige Rolle. Daneben sind aber auch die bekannten Methoden der klassischen Versuchsplanung für alle Fragestellungen der anthropometrischen Bedingungen und der Wirksamkeit neuer Anzeigen und Bedienelemente sowie der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion von eminenter Bedeutung.

11.1.1 Wissenschaftliche Anforderungen an Versuche

Das Ziel jeder Versuchsplanung muss es sein, Ergebnisse zu erzeugen, die den Kriterien der *Objektivität* (das Ergebnis ist unabhängig den Versuchsbedingungen und von der Person, die den Versuch durchführt), der *Zuverlässigkeit* (Reliabilität; eine Wiederholung des Versuchs kommt zum gleichen Ergebnis) und der *Gültigkeit* (Validität; es wird wirklich das gemessen, was Gegenstand der Untersuchung ist) genügen.

11.1.1.1 Objektivität

Unter der Objektivität einer Messung ist zu verstehen, dass eine Messung unabhängig ist vom Testleiter und soweit als möglich auch von den Versuchsbedingungen. Gerade im Bereich der Fahrzeugerprobung werden im Verlauf der Entwicklung viele unterschiedliche Versuche durch verschiedene Personengruppen durchgeführt sowie firmeninterne Erprobungen zu einem späteren Zeitpunkt von externen Prüfinstituten wiederholt. Hier ist es sehr wichtig, dass durch standardisierte Abläufe, Instruktionen und Messaufbauten der Einfluss des Versuchsleiters möglichst minimiert wird. Eine Betrachtung der Reliabilität und Objektivität z. B. des Lane-change-Test findet sich in Bengler et al. 2010.

11.1.1.2 Reliabilität

Unter Reliabilität wird die Genauigkeit bzw. Zuverlässigkeit verstanden, mit der eine Messung erfolgt. Darunter fällt die Varianz der Messwerte bei wiederholten Messungen, aber auch die Vergleichbarkeit zweier paralleler Messungen.

Im Bereich der Fahrzeugergonomie muss eine wiederholte Messung mit einem Probanden zu vergleichbaren Ergebnissen führen. So weisen diszipliniert durchgeführte anthropometrische Messungen (siehe ► Abschn. 11.2.1) im Regelfall eine hohe Reli-

abilität auf. Ebenso ist dies für Dual-Task-Verfahren (siehe ▶ Abschn. 11.2.5) der Fall, sofern das Training der Probanden entsprechend vor dem Beginn der Messung durchgeführt wurde. Ansonsten kann in einer Vielzahl von Versuchen, die sich mit der Bedienbarkeit von Funktionen oder der Fahrzeugführung befassen, bei wiederholter Messung eine eingeschränkte Reliabilität (Stabilität) beobachten. Diese ist häufig dadurch bedingt, das die Probanden im Lauf der Versuche lernen, mit dem System oder Fahrzeug umzugehen und dadurch gemessene Anfangswerte sich deutlich von späteren Messwerten desselben Probanden unterscheiden.

Abhilfe schaffen hier entsprechend durchgeführte Trainingsdurchläufe. Ebenso muss sichergestellt sein, dass sich im Verlauf der Versuche das Beurteilungsobjekt (beispielsweise bei einer Sitzbeurteilung der zu messende Sitz) oder das Messequipment (z. B. Dehnungsstreifen oder Rückstellmomente) nicht verändern.

Die Auswahl der Versuchsteilnehmer kann die Reliabilität ebenfalls beeinflussen. Ziel ist es, durch eine sorgfältige Vorauswahl der Probanden eine möglichst repräsentative Stichprobe zu ziehen, die nachvollziehbar dokumentiert werden muss. Die Homogenität einer Stichprobe kann mit der sogenannten split-half Berechnung überprüft werden. Dazu wird die Stichprobe nach dem Zufallsprinzip in zwei Hälften geteilt, die dann auf ihre Korrelation hin untersucht werden. Eine Überprüfung der Reliabilität in Verbindung mit der Validität kann mithilfe der statistischen Methoden erfolgen. Dabei ist prinzipiell zu beachten, dass sich mangelnde Reliabilität immer auch auf die erreichbare Validität negativ auswirkt. (siehe ▶ Kap. 12).

11.1.1.3 Validität

Die Validität beschreibt die Übereinstimmung eines gemessenen Wertes mit einem zu messenden Kriterium. Die Höhe der Validität wird durch die Korrelation einer Messung mit einem zu messenden Außenkriterium bestimmt. So konnte beispielsweise nachgewiesen werden, dass die benötigten Öffnungsintervalle in einem Okklusionsversuch (siehe ▶ Abschn. 11.2.5.3) eine valide Schätzung für die mittels Eye-tracking gemessene Blickzuwendung (siehe ▶ Abschn. 11.2.4) in einem Fahrversuch darstellt. Gerade für die Bewertung der Verkehrssicherheit stellt die Validität einer Messung eine ausschlaggebende Eigenschaft dar, da in Labor- oder Fahrsimulationsversuchen der valide Nachweis erbracht werden soll, dass Fahrzeugsysteme im realen Straßenverkehr verkehrssicher genutzt werden können. Ein weiteres Beispiel stellt die Validierung von Fragebögen zur Beanspruchungsschätzung (NASA TLX, DALI) anhand physiologischer Messungen oder Fahrverhaltensdaten dar. Abweichende Versuchsdurchführungen können diesen Validitätsnachweis durchaus in Frage stellen.

11.1.2 Bewertung der Gebrauchstauglichkeit – Usability

Gerade im Zusammenhang mit den Interaktionskonzepten und Funktionalitäten für tertiäre Aufgaben stellt die Gebrauchstauglichkeit (*usability*) eine zentrale Eigenschaft dar. Aber auch die Interaktion mit primären und sekundären Funktionen des Fahrzeugs orientiert sich daran. Den gängigen Definitionen (ISO 9241) folgend wird die Usability mittels dreier Teildimensionen beschrieben:

- *Effektivität*: Der Grad der Zielerreichung,
- *Effizienz*: Das Verhältnis zwischen eingesetzten Ressourcen und erreichten Zielen,
- *Zufriedenstellung*: Der Grad zu dem die Interaktion zur Zufriedenheit des Nutzers beiträgt.

Hohe Gebrauchstauglichkeit wirkt sich insgesamt positiv auf die Nutzung des Fahrzeugs in den vielfältigen Situationen aus, da sie bedeutet, dass die gestellten Aufgaben mit hoher Wahrscheinlichkeit, geringem Aufwand und hoher Akzeptanz gelöst werden können.

Nicht unter allen Umständen bedeutet hohe usability auch Ablenkungsfreiheit, da gerade im Bereich der tertiären Funktionen Aufgaben gelöst werden können, die unter Umständen im Widerspruch zur primären Fahraufgabe stehen. Deshalb wird in ISO 17287 die Nachhaltigkeit (*suitability*) als eine weitere Eigenschaft für die Eignung von Interaktionskonzepten für tertiäre Funktionen beschrieben, die neben der primären Fahraufgabe genutzt werden. Danach sind vor der Integration von

Informationssystemen in ein Fahrzeug zunächst der Bestimmungszweck und der Gebrauchskontext zu definieren. Teilfunktionen, die nicht für den Gebrauch während der Fahrt vorgesehen sind, sind zu identifizieren und Maßnahmen sind zu beschreiben, die ergriffen werden, damit die Nutzung solcher Funktionen während der Fahrt ausgeschlossen werden kann. Auch Ausfälle der Funktion sind für den Fahrer erkennbar darzustellen. Alle Bewertungsresultate, die im Lauf der Entwicklung eines Informationssystems anfallen, sollen aufgezeichnet und dokumentiert werden. Gerade dieses Vorgehen soll im Fall von Apps und Softwareprodukten, die in das Fahrzeug zum Beispiel auf mobilen Endgeräten Einzug halten, die suitability zu garantieren. Diese Betrachtung der suitability über die usability hinaus stellt somit für das Fahrzeug eine notwendige Qualitätssicherung im Sinn der Verkehrssicherheit dar.

Die Bewertung der usability kann mit unterschiedlichen Methoden erfolgen. Hierzu zählen die Expertenbewertung, Heuristische Evaluierung und verschiedene Befragungsmethoden.

Expertenbewertung

Vorgenommen durch eine geringe Anzahl von Experten, gegebenenfalls anhand von Checklisten (z. B. TRL Checklist) stellt diese Form der Beurteilung eine sehr zeit- und kostensparende Form der Bewertung dar. Allerdings ist genau zu dokumentieren, worin die Expertise der Beurteiler besteht und in welcher Form sie nachgewiesen werden kann.

Heuristische Evaluierung

Diese Form der Bewertung beruht auf einer Kleinstichprobe repräsentativer Nutzer und geht von dem Kalkül aus, dass ein Großteil der Usability-Probleme mit hoher Wahrscheinlichkeit bereits von wenigen Nutzern entdeckt und in einem iterativen Vorgehen behoben werden kann. Gerade in diesen Iterationen gepaart mit wiederholten Kleinstichprobentests zukünftiger Nutzer liegt das Potential dieser Methode in sehr frühen Entwicklungsphasen. (Nielsen 1994)

Standardisierte Fragebögen

Diese Werkzeuge eignen sich vor allem für den Einsatz in vergleichenden Tests verschiedener Konzepte und Funktionsrealisierungen. Sie können gerade im Rahmen heuristischer Evaluierungen eingesetzt werden und ermöglichen entwicklungsbegleitend die zunehmende Konzeptreife und Verbesserungen quantitativ zu dokumentieren.

Als standardisierte Fragenbögen zur Ermittlung der Usability werden im Umfeld des Fahrzeugs speziell eingesetzt:

System Usability Scale (SUS)

Geeignet zur Bewertung der Usability interaktiver Systeme, besteht die SUS aus 10 Items, die mithilfe einer 5-Punkte-Skala (sog. Likert-Skala) vom Probanden bewertet werden. Die Skala reicht dabei von „Stimme voll zu“ bis „Stimme gar nicht zu“. Der SUS Score wird auf einer Skala von 0 bis 100 Punkten angegeben (siehe auch Brooke 1996).

Post-Study System Usability Questionnaire (PSSUQ)

Ebenfalls zur Bewertung interaktiver Systeme konzipiert, besteht der PSSUQ aus 19 Items, die auf einer 7-Punkte Likert-artigen Skala beantwortet werden. Die Gesamtheit der Subskalen des PSSUQ dient der Bewertung der Usability. Differenziert gehen die Subskalen auf die Eigenschaften System Usefulness, Information Quality, Interface Quality, Satisfaction ein (Lewis).

11.1.3 Versuchsplanung

Für den Versuch wird das zu testende Produkt nach dem aktuellen Entwicklungsstand (z. B. Sitzkiste) hergestellt oder die zu testende Komponente so nachgebaut, dass die betreffende interessierende Eigenschaft untersucht werden kann (z. B. eine neuartige Fahrer-Fahrzeug-Interaktion).

Voraussetzung für jeden Versuch ist eine Vermutung, die man durch den Versuch bestätigen bzw. verwerfen möchte (z. B.: „große Personen haben im Gegensatz zu kleinen Personen Probleme beim Einstieg in ein gegebenes neues Fahrzeugmodell“). Um zu einem solchen Urteil nachprüfbar zu kommen, muss die Vermutung in Form einer *Hypothese* bzw. einer Kombination von Hypothesen so konkretisiert werden, dass Zahlenwerte (z. B.: notwendige Einstiegszeiten für große und kleine Personen, EMG-Werte, die eine Aussage zur Muskelbelastung machen, Befragungsergebnisse) vorliegen, welche

die Entscheidung für oder gegen die Annahme der jeweiligen Hypothese gemäß statistischer Regeln zu fällen erlauben (siehe ▶ Abschn. 12.3.2). Diese Zahlenwerte werden *abhängige Variablen* genannt, weil sie von den gegebenen Versuchsbedingungen, den sog. *unabhängigen Variablen* abhängen (in dem vorliegenden Beispiel die gegebene Einstiegsöffnung und die anthropometrischen sowie sonstigen Eigenschaften der verfügbaren Probanden). Es ist ein wesentlicher Teil der Versuchsplanung, diese unabhängigen Variablen so weit wie möglich konstant zu halten und zumindest zu erfassen, da durch sie das Versuchsergebnis wesentlich beeinflusst werden kann. Somit gehört zu jeder Versuchsplanung auch der organisatorische Ablauf, d. h. der zeitliche Ablauf, die örtlichen Begebenheiten, die Versorgung von Versuchsteam, Versuchspersonen und Versuchsobjekt, Notfallpläne usw. Von besonderem Interesse im hier behandelten Zusammenhang ist die Erfassung der Eigenschaften der Probanden. Dafür wie auch für die Erfassung der abhängigen Variablen, d. h. der Reaktion der Probanden in dem Versuch stehen objektive und subjektive Messverfahren zur Verfügung. Im Folgenden werden diese Verfahren, die im Zusammenhang mit ergonomischen Fragestellungen von besonderem Interesse sind, dargestellt.

11.2 Objektive Messungen

Unter objektiven Messungen versteht man im Gegensatz zur subjektiven solche, die nicht auf Befragungen von Probanden beruhen und von denen man annimmt, dass sie im Wesentlichen aufgabenbedingt (im weitesten Sinne) sind. Für die objektive Erfassung der Interaktion Fahrer-Fahrzeug sind neben der Erfassung der Bedienelementbetätigung, welche im Allgemeinen aus dem CAN-Bus-Daten ausgelesen werden können, vor allem die Körperhaltung und -bewegung von Interesse, der Körperkontakt mit dem Fahrzeug und Daten, die etwas über die psychische Beanspruchung aussagen. Diese zeigt sich recht unmittelbar in der Reaktion der Augen. Aber auch andere physiologische Daten sind von Interesse, wie Herzfrequenz, Hautwiderstand, Adrenalinausschüttung sowie Elektroenzephalogramm (EEG), Elektromyogramm (EMG) bzw. Elektrookulogramm (EOG).

11.2.1 Erfassung der individuellen Anthropometrie

Heiner Bubb

11.2.1.1 Verwendung von Maßband und Tastzirkeln

Die traditionelle Methode, Körpermaße zu erfassen, nutzt die nach Martin (1914/1987) benannten Messbestecke oder ähnlicher Werkzeuge. Diese bestehen im Wesentlichen aus verschiedenen Tastzirkeln und einem Gleitzirkel (spezielle Schieblehre), sowie einem geeichten Messband (sieh hierzu ▶ Abschn. 4.2). Dabei werden fast nur Distanzmaße von Knochen zu Knochen vermessen. Messvorschriften sind u. a. in DIN 33402, Teil 1 detailliert beschrieben. Anthropometrische Maße werden im Allgemeinen am stehenden bzw. auf einem Tisch mit frei hängenden Beinen sitzenden Menschen erhoben. Die Körperhaltung ist dabei maximal gestreckt und der Kopf wird in der sog. „Frankfurter Horizontalen" gehalten, d. h. in einer solchen Haltung, dass die Linie, die den Unterrand der knöchernen Augenhöhle mit dem Oberrand des Gehörgangs verbindet, parallel zur Stand- bzw. Sitzfläche verläuft. Die Messungen werden am weitgehend unbekleideten Probanden (Badekleidung) abgenommen.

Die alleinige Erfassung der Knochen-zu-Knochen-Abstände ist jedoch nicht ausreichend, um die Vielgestaltigkeit menschlicher Dimensionen zu erfassen. Deshalb sollten wenigstens auch Körperumfänge und Körpergewicht erfasst werden. Die Übertragung derartig konventionell erhobener Daten auf digitale Menschmodelle ist allerdings problematisch, weil dort Gelenk-zu-Gelenkabstände die bestimmenden Maße sind, die aus den Knochen-zu-Knochenabständen nicht zuverlässig erschlossen werden können.

11.2.1.2 Berührungslose Verfahren (Computeranthropometrie)

Bei der berührungslose Erfassung menschlicher Abmessungen werden optoelektronische Messinstrumente mit einem Computer verbunden, der sowohl die Messprozedur kontrolliert wie die Verrechnung der gewonnen Daten vornimmt. Diese Verfahren sind auch unter dem Namen Computeranthropometrie bekannt. Bei dem einfachsten Verfahren, dem sog. *Schattenrissverfahren* steht der zu vermessende

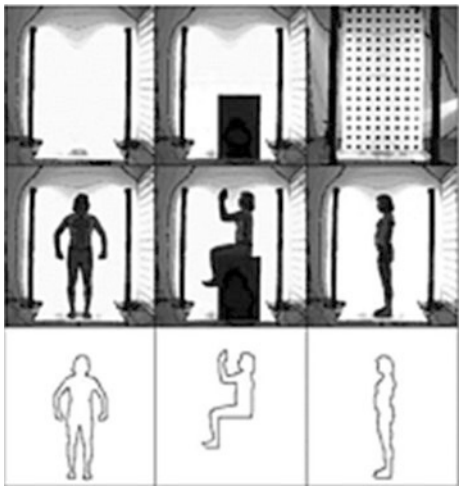


Abb. 11.1 Anthropometrische Messung mittels Schattenrissverfahren (Quelle: HumanSolution)

Proband vor einer durch Rückprojektion weiß beleuchteten Wand und wird von einer elektronischen Kamera aufgenommen. Bei richtiger Einstellung von Beleuchtung und Kameraempfindlichkeit erhält man ein Schattenbild des Körpers auf der CCD der Kamera. In einem angeschlossenen Rechner genügt nun relativ einfache Bildverarbeitungstechnologie, um die Koordinaten der Randlinie dieses Schattenrisses zu extrahieren. Für die korrekte Erfassung von Körpermaßen sind definierte Körperstellungen einzuhalten (siehe Abb. 11.1). Insbesondere sind getrennte Aufnahmen für Frontalsicht und Seitensicht notwendig. Die Körperhöhe erhält man direkt als Abstand des höchsten Körperpunktes vom Boden, wobei die perspektivische Abbildung rechnerisch berücksichtigt wird, die durch den Kameraabstand von der Wand und durch die Aufnahmeoptik bestimmt ist. Indem in Relation zur Körperhöhe in definierten Höhen die maximalen Abstände der Grenzlinie bestimmt werden, können – bei nicht all zu hohem Genauigkeitsanspruch – weitere Körpermaße (z. B. Schulterbreite, Hüftbreite, Schritthöhe u. ä.) automatisch erfasst werden.

11.2.1.3 Superimpose-Methode (PCMAN)

Im Rahmen der Entwicklung des Menschmodells RAMSIS, welches ursprünglich nur auf Workstations installiert werden konnte, wurde auch ein auf dem PC laufendes dreidimensionales Menschmodell entwickelt, das in der geometrischen Konzeption identisch mit RAMSIS ist, aber außer der Möglichkeit, die Dimensionen und die Winkel frei einzustellen, keine sonstige Funktionen besitzt. Dieses Modell wurde benutzt, um die individuellen anthropometrischen Maße von Probanden auf das Modell RAMSIS zu übertragen und weiterhin die für die RAMSIS-Entwicklung notwendige Bewertung von Fahrerhaltungen zu realisieren. Das entsprechende Softwareprogramm wurde dann unter dem Namen PCMAN am Lehrstuhl für Ergonomie der TU-München weiter entwickelt. Die Besonderheit ist, dass für dieses Modell eine Schnittstelle zu RAMSIS existiert, welche es erlaubt, sowohl anthropometrische Maße als auch Winkelwerte auf RAMSIS zu übertragen. Für die anthropometrische Messung besteht das Verfahren darin, dass die Versuchsperson durch zwei Kameras, deren optische Achsen senkrecht zueinander stehen, aufgenommen wird. Eine Kalibrierung der von den Kameras aufgenommenen Bilder ermöglicht es, den im Rechner vorhandenen Dummy softwaretechnisch auf virtuelle Ebenen so zu projizieren, dass die entsprechenden Dummybilder mit den Fotos der realen Versuchsperson überlagert werden können. Nun ist es möglich, den Dummy an die Proportionen der Versuchspersonen anzugleichen (siehe Abb. 11.2). Das weitere anthropometrische Messprogramm sieht verschiedene festgelegte Körperhaltungen vor, durch welche die Lage der Gelenke und im gewissen Umfang auch deren Variation in Abhängigkeit von der Haltung erfasst werden. Indem das äußere Modell des Dummys nun so verändert wird, dass dessen Kontur möglichst nahe an der Kontur der aufgenommenen Person liegt, erhält man von dieser ein gutes Abbild im Rechner[1].

1 Im Prinzip lässt sich die PCMAN-Methode auch mit dem Schattenrissverfahren kombinieren. Wegen der fehlenden Information über die einzelnen Körperteile ist dieser Anpassungsprozess allerdings für den Anwender sehr unkomfortabel und führt auch zu schlechteren Ergebnissen. Die Idee, mit der Kombination aus Schattenrissverfahren und PCMAN, eine automatische Anpassung zu ermöglichen, hat sich bisher nicht als erfolgreich erwiesen.

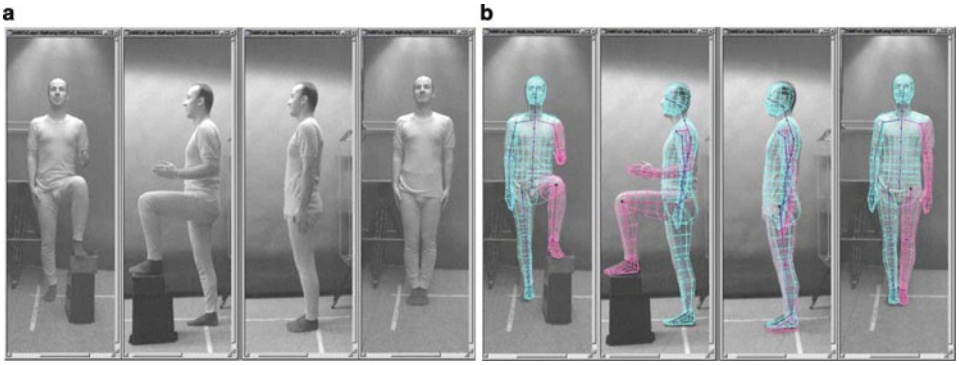


Abb. 11.2 Fotogrammetrische Erfassung der Versuchsperson (**a**) und Überlagerung mit dem Rechnerdummy (**b**) mittels des Verfahrens PCMAN

11.2.1.4 Bodyscanning

Das heute gängigste Verfahren, anthropometrische Maße schnell und berührungslos zu erfassen, ist die Methode des Laserscannings, auch (Body-) Scanning genannt. Über einen Laser mit Aufweitungsoptik wird dabei eine Lichtebene erzeugt. Der zu vermessende Proband steht in dieser Lichtebene und bildet somit mit ihr eine sichtbare Schnittlinie. Eine Videokamera, die in einem festen Abstand zu dem die Lichtebene definierenden Laser steht, erfasst diese Schnittlinie. Mittels computerbasierter Bildverarbeitung wird die Lage der Bildpunkte auf dem Kamerabild erfasst und im Computer durch einfache Trigonometrie in die räumlichen Koordinaten umgerechnet. Indem die gesamte Apparatur, bestehend aus Laser und Kamera, elektromotorisch entlang einer Linearführung verschoben wird, wird die Lichtebene durch den ganzen zu vermessenden Körper gezogen. Dieser Vorgang benötigt ca. 120 s. Somit erhält man die Koordinaten der räumlichen Lage der Körperoberfläche. Da aus dem Blickwinkel einer Kamera nur ein Sektor des Körpers erfasst werden kann, werden zur Ganzkörpervermessung üblicherweise vier Einrichtungen wie oben beschrieben eingesetzt, die in quadratischem Grundriss um den Körper angeordnet sind und synchron bewegt werden (siehe Abb. 11.3). Neuerdings sind auch von Hand geführte Scanner auf dem Markt, die es erlauben, einzelne Körpersegmente zu erfassen. In jedem Fall sind eigene Algorithmen notwendig, mit deren Hilfe man aus diesen Scans anthropometrische Daten gewinnen kann. Im Rahmen des Size-GERMANY-Projektes wurden solche Algorithmen zur Datengewinnung entwickelt, mit deren Hilfe es möglich war, statistische Analysen von über 12.000 Probanden durchzuführen. Derartige Bodyscanner werden heute in vielen Automobilunternehmen zur Erfassung der anthropometrischen Daten der dort eingesetzten Probanden verwendet.

11.2.2 Erfassung von Körperhaltung und -bewegung

Die Objektivierung der Körperhaltung und der Bewegung als zeitliche Folge von Haltungen erfolgt bei bekannter individueller Anthropometrie prinzipiell durch die Erfassung der Gelenkswinkel.

11.2.2.1 Mechanoelektrische Verfahren

Bei den mechanoelektrischen Verfahren werden an die Gelenke von außen Messaufnehmer, sog. Goniometer angepasst, die selbst ein Gelenk enthalten, das über die jeweilige Körperstellung verstellt wird. Die relative Stellung des Gelenks wird meist über Potentiometer gemessen, die Daten dann auf den Rechner übertragen und dort genutzt, um ein oft recht einfaches Menschmodell („Strichmännchen“) mitzutracken. Es versteht sich von selbst, dass mit dieser Methode eigentlich nur zweidimensionale Bewegungen erfasst werden können. Dazu kommt der Nachteil, dass der Proband über einen Kabelstrang mit dem Rechner verbunden ist. Trotz dieser Nachteile wird diese Methode wegen ihrer Robustheit oftmals bevorzugt, insbesondere da der Kabelstrang im Fahrzeug bei korrekter Verlegung keine

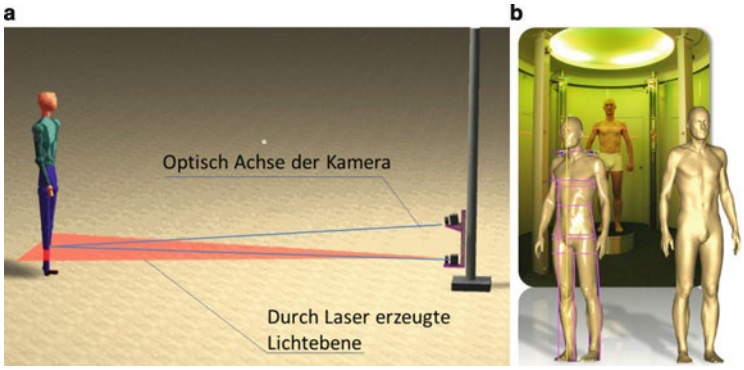


Abb. 11.3 Prinzip der Laserscan Technik (**a**) und praktische Ausführungsform eines Laserscanners (**b**)

besondere Behinderung darstellt. Eine Abwandlung dieser Methode stellt die Anwendung faseroptischer Elemente an den jeweiligen Gelenken dar, welche ihre Lichtdurchlässigkeit in Abhängigkeit von der Krümmung verändern. Insbesondere die Bewegung von Fingern, aber auch die der Wirbelsäule kann so recht gut online erfasst werden.

11.2.2.2 Markerbasierte Verfahren

Die am weitesten verbreiteten Methoden verwenden zur Haltungs- und Bewegungserfassung Marker. Als Marker werden manchmal Ultraschallsender (es sind dann zur räumlichen Lokalisierung des Senders drei im Raum verteilte Empfangsdetektoren notwendig), elektromagnetische Verfahren, aber meist aktive oder passive Lichtquellen verwendet (solche Verfahren werden von vielen Herstellern vertrieben, z. B. Vicon, Polhemus, Peak, Qualisis, SIMIMOTION usw.) Am häufigsten findet sich die Methode der passiven Lichtquelle in Form von an den Extremitäten und am Rumpf befestigten gut reflektierenden Bällchen (diese sind besser als plane Marker, da sie unabhängig von der Position des Probanden im Raum mit größerer Wahrscheinlichkeit detektiert werden). In manchen Fällen werden auch spezielle aus vier räumlich zueinander konfigurierten Markern aufgebaute Systeme verwendet, wobei diese Anordnung hilft, die Orientierung des Körperteils, an dem dieses Arrangement befestigt ist, genau zu erfassen (Abb. 11.4) und auf – mindestens – zwei im Raum installierten Kameras ein Bild zu erzeugen. Zusätzlich zur normalen Beleuchtung wird die Szenerie mit infrarotem Licht beleuchtet.

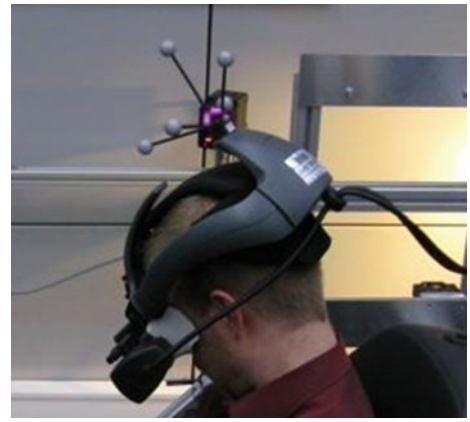


Abb. 11.4 Markeranordnung zur Erfassung der räumlichen Orientierung eines Körperelements

Zur Aufnahme werden Kameras verwendet, die nur im infraroten Lichtspektrum empfindlich sind. Dadurch lässt sich die Position der Marker auf dem CCD der Kamera sehr sicher detektieren. Mittels einfacher geometrischer Kalkulation wird dann im Rechner mit der Kenntnis der Kamerabrennweite die räumliche Position der Marker berechnen. Da die Marker nicht codiert sind und für die Berechnung der räumlichen Koordinaten die Identifikation des jeweiligen Markers auf allen Bildern notwendig ist, können bei der für die Bewegungserfassung unbedingt notwendigen Existenz von mehreren Markern auf einem Bild Fehlberechnungen entstehen. Es sind verschiedene Algorithmen entwickelt worden, welche die Wahrscheinlichkeit für solche Fehlzuordnungen vermindern sollen (z. B. durch

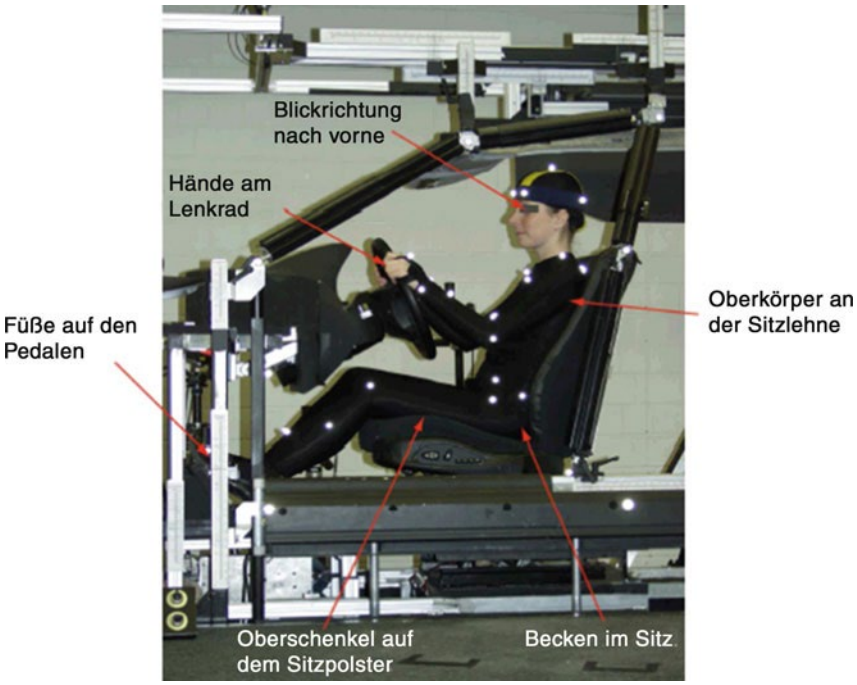


Abb. 11.5 Aufnahmeszenerie für eine Bewegungserfassung mittels Marker und Kamera (Cherednidchenko, 200x)

Berechnung der wahrscheinlichen Bewegung eines Markerbildes aufgrund des bisherigen Bewegungsverlaufes). Trotzdem stellen sie bei den praktischen Messungen, insbesondere dann, wenn Marker durch Objekte der Arbeitsumgebung zeitweise verdeckt werden, ein großes Problem dar.

Um von den räumlichen Markerpositionen zu menschenbezogenen Daten zu kommen, sind praktisch zwei Verfahren möglich: im einfachsten Fall werden die Marker möglichst genau an der Position der jeweiligen Gelenke angebracht. Im Rechner werden dann auf programmtechnischen Wege die entsprechenden räumlichen Punkte so miteinander verbunden, dass sich die Repräsentation des Probanden durch ein Strichmännchen ergibt. Es lassen sich nun recht einfach die Winkel zwischen den jeweiligen Strecken berechnen, welche die Haltung bzw. in zeitlicher Abhängigkeit die Bewegung darstellen. Da die Marker nicht in den Gelenken, sondern nur neben den Gelenken und zudem nur unpräzise angebracht werden können, ergeben sich mit dieser Methode allerdings erhebliche Ungenauigkeiten.

Bei der zweiten Methode existiert im Rechner ein Menschmodell, das an die individuellen anthropometrischen Maße des Probanden möglichst gut angepasst sein muss. Bei dieser Methode können die Marker quasi an beliebiger Stelle der jeweiligen Körperelemente befestigt werden (dieses Verfahren wird kommerziell von Vicon angeboten, Abb. 11.5). In einer speziellen Kalibrierprozedur müssen allerdings vor der eigentlichen Messung die Positionen der entsprechenden virtuellen Marker festgelegt werden. In der folgenden Bewegungsaufnahme wird nun mittels der gemessenen Markerpositionen über diese virtuellen Marker das Menschmodell mitgetrackt. Die Winkelwerte dieses Menschmodells geben die Haltung und Bewegung wesentlich exakter wieder als bei der zuerst genannten Methode (Es sei hier speziell auf die Arbeiten von Rigel 2005 und Cherednischenko 2007 verwiesen). Beiden Methoden sind aber zu eigen, dass die Maße der jeweiligen Körperelemente während der Bewegung variieren können. Um die letztlich ungenaue Übereinstimmung der durch die Marker oder durch das Menschmodell angenommen Gelenkpunkte mit den realen Gelenkpunkten zu kompensieren, kann man den dadurch bedingten Fehler reduzieren, indem man von einem Menschmodell

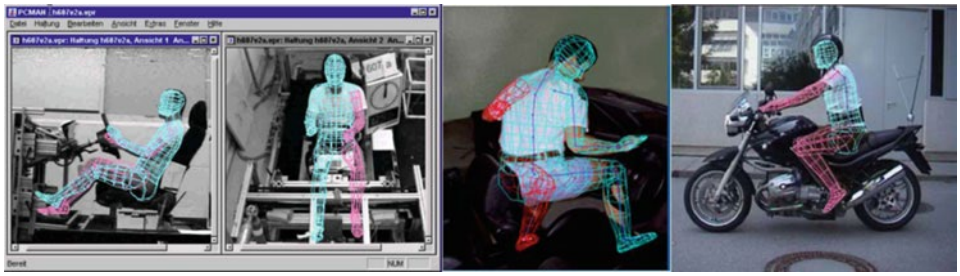


Abb. 11.6 Konfiguration zur Haltungs- und Bewegungsanalyse mittels PCMAN

mit starren, auf die individuelle Anthropometrie angepassten Abmessungen ausgeht und die virtuellen Marker programmtechnisch elastisch an diese Menschmodell anbindet (Rigel 2005).

11.2.2.3 Markerlose Verfahren

Markerlose Messungen basieren immer auf einer optischen Erfassung. Der Proband wird dabei durch mindestens zwei Kameras beobachtet. Es ist dies die Hauptanwendung des PCMAN. Die Versuchsperson wird dabei in der interessierenden Versuchshaltung (z. B. Sitzen in einem Kraftfahrzeug-Mock-Up) mit Hilfe mehrerer Kameras (als sinnvoll erwiesen sich zwei bis drei Kameras) aus verschiedenen Blickrichtungen aufgenommen (siehe Abb. 11.6, links). Bei Kenntnis der optischen Parameter der Kameras ist es möglich, im Rechner mit den gleichen Parametern ein zentralperspektivisches Bild des bereits an die Versuchsperson angepassten Dummys auf die durch die Kameras vorgegebenen Bildebenen zu berechnen, so dass nun durch die Überlagerung der Kamerabilder mit den entsprechenden gerechneten Bildern und durch Animation des Dummys eine Angleichung des Modells an die Körperhaltung der Versuchsperson erfolgen kann. Wie Abb. 11.6 zeigt, sind mit dieser Methode beliebige Körperhaltungen erfassbar und in Form von mathematischen Winkelwerten beschreibbar. In verschiedenen Automobilunternehmen wird dieses Verfahren verwendet, um die Körperhaltung in Sitzkisten, aber auch im fahrenden Fahrzeug, beim Einsteigen oder auf dem Motorrad zu erfassen. Durch die heute verfügbaren sehr kleinen Kameras ist dies auch im engen Fahrzeugraum durchführbar.

Eine besondere Herausforderung stellt allerdings die Bewegungsmessung dar. Im Prinzip kann sie als eine Folge von einzelnen Haltungen verstanden werden. Allerdings ist der Aufwand, einzelne Bilder durch die Überlagerungstechnik zu erfassen, extrem hoch. Deshalb hat sich in der anthropometrischen Messtechnik für das Erfassen von Körperbewegungen (z. B. für Untersuchungen des Einstiegs- und Ausstiegsvorgangs) die Verwendung der oben beschriebenen Markermethode allgemein durchgesetzt. Obwohl diese Verfahren schnell präzise Daten bereitstellen, haben sie den Nachteil, dass sich die Versuchspersonen bei den Bewegungsversuchen durch die aufgeklebten Marker beeinträchtigt fühlen. Im Rahmen des DFG Projektes MeMoMan wurde ein markerloses Verfahren entwickelt, das auf der in Abb. 11.6 dargestellten Überlagerungsmethode basiert, das sich gegenwärtig aber noch in der Forschung befindet.

11.2.3 Erfassen von Kontaktkräften

Wenn der Nutzer eines Fahrzeugs im Fahrzeug sitzt, dort Bewegungen ausführt, aber auch wenn er in das Fahrzeug einsteigt bzw. aussteigt, übt er an den Kontaktstellen Kräfte auf das Fahrzeug aus. Für viele Untersuchungen sind diese Kräfte von Interesse, weil sie gegebenenfalls Aussagen über den Aufwand erlauben, den der Nutzer aufzubringen hat, um die jeweiligen Aufgaben zu erfüllen. Besonders interessieren in diesem Zusammenhang natürlich die Kräfte in dem Sitz und in der Lehne, weil man sich dadurch Aussagen über den Sitzkomfort erhofft.

11.2.3.1 Messung der Sitzdruckverteilung

In der Sitzforschung stellt die Sitzdruckmessmatte heute ein unverzichtbares Hilfsmittel dar. Es handelt sich dabei um matrixförmig aufgebaute Matten, an

Abb. 11.7 Sitzdruckmatte in einem Fahrzeugsitz

deren Kreuzungspunkten die durch Druck ausgeübte leichte Distanzänderung über unterschiedliche physikalische Prinzipien (Widerstandsänderung, Kapazitätsänderung bzw. Änderung der Lichtdurchlässigkeit) in einen elektrischen Wert umgesetzt wird. Es entsteht dadurch, unterstützt durch das mit der Matte verbundene Computerprogramm, ein Druckverteilungsbild, das normalerweise farblich codiert die Verteilung der Drücke in der Sitz- und Lehnenfläche wiedergibt (Abb. 11.7 und 11.8)

Ein generelles technisches Problem ist hierbei, dass die Matte – ähnlich wie ein Blatt Papier – nur um eine Achse gebogen werden kann, so dass beim Einpassen der Messmatte in einen realen Sitz immer Falten entstehen, die das Messergebnis beeinflussen können. Grundsätzlich können aus den Druckwerten nicht unmittelbar Aussagen über den empfundenen Diskomfort gemacht werden. Zwar gibt es physiologisch bedingte Grenzwerte, die keineswegs überschritten werden dürfen. So geben Diebschlag et al. (1992) an, dass Drücke zwischen 0.08 und 0.16 N/cm^2 zu einem Abdrücken des venösen Blutflusses führen und Drücke >0.42 N/cm^2 überhaupt ein kritisches Abdrücken der Blutversorgung bewirken, ein Effekt der subjektiv als „Einschlafen der Beine“ erlebt wird. Wie die Untersuchungen von Hartung (2006) und Mergl (2006) zeigen, sind für eine Minimierung des Diskomforts individualbezogene Werte der Lastverteilung, des Gradienten und des maximalen Drucks speziell im Bereich des Oberschenkels ausschlaggebend. Damit entsteht ein weiteres Problem: Die mit der Messmatte gewonnenen Werte sind sitzbezogen und hängen noch dazu von der Positionierung der Matte auf den Sitz ab. Um zu einer Bewertung des Diskomforts zukommen, ist es aber nötig, diese Werte probandenbezogen zu interpretieren. Hartung (2006) hat deshalb ein spezielles Body-grid-Verfahren entwickelt, mit dessen Hilfe die gewonnenen Werte auf den individuellen Probanden und dessen aktueller Position im Sitz bezogen werden können (siehe hierzu Abb. 11.9).

11.2.3.2 Messung sonstiger Kontaktkräfte

Neben der wichtigen den Langzeit-Diskomfort beeinflussenden Druckverteilung in Sitz und Lehne spielen aber auch noch kurzzeitige oder auch langzeitig auftretende Kontaktkräften eine Rolle, die bei Versuchen mit unterschiedlicher Zielsetzung beachtet werden müssen. Abgesehen von dynamischen Bewegungen beim Ein- und Aussteigen, beim Hantieren am Gepäcksabteil oder im Motorraum sind dies bei der konventionellen Fahrt vor allem Kontaktkräfte in folgenden Bereichen (Zusammenstellung der Ergebnisse von Versuchen von Fröhmel 2010):

Fußraum:

- linker Fuß auf der Fußstütze und dem Kupplungspedal

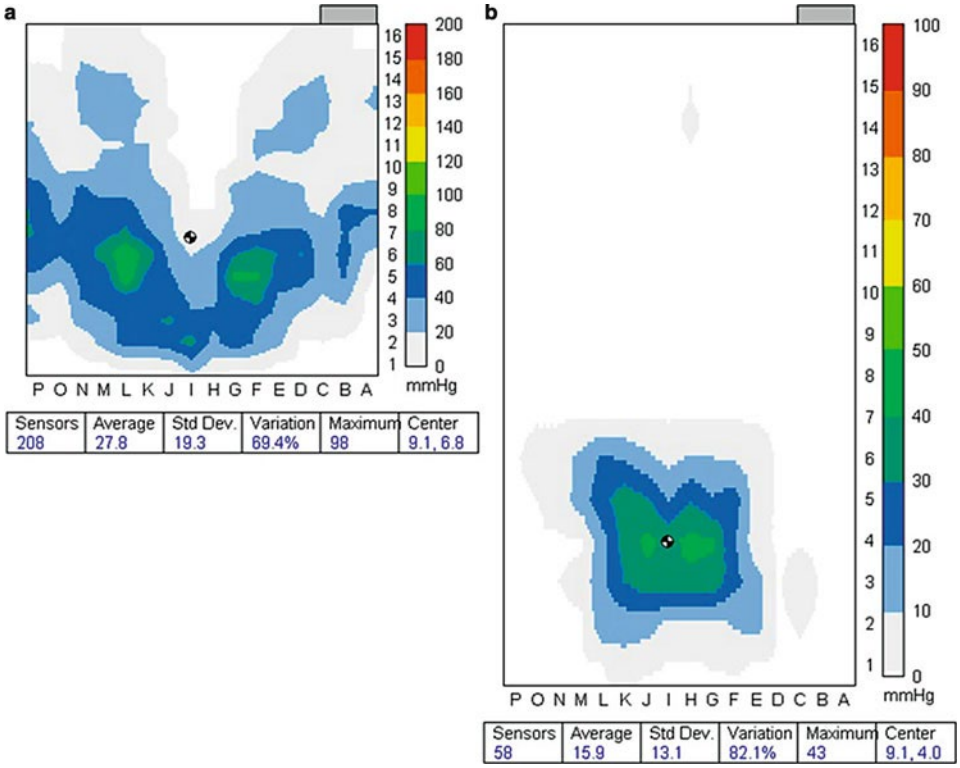


Abb. 11.8 Beispiel eines Druckverteilungsbildes. **a** Sitzfläche, **b** Lehne

11

- rechter Fuß auf dem Brems- und Fahrpedal
- linker und rechter Fuß auf dem Boden

Beinraum:
- linkes Knie an der Fahrertüre vorne
- rechtes Knie an der Mittelkonsole vorne

Armbereich:
- linker Ellenbogen bzw. Unterarm auf der Armauflage Tür
- linker Ellenbogen bzw. Unterarm aufliegend auf der Brüstung der Fahrertür
- rechter Ellenbogen bzw. Unterarm auf der Armauflage Mittelkonsole
- rechte Hand auf dem Schalthebel
- linke und rechte Hand am Lenkrad

Sitzbereich:
- Gesäß und Rücken auf dem Sitz
- Kopf an der Kopfstütze

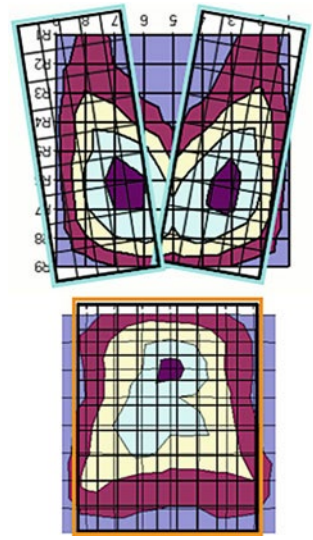


Abb. 11.9 Anpassen eines auf die individuelle Anthropometrie des Probanden angepassten Body-grids an die gemessene Druckverteilung (nach Hartung 2006)

Tab. 11.1 Bewertungsmatrix unterschiedlicher Kraftmessmethoden der Fahrerhaltung (aus Fröhmel 2010); Codierung: +++ „sehr gut geeignet" … – – – „sehr schlecht geeignet".

	Beeinflussung der VP		Sensoreigenschaften				Messung	
Basis Mensch	Gewicht	Abmaße/Beweglichkeit	Kosten	Robustheit	Kalibrierung/Messgenauigkeit	Verfügbarkeit	von Flächenblastung	von Sekundärkräften
Gamaschen mit Folienkissen Füllmedium Gas	+	– –	– –	– –	–	– – –	+	–
Gamaschen mit Folienkissen Füllmedium Flüssigkeit	– – –	– –	– –	– –	–	– – –	+	–
Gamaschen mit Lichtsensoren	+	– –	– –	++	– – –	– – –	+	–
Folienmesstechnik (Messhandschuh/Fußdrucksensormatte)	++	–	+	– –	– –	++	++	– – –
Anzug mit Miniaturkraftsensoren	– –	– –	++	–	+++	++	– – –	+++
Basis Fahrzeug								
Folienmesstechnik (Foliensensormatten)	+++	++	+++	–	– – –	+++	+++	+++
Kraftsensoren	+++	+++	++	++	+++	++	– – –	++

Für die Messung dieser Kontaktkräfte kommen zwei grundsätzlich unterschiedliche Verfahren in Betracht: Entweder Messungen direkt am Menschen oder Messungen durch Kraftaufnehmer, die am Fahrzeug befestigt sind. Bei an den Probanden angebrachten Kraftaufnehmern ist zu beachten, dass sie dessen Gewohnheit nach Möglichkeit nicht beeinflussen dürfen. Gewicht und Abmaße der Sensoren müssen deshalb so gering wie möglich sein und auch Leitungen sind so weit wie möglich zu vermeiden oder so zu verlegen, dass die Versuchsperson dadurch nicht beeinflusst wird. Für die Anbringung von Messsensoren am Fahrzeug gilt im Prinzip eine ähnliche Überlegung: Sie dürfen die Geometrie und anthropometrische Bedingungen des Fahrzeugs nicht verändern, weil die dadurch für die Probanden veränderten geometrischen Verhältnisse auch andere Krafteinsätze bedingen würden. Fröhmel (2010) beschreibt verschiedene Kraftaufnehmertypen, sowie deren Vor- und Nachteile und stellt ihre Eignung für Messungen von Fahrerhaltung in einer Tabelle zusammen (Tab. 11.1)

Es ergibt sich daraus, dass Messungen am Fahrzeug in vielerlei Hinsicht günstiger sind als solche am Menschen. Aus Datenblättern des Handbuch für Ergonomie (Schmidtke 1989) und internen Messungen stellt Fröhmel folgende Sensormessbereiche zusammen:

Messbereich der Pedale und Fußstütze:

- Fußstütze: 0 … 800 N
- Kupplungspedal: 0 … 800 N
- Bremspedal: 0 … 1500 N
- Fahrpedal: 0 … 150 N

Messbereich Boden (es wird davon ausgegangen, dass jede Bodenplatte auf drei Sensoren gelagert ist)

- die Bodensensor: 0 … 200 N

Messbereich Sitz (es wird davon ausgegangen, dass der Sitz auf vier Sensoren gelagert ist)

- je Sitzsensor: 0 … 500 N

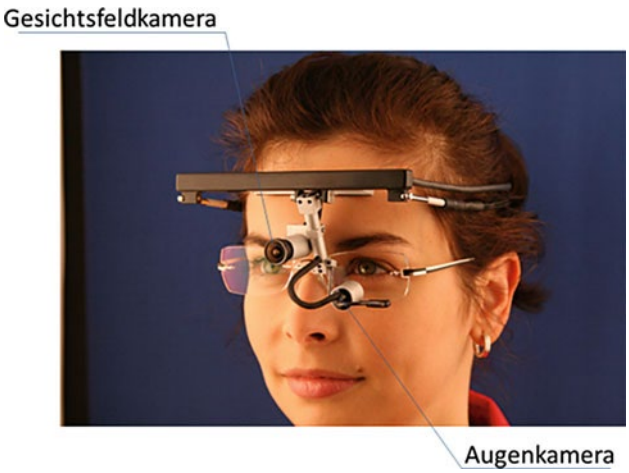


Abb. 11.10 Blickerfassungssystem Dikablis:

Messbereich Lenkrad (es wird davon ausgegangen, dass das Lenkrad auf einem dreidimensionalen Kraftaufnehmer gelagert ist)

- je Raumkoordinate: 0 … 500 N

Die angegebenen Werte beziehen sich auf statische Belastung. Im Fall der bei Fröhmel beschriebenen Versuchsanordnung wurden diese Kraftaufnehmer in einem statischen Mock-Up verbaut. Während des Einstiegsvorgangs wurden alle Sensoren gesichert, so dass keine dynamischen Kräfte übertragen werden konnten, welche die Kraftaufnehmer zerstört hätten. Aus diesem Grund ist eine entsprechende Messung im fahrenden Fahrzeug auch praktisch unmöglich. Bei einer ähnlichen Fragestellung wurden in den Untersuchungen von Estermann (1999) die Versuchspersonen aufgefordert, unmittelbar nach der Versuchsfahrt in einem Mock-Up Platz zu nehmen, wobei die Einstellung im Realfahrzeug exakt darauf übertragen worden ist. Die Versuchsperson sollte dort die gleiche Haltung einnehmen wie im Versuchsfahrzeug, was mittels der PCMAN-Methode überprüft werden konnte.

11.2.4 Blickbewegung

Christian Lange

Wie in den vorangegangenen Kapiteln an unterschiedlicher Stelle erwähnt, ist die Blickerfassung eine quasi-objektive Messmethode zur Erfassung der Aufmerksamkeitszuwendung und visuellen Beanspruchung. Man kann dabei im Wesentlichen die Messung mit kopfbasierten Messgeräten und berührungsfreie Messungen unterscheiden. Daneben steht noch die Methode des Elektrookulogramms (EOG) zur Verfügung, bei der mittels in der Nähe des Auges befestigter Oberflächenelektroden der Potenzialunterschied zwischen Hornhaut und Netzhaut registriert wird. Im Winkelbereich von 40° liefert diese Methode gute Ergebnisse. Die EOG-Messung ist allerdings durch tagesabhängige Spannungsschwankungen, sowie Potenzialänderungen durch Lidschlag und Gesichtsmuskulatur sehr anfällig für Artefakte (siehe auch Elektromyogramm, EMG)

11.2.4.1 Kopfbasierte Methoden

An einem möglichst rutschfest mit dem Kopf des Probanden befestigten Helm (auch Brille u. ä.) ist eine Gesichtsfeldkamera befestigt, deren Bild im angeschlossenen Rechner die Blickrichtung des Auges superponiert wird. Bezüglich der Erfassung der Augenbewegung finden folgende Verfahren Anwendung:

- Limbus-, Pupillen- oder Augenlidregistrierung: Das Auge wird breitflächig mit infrarotem Licht beleuchtet. Eine zweite am Helm befestigte Augenkamera erfasst über einen Spiegel, der nur infrarotes Licht reflektiert und somit für sichtbares Licht vollkommen durchlässig ist, oder auch direkt das Bild des Auges (Abb. 11.10). Durch einen entsprechenden

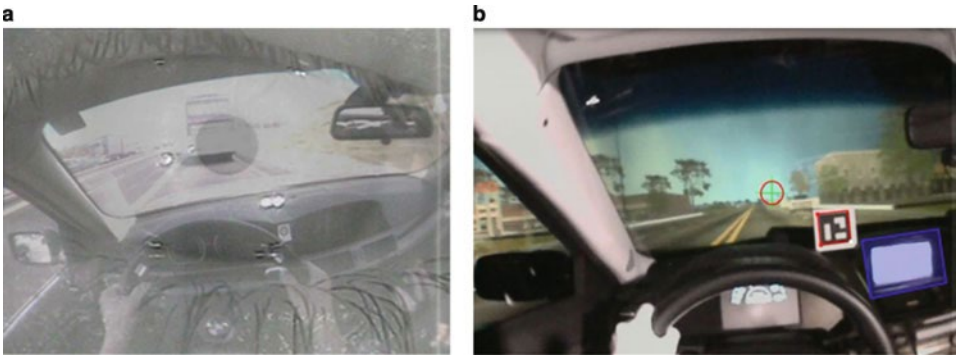


Abb. 11.11 Markierung des angeblickten Objektes nur durch das Pupillenbild (**a**), mittels Bildverarbeitung (**b**)

Kalibriervorgang wird das Augenbild soweit vergrößert (gezoomt), dass es unmittelbar dem Gesichtsfeldbild überlagert werden kann. In einer anderen Ausbauform dieser Technik wird die Position der dunklen Pupille im Augenbild über Bildverarbeitungstechnologien erfasst und die so gewonnene Position im Gesichtsfeldbild markiert (Abb. 11.11).

- Cornea-Reflex-Methode: Eine mit dem Helm verbundene Infrarotlichtquelle richtet einen fokussierten Strahl auf das Auge. Die facettenartige Oberfläche des Auges reflektiert diesen Strahl, der von einer ebenfalls am Helm befestigten Kamera aufgefangen wird (sog. Purkinje-Bild-Technik). Die dort detektierte Position seines Bildes kann nach einem Kalibriervorgang dem Gesichtsfeldbild überlagert werden und zeigt somit die aktuelle Blickrichtung an (Das Ergebnis gleicht dem von Abb. 11.11b).
- Blickachsenmessung (Point of Regard Measurement): Ein infraroter Lichtstrahl wird auf das Auge gelenkt und erzeugt dort einen Reflex. Über eine zweite am Helm befestigte Kamera werden dieser Reflex und die momentane Position der dunklen Pupille aufgenommen. Mittels Bildverarbeitung werden die Positionen der Bilder beider Objekte erfasst. Aus ihrer relativen Lage zueinander kann im Rechner die Stellung des Auges und damit die Blickrichtung berechnet und dem Gesichtsfeldbild überlagert werden (Das Ergebnis gleicht dem von Abb. 11.11b).

Im Gegensatz zu den auf Bildverarbeitungstechnologien beruhenden Verfahren ist die erste einfache Überlagerungsmethode sehr robust gegen Störungen. Sie verlangt aber in jedem Fall menschliche Interpretation bei der Auswertung der Einzelbilder. Bei den Verfahren mit Bildverarbeitungstechnologien ist im Gegensatz zu dieser Methode eine Erfassung beider Augen und damit auch von Konvergenzen der Blickachsen möglich. Allerdings ist die Bildverarbeitung sehr empfindlich gegenüber Lichtschwankungen und damit gerade für den Einsatz im freien Feld nur eingeschränkt geeignet.

11.2.4.2 Berührungsfreie Methoden

Bei den berührungsfreien Methoden beobachten ein bzw. zwei im Raum (im Fahrzeug meist auf der Armaturenbrettoberfläche) fest montierte Kameras den Probanden. Ein gepulster Infrarotstrahler ist auf den Kopf des Probanden gerichtet und erzeugt in beiden Augen einen Cornea-Reflex. Die Bilder der beiden Beobachtungskameras werden in einem Rechner mittels Bildverarbeitung analysiert. Ebenfalls auf optischer Basis oder ggf. mittels eines elektromagnetischen Headtrackingsystems wird zusätzlich die Kopfposition und die Kopfhaltung erfasst, da die Augenposition (im Gegensatz zu den kopfbasierten Methoden) in Bezug auf das Kamerakoordinatensystem nicht statisch und deshalb erst nach einer entsprechenden Bildverarbeitung bekannt ist. In ähnlicher Weise wie bei dem oben an dritter Stelle beschriebenen helmbasierten Verfahren wird die jeweilige Position des Reflexes, der Pupille und der Iris in jedem Kamerabild bestimmt.

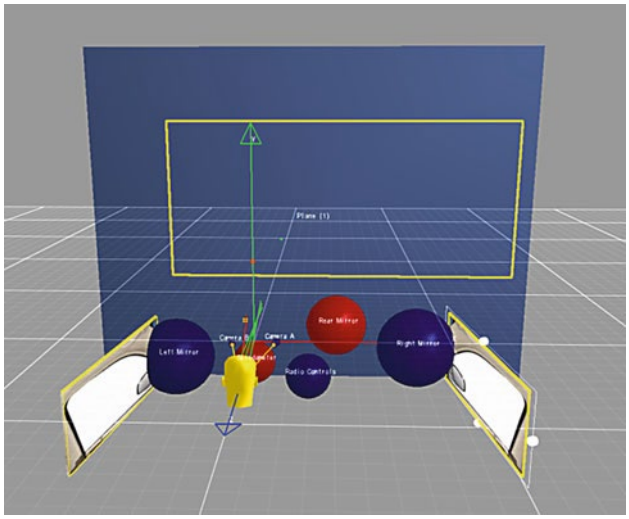


Abb. 11.12 CAD-Modell der Umgebung (Spiegel, Leinwand einer Fahrsimulation, …), der erkannte Kopf (gelb), sowie der errechnete Blickvektor (und der grüne Schnittpunkt mit der Szenerie auf der Leinwand) eines berührungsfreien Systems.

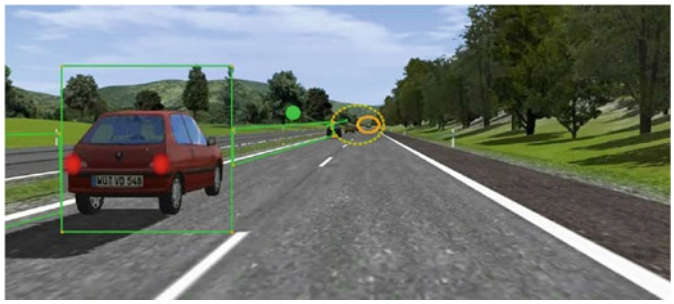


Abb. 11.13 Kombinierter Mitschnitt des Szenarios (virtuelle Realität auf einer Leinwand), mehrerer AOIs, und des Blickes (grüner Punkt).

Je nach System geschieht dies nur an einem Auge (z. B.: ETS-System) oder an beiden Augen (Stereosystem, z. B. Facelab). Aus der errechneten Kopfposition und erkannten Orientierungspunkten (z. B. Mundwinkel, Augenbrauen, Nase, …) innerhalb des Gesichtes wird, unter Zuhilfenahme der errechneten relativen Lage der Augen die Blickrichtung des Auges (oder beider Augen) im Raum bestimmt. Aus allen Systemen lassen sich allgemeine augenbasierte Metriken wie erfolgte Sakkaden, Fixationen, oder etwa der Pupillendurchmesser ableiten. Je nach System und Ausbaustufe kann weiterhin der errechnete Blickvektor auf mehrere Arten benutzt werden. Erstens lässt sich aus der Blickrichtung auf die Blickzuwendung bekannter Bereiche schließen, etwa auf einen Spiegelblick, den Anzeigebereich im Armaturenbrett oder einen Blick in die Szenerie hinter der Windschutzscheibe (siehe Abb. 11.12). Wenn also die Umgebung fest ist und somit die Positionen der möglichen statischen Beobachtungspunkte (AOIs = areas of interest) etwa durch ein CAD-Modell bekannt sind, ist somit eine vollautomatische Auswertung möglich. Zweitens lässt sich der Blickvektor für dynamische Umgebungen (z. B. den Straßenverlauf) und darin enthaltene dynamische AOIs einerseits in dem Bild einer mit der Szenerie (z. B. im Fahrzeug nach vorn gerichteten) fest verbundenen Kamera (oder der Videoaufzeichnung einer Simulation) fortlaufend markieren (siehe Abb. 11.13).

Wegen der vielen ineinander greifenden Bildverarbeitungsvorgänge und Koordinatentransformationen (von Kamerakoordinaten über Kopfkoordinaten, weiter zu Augenkoordinaten, und schlussendlich zum Blickvektor) sind berührungslose Methoden allerdings empfindlich gegen Lichtschwankungen, Vibrationen oder größere Kopfdrehungen und Blickauslenkungen. Obwohl sie gerade

für die Anwendung im Fahrzeug hilfreich wären, ist also ihre Anwendung gerade dort eher schwierig.

11.2.4.3 Technologievergleich

Im Folgenden wird ein Technologievergleich der Eye-Tracking-Verfahren wiedergegeben (◘ Tab. 11.2). Er baut auf der Systematisierung von Taylor et al. (2013) auf und wurde um beispielhafte Systeme ergänzt. Die Kurzbezeichnungen in der 2. Spalte werden im folgenden Textteil erklärt.

Typischerweise erzeugen alle Systeme nach einer Kalibrierung im Idealfall Winkelfehler zwischen 0,5° und 1°. Die Systeme sind in der Regel echtzeitfähig, das heißt, die Blickdaten können mit geringer Latenz über Netzwerkkanäle (TCP/UDP) abgerufen werden.

Alle Eyetracker erlauben Augenbasierte Messungen (**A**) wie etwa das Vorkommen von Fixation, Sakkaden, und in der Regel auch die Erfassung des Pupillendurchmessers.

Die meisten berührungsfreien Eyetracker (B-ET) sowie reine Kopftracker (B-KT) ermöglichen es visuell kopfbasierte Messungen (**K**) vorzunehmen und damit Aussagen über die Kopfposition und die Kopfrichtung (z. B. auf Szenerie oder einen Schulterblick) zu treffen. Für kopfbasierte Systeme lässt sich diese Funktionalität über ein in der Regel berührungsloses Kopftracking (K-ET-S-HT) realisieren. Dies erlaubt jedoch nicht, im Gegensatz zu den berührungsfreien Eyetrackern, Aussagen über die Verfügbarkeit des Nutzers (**V**, z. B. Augen geöffnet) zu treffen, da die berührungslosen Systeme meist nur die Pupille, nicht aber die Gesichtsgeometrie erkennen.

Die Stärke aller Eyetracker sind natürlich blickbasierte Messungen (**B**) von Blickinteraktionen, also etwa Blickzuwendungen (oder z. B. Fixationen) auf bestimmte Koordinaten. Alle Eyetracker unterstützen diese Messungen relativ zum Kopf und geben in der Regel auch genauere Winkel oder Koordinaten (wieder relativ zur Kopfposition) an, die dann benutzt werden, um bei kopfgebundenen Szeneriekameras (K-ET-S) die relativen Blickkoordinaten zu überlagern. Solche Aufzeichnungen machen allerdings nur grobe Aussagen darüber, welche Objekte angeschaut wurden, oder sie benötigen eine aufwändige Auswertung oder Umrechnung, etwa in Weltkoordinaten. Koppelt man berührungsfreie Eyetracker mit Kopftrackingsystemen (K-ET-S-HT) oder nutzt berührungsfreie Eyetracker(B-ET), so sind diese in der Lage, die Blickinteraktion in Weltkoordinaten (**BW**) umzurechnen (z. B. innerhalb der simulierten Szenerie oder einem realen Raum). Dies ermöglicht eine schnelle computerbasierte Auswertung, wenn die Positionen der AOIs innerhalb der Welt bekannt sind. Für ein Regal (in der Marktforschung), einen Monitor (für eine Softwareevaluation) oder eine Projektionsleinwand (in einer Fahrsimulation) ist dies in der Regel der Fall. Die letzten beiden Beispiele zeigen, weshalb hier eine Desktopaufzeichnung oder eine Aufzeichnung der virtuellen Realität (B-ET-VR) sinnvoll sein kann: Wird eine Software oder eine simulierte Umgebung evaluiert, so ist in der Regel auch Kenntnis darüber vorhanden, welche grafischen (statischen wie dynamischen) Elemente auf den Anzeigen an welcher Position ausgegeben wurden; dies vereinfacht eine automatisierte Auswertung.

Die Stärke von berührungsfreien Eyetrackern ist die schnelle Erfassung von Blickinteraktion mit definierten statischen (**BS**) AOIs (z. B. Fixation auf Spiegel oder sich nicht bewegende Bereiche). Diese werden vordefiniert, was eine schnelle computerbasierte Auswertung erlaubt. Die Stärke von kopfbasierten Eyetrackern hingegen ist ihre einfache Auswertung von Blickinteraktion mit definierten dynamischen (**BD**) AOIs (z. B. einer Ampel) in der Szenerie, da die Blickdaten relativ zur Kopfposition immer zur dazu fixen kopfbasierten Szeneriekamera passen. Um die Auswertung zu automatisieren, werden hier entweder vor dem Experiment Marker in der Umgebung positioniert, oder im Nachgang Bildverarbeitungsalgorithmen angewandt, die Objekte dynamisch verfolgen können. Eine dritte Möglichkeit ist die halbautomatische Markierung von Objekten mittels geometrischer Elemente (Kreis, Viereck, …) und das allmähliche Verschieben dieser Elemente. Kopfbasierte Eyetracker müssen statische AOIs allerdings wie dynamische behandeln, was einen Mehraufwand für die Auswertung erfordert. Berührungsfreie Eyetracker können in der Regel nicht das gesamte Sichtfeld des Probanden erfassen, da entweder die Aufzeichnung auf generierte Informationen (Desktop oder virtuelle Realität, B-ET-VR) beschränkt ist, oder aber eine fahrzeuggebundene Szeneriekamera (B-ET-S) nur einen beschränkten Bildausschnitt liefert.

Tab. 11.2 Technologievergleich

Kategorie	Funktionen	Systeme	Tracking	Besonderheiten
Kopfbasierter Eyetracker ***(K-ET)***	A B MO €€	SR Research EyeLink II	P C 500 Hz (1000 Hz)	Zweiaugensystem, schweres System (K).
Kopfbasierter Eyetracker mit kopfgetragener Szenerie-kamera ***(K-ET-S)***	A B BD MO €€€	Ergoneers Dikablis	P 50 Hz Inter-laced	Einaugensystem, Szeneriekamera (Fieldcam) ab Werk integriert. Markierung von AOIs in der Szenerie mittels Markern möglich (vereinfacht die Auswertung).
		TobiiGlasses	P 30 Hz Szenerieka-mera: 56°	Einaugensystem, Szeneriekamera und Mikrofon ab Werk integriert.
		SR Research EyeLink II + Scene Camera + Eye-works	s. o. Szenerieka-mera: 250 Hz	s. o.
		SMI Eye Tracking Glasses 2.0	P C 30–60 Hz Szenerieka-mera: 60°	Zweiaugensystem, HD Szeneriekamera und Mikrofon. Markierung von AOIs in der Szenerie mittels Objekterkennung möglich (vereinfacht die Auswertung).
Kopfbasierter Eyetracker mit kopfgetragener Szenerie-kamera und Headtracking (***K-ET-S-HT***)	A K B BD BS BW MO €€€€	SMI Eye Tracking Glasses 2.0 + SMI 3D Eye Tracking Package	s. o.	6D Head Tracking über standardisierte VPRN-Schnittstelle (A.R.T., Vicon, Kinect, World-Viz, …). Zusätzliche Shutterbrillenfunktionalität für VR-Umgebungen möglich.
		Ergoneers Dikablis + Vicon Nexus Motion Capturing	Dikablis: s. o. Vicon: 120–1000 Hz	Fusion der 3D Menschposition mit dem 3D Blickvektor in Echtzeit. Kopplung mit menschlichen Bewegungen.
Berührungs-freier Head-tracker (***B-HT***)	~~A~~ ~~B BS BD~~ BW K V KO €	Seeing machine face API	±90° Kopfrotation	Arbeitet mit beliebigen Webcams zusammen.

Tab. 11.2 (*Fortsetzung*) Technologievergleich

Kategorie	Funktionen	Systeme	Tracking	Besonderheiten
Berührungsfreier Eyetracker (***B-ET***)	A K V B BS BW KO €€	Seeing machine face LAB	P I C 60 Hz ±45° Abdeckung	Zwei kleine Kameras, die sich relativ frei positionieren lassen. Fusion der 3D Kopfposition mit dem 3D Blickvektor in Echtzeit. Mehrere Systeme können zur Vergrößerung des Trackingbereiches verbunden werden.
		Smart Eye Pro	P I C 60–120 Hz ±45° Abdeckung	Zwei kleine Kameras, die sich relativ frei positionieren lassen. Bis zu 8 Kameras pro System zur Vergrößerung des Trackingbereiches möglich.
		SR Research EyeLink 1000 Plus	P 500 Hz (1000 Hz, 2000 Hz)	Verschiedene Kameraausführungen (Desktop, LCD, Tower, Primatenforschung, Long Range). Nur Videooverlay des Desktops möglich (BW), keine Kenntnis über die Kopfposition (K), für das Fahrzeug nicht geeignet, große Kamera.
		SMI Red	P C 60 Hz (500 Hz) ±20° Abdeckung	Kameras sind in einer Leiste vormontiert und groß (gut für Desktopapplikationen, ungeeignet für Anwendung im Fahrzeug), kleine horizontale Winkelabdeckung.
		Tobii X/X2	P 60–120 Hz	Kameras sind in einer Leiste vormontiert und teilweise groß (gut für Desktopapplikationen, ungeeignet für Anwendung im Fahrzeug), kleine horizontale Winkelabdeckung.
		Eyetech VT2	P 80+ Hz	Kameras sind in einer Leiste vormontiert und teilweise groß (gut für Desktopapplikationen, ungeeignet für Anwendung im Fahrzeug), kleine horizontale Winkelabdeckung.
		LC Technologies EyeFollower	P 120 Hz ±45° Abdeckung	4 Kameras, gepulstes Infrarotlicht, sehr großes Gehäuse (34x18x23 cm).
		Mirametrix S2	60 Hz	Kameras sind in einer Leiste vormontiert und groß (gut für Desktopapplikationen, ungeeignet für Anwendung im Fahrzeug), kleine horizontale Winkelabdeckung, verhältnismäßig günstig (€)
		ITU Gaze Tracker	P C	Kostenloses Eyetracking mit beliebigen Webcams. Auch kopfbasierter Modus möglich.
		Open Eyes	P	Kostenloses Eyetracking mit Aufbauanleitung für Hardware.

Tab. 11.2 (*Fortsetzung*) Technologievergleich

Kategorie	Funktionen	Systeme	Tracking	Besonderheiten
Berührungsfreier Eyetracker mit statischer Szeneriekamera (***B-ET-S***)	A K V B BS BD BW KO €€€	Seeing machine face LAB + Scene Camera	s. o. Szeneriekamera: 30 Hz, 95°	
		Smart Eye Pro + Scene Camera	s. o.	Normale Szeneriekamera oder Panoramakamera möglich.
Berührungsfreier Eyetracker mit bildschirmbasierter Aufzeichnung oder virtueller Realität (***B-ET-VR***)	A K V B BS BD BW KO €€€	Eyetracker von Arrington Research, EyeTech, LC Technologies, Mirametrix, Seeingmachines, SMI, SR Research, Tobii + Eyetracking Inc. Eyeworks	20 Hz	Bildschirmaufzeichnung oder Aufzeichnung der virtuellen Realität mit 20 Hz und Überlagerung der Blickkoordinaten. Markierung und Verschiebung dynamischer AOIs in einer Zeitleiste.

11

Letztendlich stehen sich kopfgetragene und berührungslose Systeme in zwei Eigenschaften diametral entgegen: Bei ersteren ist der Nutzer mobil (**M**) und in seiner Bewegungsfreiheit wenig eingeschränkt, bei letzteren ist die Nutzung komfortabel (**KO**), da der Proband keine unter Umständen schweren Geräte am Körper tragen muss.

Es werden unterschiedliche Trackingtechnologien angewandt, wobei Pupillentracking (P) und Iristracking (I) ungenauer sind als Corneareflextracking (C). Aus dem Corneareflextracking ergibt sich allerdings nur dann ein Vorteil, wenn eine Infrarotquelle benutzt wird, deren Position klar definiert ist (sowohl bei kopfbasierten als auch bei berührungslosen Systemen). Eine Abtastraten von 50 oder 60 Hz reicht in der Regel aus, allerdings sind bei schnelleren Abtastraten bessere/stabilere augenbasierte Messungen möglich, was etwa Sakkadenerkennung oder hochfrequente Änderungen des Pupillendurchmessers betrifft.

Je nach Ausbaustufe sind die Gerätekategorien günstig (€) bis sehr teuer (€€€€), wobei sich innerhalb der Kategorien erhebliche herstellerspezifische Unterschiede feststellen lassen.

11.2.4.4 Interpretation von Blickdaten

Für die Analyse von Blickdaten müssen in der Umgebung sog. Areas oft Interest (AOI's, s. o.) definiert werden. Dies können Objekte auf der Straße (Verkehrszeichen, andere Verkehrsteilnehmer), der Umgebung (Reklameschilder, Gebäude Objekte der Natur, irrelevante Passagiere oder Fahrzeuge) oder Objekte im Fahrzeug (Instrumente, Spiegel, Bedienelemente) sein. Nach ISO/TS 15007-2 (2001) kann damit die Ablenkwirkung von der Fahraufgabe aber auch die Zuwendung zu speziellen Objekten durch folgende Parameter beschrieben werden:

- **Gesamtblickdauer auf ein AOI** (Summation aller Einzelblickdauern auf ein AOI während des Beobachtungszeitraums).
- **Maximale Blickdauer auf ein AOI**
- **Anzahl an Blicken auf ein AOI**
- **Mittlere Blickdauer auf ein AOI** (Gesamtblickdauer auf ein AOI bezogen auf die Anzahl der Blicke auf dieses AOI).
- **Prozentualer Blickanteil auf ein AOI** (Gesamtblickdauer auf das AOI bezogen auf die Dauer des Beobachtungszeitraums).

- **Blicksequenz auf ein AOI** (Anzahl der Blickzuwendungen auf ein AOI pro Zeiteinheit [Sekunde]).

Diese Kennwerte können für solche AOIs automatisch ausgewertet werden, welche wie z. B. ein Display oder eine Bedienelement örtlich fixiert sind. Für bewegliche AOIs, wie beispielsweise Fußgänger oder andere Verkehrsteilnehmer muss die Auswertung jedoch manuell erfolgen oder es müssen bildverarbeitungstechnische Erkennungszeichen genutzt werden, mit deren Hilfe spezifische Objekte detektiert werden.

Es gibt auch Blickkennwerte, welche die Fahrerbeanspruchung darstellen. Es sind dies:

- **durchschnittliche Fixationsdauer**: nach Menn et al. (2005) erhöht sich die durchschnittliche Fixationsdauer bei psychischer oder physischer Ermüdung.
- **Amplitude des durchschnittlichen Sakkadenwinkels:** nach Menn et al. (2005) verringert sich z. B. bei Tunnelfahrt (= erhöhte Beanspruchung) die Amplitude des durchschnittlichen Sakkadenwinkels von 5,5 ° (freie Strecke) auf 4,6°.
- **Visuelle Suchaktivität** = durchschnittlicher Sakkadenwinkel pro Zeiteinheit (Saito 1992): Nach Menn et al. (2005) verringert sich z. B. bei Tunnelfahrt die visuelle Suchaktivität von 17,8°/s bei freier Strecke auf 2,5°/s. Der Wert wird berechnet, indem man für den entsprechenden Streckenabschnitt die Summe aller Einzelfahrten auf die Dauer für den Abschnitt bezieht.
- **Prozentualer Anteil an Umweltblicken**: Schweigert (2003) und Thompson (2005) zeigen, dass diese Kennwerte bei einer Fahrerbeanspruchung durch eine Nebentätigkeit sinkt (siehe auch ◘ Abb. 3.55). Als Umweltblicke sind alle Blicke definiert, die nicht zur Erfüllung der primären Fahraufgabe zählen, wie zum Beispiel Blicke in den Himmel oder auf Bäume. Nicht dazu zählen Blicke auf Verkehrszeichen oder andere Verkehrsteilnehmer.

Bis auf den zuletzt genannten Kennwert „Prozentualer Anteil an Umweltblicken“ lassen sich alle Kennwerte zur Fahrerbeanspruchung automatisiert berechnen, da sie nicht in Verbindung zur Umwelt stehen, sondern sog. Pupillenaktivitätsmaße darstellen (Lange und Bubb 2008).

In diesem Zusammenhang sollen einige Anmerkungen zur Qualität von Blickbewegungsdaten gemacht werden. Generell sollten Auffälligkeiten in den Daten, welche die Ergebnisse beeinflussen könnten, berichtet werden, wenn sie im Rahmen von Blickbewegungsversuchen auftauchen. Hierzu zählen Messaussetzer aufgrund wechselnder Beleuchtungsbedingungen oder auch zu dunkler Augen des Probanden. Werden aus verschiedensten Gründen Daten im Nachhinein korrigierend bearbeitet oder auch von der Auswertung ausgeschlossen, dann ist dies unbedingt zu dokumentieren.

Bevor eine automatisierte Auswertung von Blickbewegungsdaten gestartet wird, ist zu empfehlen die Qualität der Daten zu überprüfen, da es in Abhängigkeit bestimmter Probanden oder Versuchssituationen u. U. zu nennenswerten Aussetzern in der Messung kommen kann. Nach ISO Standard 15007-2 liegen *exzellente* Daten vor, wenn die Verfügbarkeit der gemessenen Frames über 95 % liegt, eine *gute* Messung bei Verfügbarkeit bis zu 85 %. Unter 70 % wird in diesem Zusammenhang von einer *nicht akzeptablen* Messung gesprochen.

11.2.5 Leistungsmessungen

Klaus Bengler

Im Sinn des Mensch-Maschine-Systems nutzt der Fahrer das Fahrzeug, um die Fahraufgabe zu bewältigen. Die Bearbeitung dieser Aufgabe muss mit einer gewissen Qualität erfolgen, um der Verkehrssicherheit und den Verkehrsregeln gerecht zu werden. Nach den allgemeinen arbeitswissenschaftlich/ergonomischen Vorstellungen wird diese Qualität einerseits von den individuellen Eigenschaften und Fähigkeiten des Fahrers aber auch ganz wesentlich durch die Schwierigkeit der Fahraufgabe, das zur Verfügung stehende technische Material (Fahrzeug mit all seinen Eigenschaften) und durch Ablenkungen von der Tätigkeit beeinflusst. Deshalb stellen versuchstechnische Messungen der Fahrleistung eine wichtige Information über die oben genannten Einflüsse dar. Ausgehend von

einem normativen Modell (Verkehrsregeln, Instruktionen, Sicherheitsbetrachtungen) werden dafür unterschiedliche Bewertungen auf Basis von Metriken der Fahrzeugführung vorgenommen. Es wird in diesem Zusammenhang speziell auf ▶ Abschn. 2.1.3 verwiesen, der sich mit der Anwendung der Definition von Qualität und Leistung auf den Bereich der Fahraufgabe auseinandersetzt. Viele der im Folgenden dargestellten Metriken erfüllen die dort dargestellten Zusammenhänge nicht vollständig. Dennoch werden sie weitläufig in der Literatur geschildert und eingesetzt. Zur Kenntlichmachung dieser Abweichungen wird auf folgende einfache Statements hingewiesen:

- Qualität, definiert als Erfüllungsgrad der Aufgabe ist eine dimensionslose Größe. Oft wird sie als Prozentwert angegeben.
- Leistung als die in der Zeit erbrachte Qualität hat folglich die Dimension 1/Zeit (im Allgemeinen 1/s, seltener 1/min).
- Alle dimensionsbehafteten Größen (also zum Beispiel m, km/h u. ä.) sind als Indikatoren für Qualität bzw. Leistung zu kategorisieren.

11

11.2.5.1 Metriken zur Messung und Bewertung der Fahrzeuglängsregelung

Metriken zur Fahrzeuglängsregelung werden häufig eingesetzt, um die Interaktion des Fahrers mit Fahrerinformationssystemen oder Fahrerassistenzsystemen zu bewerten. Als Hauptkategorien sind zu nennen:

- Geschwindigkeit
- Fahrzeugfolgeverhalten
- Pedalnutzung

Geschwindigkeit

Es besteht ein originärer Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und der messbaren Verkehrssicherheit, der allein schon in dem hohen Maß begründet ist, mit dem die gefahrene Geschwindigkeit aufgrund der Fahrphysik in die Schadensbilanz bei einem möglichen Unfall eingeht (Nilsson 1984). Die Messung der Geschwindigkeit kann sehr gut über entsprechende Fahrzeugschnittstellen (CAN-Bus) erfolgen, über im Fahrzeug installierte Messsysteme (COREVIT) und mittlerweile auch sehr präzise und zuverlässig über mobile Messplattformen z. B. auf Basis eines Smartphones. Für die Auswertung dieser Daten verwendet man häufig:

- die durchschnittlich gefahrene Geschwindigkeit
- die Standardabweichung der Geschwindigkeit (Variabilität)
- die Maximal- bzw. Minimalgeschwindigkeit.

Alle diese Maße können auf eine zeitliche Dauer bzw. je nach Fragestellung auf eine zurückgelegte Strecke bezogen sein (Beispielsweise während der Lösung einer tertiären Aufgabe). Wichtig für die Interpretation ist dabei allerdings, dass die Geschwindigkeit an sich kein hinreichendes Qualitätsmaß darstellt (im Sinne von je niedriger desto besser), sondern dass sie immer nur in Relation zu einer gestellten Aufgabe korrekt interpretiert werden kann (Qualität = Ergebnis/Aufgabe; siehe auch die ausführliche Argumentation in ▶ Abschn. 2.1.5). Für die inhaltliche Bewertung werden häufig Vergleiche mit Baselinedaten herangezogen oder auch normativ vorgegebene Geschwindigkeitswerte. Die entsprechende Überschreitung gibt Hinweise auf fehlendes Situationsbewusstsein oder auch Überlastungsphänomene. Auch Beschleunigungswerten weit außerhalb des als komfortabel akzeptierten Bereiches ($> |3\,m/s^2|$) können in diesem Sinne als Abweichung von der Norm (= Sollgröße = Aufgabe) gewertet werden.

Fahrzeugfolgeverhalten

Die Distanz zwischen zwei Fahrzeugen ist definiert als der gemessene Abstand von vorderer Stoßstange zu hinterer Stoßstange, häufig gemessen mittels eines Radar- oder Lidarsensors. Auch in diesem Fall können ausgewertet werden

- der mittlere Abstand
- die Variabilität des Abstands
- das Minimum des Abstands

Wird der Abstand gemessen in Metern bezogen auf die gefahrenen Geschwindigkeiten der Fahrzeuge, dann ergibt sich die Möglichkeit, weitere Metriken zu berechnen:

- die time headway: distanz[m]/v_{eigen} = Zeitabstand
- die time to collision (TTC): distanz [m]/(v_{eigen} – v_{fremd})

Vor allem aus Sicherheitsüberlegungen stellt die TTC ein wichtiges Maß dar. Viele Verkehrsregeln nennen den zeitlichen Abstand zwischen zwei Fahrzeugen als Kriterium, wobei Werte unter 1,5 s häufig als Grenze gezogen werden.

Pedalnutzung

Häufige Pedalnutzung – sowohl bezüglich des Wechsels zwischen Gas- und Bremspedal als auch ein häufiger Gangwechsel (Nutzung des Kupplungspedals) – kann als Indikator für eine hektische und unausgeglichene Fahrweise gelten. Nachdem diese Verhaltensweise aber wesentlich durch den Streckenverlauf und durch die Verkehrssituationen beeinflusst wird, ist eine sinnvolle Interpretation dieser Daten nur möglich, wenn Daten einer unter gleichen und kontrollierten Bedingungen durchgeführte Baseline-Fahrt vorliegen.

11.2.5.2 Metriken der Querregelung – Lenkverhalten

Messungen, die auf dem Lenkverhalten beruhen, geben ebenfalls differenziert Aufschluss über die Beanspruchung des Fahrers, mögliche Assistenzbedarfe und mögliche Ablenkung durch tertiäre Aufgaben.

Ausgehend von regelungstechnischen Ansätzen und den grundlegenden Modellen der Fahraufgabe können Daten zum Lenkverhalten und zur Querstabilisierung ähnlich ausgewertet werden wie Daten der Längsregelung (siehe hierzu ▶ Abschn. 2.1.4). Hinzu kommen noch Ansätze, in denen auch das Frequenzspektrum der Lenkeingaben zum Tragen kommt. Hohe kognitive Beanspruchung äußern sich demnach häufig in einer Verschiebung des Lenkfrequenzspektrums im Vergleich zu entsprechenden Base-line-Messungen. Während höhere Beanspruchung in der primären Fahraufgabe sich in einer Erhöhung kleiner, hochfrequenter Lenkeingaben niederschlagen, äußern sich höhere kognitive Beanspruchungen gerade in einem Ausbleiben dieser in ihrer Amplitude kleinen Korrekturbewegungen. (McDonald und Hoffman 1980).

Die gebräuchlichsten Maße zur Beschreibung des Lenkverhaltens und seiner Qualität sind:

- die Standardabweichung der Querabweichung
- die Steering Wheel Reversal Rate, Lenkwinkelumkehrpunkte [n]
- die Anzahl der Spurüberschreitungen [n]
- die Lenkentropie
- die Lenkwinkelgeschwindigkeit [°/s]
- die absolute Spurlage [m]
- Time to Linecrossing [s]
- Standardabweichung des Lenkwinkels [°]
- Anteil der hochfrequenten Lenkbewegungen [%]

Bezüglich der Standardabweichung der Querabweichung, der absolute Spurlage und der Time to Line crossing wird auf die Darstellungen in ▶ Abschn. 2.1.4 sowie ▶ Abschn. 2.4.1 (◘ Abb. 2.21) verwiesen.

Details zur Sensitivität dieser Messgrößen gibt Knappe et al. (2007).

11.2.5.3 Messung der visuellen Beanspruchung und Unterbrechbarkeit – Okklusion

Im Zusammenhang mit Fahrerinformationssystemen stellt sich häufig die Frage nach deren Ablenkungswirkung und vor allem nach der Vereinbarkeit der Interaktion mit den Anforderungen der primären Fahraufgabe. Um diese Fragestellungen bereits in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses beantworten zu können, bietet sich die Okklusionsmethode an. Die Methode zielt darauf ab, dass Interaktionen und vor allem Blickzuwendungen zu Anzeigen im Innenraum nur von kurzer Dauer und gut unterbrechbar gestaltet sein müssen. Die Methode überprüft also, ob Fahrerinformationssysteme auch mit kurzen Blickzuwendungen gut benutzt werden können.

Im Rahmen eines Okklusionstests wird der Proband gebeten, eine definierte Tertiärinteraktion im Stillstand auszuführen und eine instruierte Aufgabe zu lösen (beispielsweise die Eingabe eines Navigationsziels). Die Aufgabe wird in einer Versuchsbedingung mit voller Blickzuwendung bearbeitet und in einer weiteren Versuchsbedingung mit unterbrochener Blickzuwendung. Diese wird durch eine Shutterbrille erzeugt, die sich – folgt man dem ISO Standard 16673 – jeweils 1.5 Sek. öffnet und „opaque“[2] schaltet. Gemessen wird die Dauer der Auf-

2 Das auf LCD-Basis gearbeitete Glas der Shutterbrille wird durch Anlegen einer Spannung milchig und damit undurchsichtig.

gabenbearbeitung (Total Task Time TTT) in beiden Bedingungen und die Anzahl und Dauer (Summe) der Öffnungsintervalle (Total Shutter Open Time TSOT) in der Okklusionsbedingung. Aus diesen Messungen lässt sich auf Basis der TSOT sehr gut die notwendige Blickzuwendung ermitteln, wie sie auch mittels Blickbewegungsmessung erhoben werden kann. Teilt man die TSOT der Okklusionsbedingung durch die TTT der nicht okkludierten Versuchsbedingung, dann erhält man den Parameter R (resumability), der eine Aussage über die Unterbrechbarkeit der Interaktion zulässt. Hohe R Werte (R > 0,7 für dieses Vorgehen) sprechen für wenig unterbrechbare Bedienkonzepte, die möglichst vermieden werden sollten.

Die Okklusionsmethode wurde im Rahmen von Fahrsimulationsversuchen validiert und hat sich als außerordentlich zuverlässig erwiesen (Baumann et al. 2004; Foley 2010). Für die praktische Anwendung besticht sie zudem vor allem durch die sehr einfache, Zeit sparende Datenerhebung und -auswertung.

11.2.5.4 Entdeckungsaufgaben zur Beurteilung der Aufmerksamkeit

Zur Beurteilung der verfügbaren Aufmerksamkeit des Fahrers kommen häufig Entdeckungsaufgaben zum Einsatz. Wenn man nur eine beschränkte Kapazität der menschlichen Informationsverarbeitung insbesondere bei Entscheidungsvorgängen unterstellt (siehe hierzu auch ► Abschn. 3.2.2.5), so glaubt man die Beanspruchung, die durch die Fahraufgabe zustande kommt, durch eine zusätzliche Aufgabe, die während des Fahrens zu erledigen ist, messen zu können. Man betrachtet dann die Reduktion der Leistung in dieser zweiten Aufgabe als Indikator für die Beanspruchung durch die primäre Aufgabe. Als Zweitaufgaben in diesem Sinn kommen einerseits akustische Aufgaben (beispielsweise Vorlesen von einsilbigen oder mehrsilbigen Wörtern; Aufgabe des Probanden ist es anzuzeigen, wenn eines dieser Worte ein Lebewesen kennzeichnet) oder optische Aufgaben in Betracht (z. B. Darstellen von einfachen Figuren auf einem Display; Aufgabe des Probanden ist es, bei Erscheinen einer bestimmten Figurenart zu reagieren). Eine besonders häufig eingesetzte Variante zur Messung der verfügbaren Aufmerksamkeit besteht darin, am Rand der Windschutzscheibe ein Lämpchen-Array im nahen peripheren Bereich anzubringen und in einer Zufallsfolge ein Lämpchen aufleuchten zu lassen. Aufgabe des Probanden ist es dann, auf geeignete Weise (verbal oder Betätigung einer am Lenkrad angebrachten Taste) kenntlich zu machen, dass er das Aufleuchten wahrgenommen hat. Auf diese Art soll zum Beispiel der zunehmende „Tunnelblick“ bei erhöhter Beanspruchung durch die Fahraufgabe objektiviert und quantifiziert werden.

Das prinzipielle Problem aller Dual-Task-Messungen ist nach wie vor, dass man sich nicht sicher sein kann, ob die Versuchsperson unter allen Umständen tatsächlich die Fahraufgabe als die primäre Aufgabe ansieht. Insbesondere bei sehr leichter Fahraufgabe (z. B. auf einer entlegenen, wenig kurvenreichen Landstraße ohne Verkehr) kann keineswegs sicher vermieden werden, dass sich der Fahrer gänzlich auf die Nebenaufgabe konzentriert. Zumindest ist es bei solchen Dual-Task-Aufgaben unerlässlich, auch die Qualität/Leistung in der Primäraufgabe zu messen. Conti et al. (2013) beschreibt ein Experiment, welches die entsprechenden Einflüsse der Instruktion und der Aufgabenschwierigkeit untersucht.

Zur Bewertung von Nebenaufgaben, die sehr wenig visuell-manuelle Anteile, dafür aber sehr viele kognitive Anteile beinhalten, wird derzeit die sogenannte Detection Response Task (DRT) entwickelt. Vor allem Sprachbedienung, Hören oder mentale Operationen wie Kopfrechnen stellen hier den Gegenstand der Bewertung dar. Während der Proband eine Nebentätigkeit ausführt, werden Reize (taktil oder visuell) präsentiert, auf die möglichst schnell per Tastendruck reagiert werden soll. Die gemessene Reaktionszeit und die verpassten Reaktionen stellen für den Schätzer den Grad der kognitiven Beanspruchung dar. Die Darbietung der taktilen Reize erfolgt beispielsweise per Vibration im Bereich des Nackens oder Handgelenks. Die Darbietung der visuellen Reize in Form eines LED Arrays oder einer zentral am Kopf fixierten LED. Die Versuche können in Form von Zweitaufgabenversuchen (DRT + Nebenaufgabe) oder Drittaufgabenversuchen (Fahraufgabe – Feld oder Simulator – + DRT + Nebenaufgabe) durchgeführt werden (Young et al. 2013; Merat und Jamson 2008; Jahn et al. 2005; Conti et al. 2012).

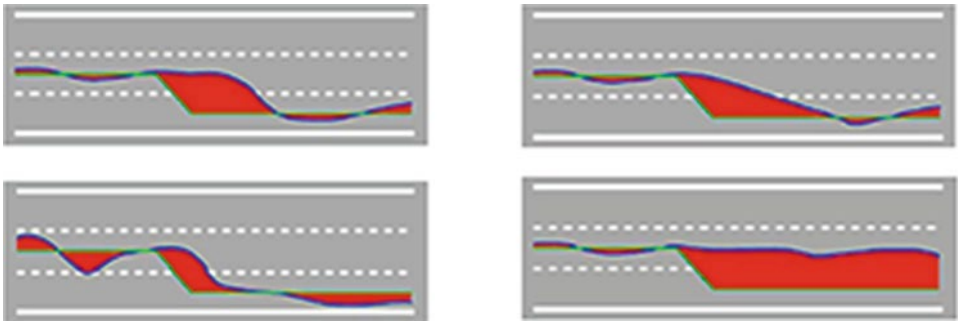


Abb. 11.14 Fehlerdefinition beim Lane Change Test (aus ISO 26022)

Der Vorteil der DRT liegt in ihrer Eigenschaft, auch sehr kurze Nebenaufgaben mit hoher Sensitivität beurteilen zu können. Sie ist vor allem im Bereich der kognitiven Aufgaben ein valides Messinstrument.

11.2.5.5 Messung der Ablenkungswirkung tertiärer Aufgaben – Lane Change Test

Während im Fall der Okklusionsmethode die tertiäre Aufgabe in einer Single-task-Bedingung untersucht wird, stellt der Lane-Change-Test eine standardisierte Zweitaufgabensituation (dual-task) dar. Der Lane Change Test (LCT) wird durch eine einfache Computersimulation hergestellt, kann aber auch im Fahrsimulator realisiert werden. Obwohl er wie eine einfache Fahrsimulation anmutet, stellt der LCT im Grunde eine einfache Reaktions-, Entscheidungs- und Trackingaufgabe dar. In diesen Aufgaben bildet er die Anforderungen der Fahraufgabe nach. Auf einer unbefahrenen Fahrbahn mit drei Fahrstreifen muss die Versuchsperson möglichst schnell einen Fahrstreifenwechsel durchführen. Die Anweisung erhält sie aus einer entsprechenden Beschilderung (siehe ▶ Abschn. 10.4.3 und ◘ Abb. 10.15). Die Auswertung ermittelt die Abweichung der gefahrenen Trajektorie zu einem normativen Modell (optimale Trajektorie) bezogen auf die gefahrene Strecke (siehe ◘ Abb. 11.14). Das Flächenintegral der Abweichung ergibt einen Schätzwert (MDEV) für die Ablenkung durch eine Nebenaufgabe, die während des LCT durchgeführt wird und ist Gegenstand der Beurteilung. Je kleiner der MDEV-Wert, umso weniger ablenkend wird die Nebenaufgabe angenommen. Der LCT eignet sich auch dazu, entwicklungsbegleitend eingesetzt zu werden – Er stellt eine sehr ökonomische Prüfmethode dar. Die exakten Ausführungsbestimmungen sind dem ISO Standard ISO-26022 zu entnehmen, der prinzipielle Aufbau ist in Bengler et al. (2010) dargestellt.

11.2.6 Physiologische Parameter

Heiner Bubb

Physiologische Messungen stellen auf den ersten Blick eine unmittelbare Messung der menschlichen Beanspruchung in Aussicht und sind aufgrund der technischen Entwicklung im Bereich der Sensorik und Messdatenerfassung in erfreuliche Reichweite gerückt. Allerdings ist zu beachten, dass gerade im Umfeld der Fahraufgabe nennenswerte Artefakte auftreten können, die zu einer Verfälschung der Werte führen können. Die motorischen Aktivitäten beim Lenken des Fahrzeugs und die mögliche Veränderung der Innenraumtemperatur können durchaus zu Effekten im Bereich der Herzfrequenz bzw. des hautgalvanischen Widerstands führen. Ebenfalls sind die interindividuellen Unterschiede zu beachten, die sowohl physiologisch begründet sein können aber auch gelegentlich mit Unterschieden in der Fahrerfahrung erklärt werden.

Im Bereich der Blickmessung erscheint es vielversprechend, die Veränderung der Pupille als Indikator für erhöhte kognitive Aktivität zu betrachten. Die entsprechenden Messungen müssen hochfrequent vorgenommen werden und derzeit werden nach wie vor auch störende Einflüsse der Umgebungshelligkeit

berichtet, die Artefakte erzeugen können. Der interessierte Leser findet weitergehende Informationen bei Marshall (2002) und Dlugosch et al. (2013).

Die Anwendung physiologischer Messungen, Analyse und vor allem Interpretation physiologischer Messreihen erfordert also größte Sorgfalt und Erfahrung.

11.2.6.1 Herzfrequenz

Bei dynamischer Muskelarbeit wird der gestiegene Energieumsatz der Muskulatur durch eine Erhöhung der Herzschlagfrequenz zufrieden gestellt, indem dadurch mehr Sauerstoff und Nährstoffe pro Zeiteinheit an die Muskulatur transportiert werden. In der evolutionären Entwicklung hat es sich als Vorteile hast erwiesen, bei psychischer Belastung ebenfalls die Herzfrequenz anzuheben, da in der ursprünglichen gefährdenden Wildnis eine verändernde psychische Situation normalerweise durch physische Anstrengungen bewältigt werden musste (Flucht bzw. Kampf). Dieses „Überbleibsel" der evolutionären Entwicklung kann auch in Situationen, die eine psychische Belastung darstellen, wie eben auch das Autofahren, genutzt werden, um die dadurch bewirkte psychische Beanspruchung zu objektivieren. Die Herzfrequenz wird in vielen Experimenten begleitend mit aufgezeichnet, u. a. auch weil sie relativ einfach erfasst werden kann. Heute kommen dafür im Wesentlichen auf die Haut aufgeklebte Elektroden zum Einsatz, da sich der mit elektrischer Aktivität einhergehende nervöse Taktgeber für die Herzinnervation auch auf der Haut ausbreitet. Eine noch viel einfachere Methode stellt die Ohrläppchenmessung dar. Hier wird ein Messaufnehmer am Ohrläppchen angeklemmt, der auf der einen Seite eine schwache Lichtquelle und auf der anderen Seite eine Fotodiode enthält. Im Takt der Herzfrequenz wird mehr oder weniger Blut auch durch das Ohrläppchen gepumpt, so dass die leichte veränderte Lichtdurchlässigkeit für die Messung der Herzfrequenz genutzt werden kann. Beide Messmethoden sind im Prinzip stark artefaktabhängig (Muskelaktivität kann z. B. zusätzliche elektrische Impulse über die Hautoberfläche transportieren; starke Bewegung des Kopfes hat Veränderungen der gemessenen Lichtintensität an der Fotodiode zur Folge), moderne Fehlerkompensationsalgorithmen können diese Fehler aber gerade unter der Bedingung des relativ ruhigen Sitzen am Fahrerplatz sehr gut kompensieren.

Für die Interpretation der Herzfrequenz ist allerdings zu berücksichtigen, dass der Pulsfrequenzanstieg bei geänderter psychischer Belastung extrem von individuellen Gegebenheiten und Befindlichkeiten abhängt, was zur Folge hat, dass im Gegensatz zu Bewertung physischer Anstrengungen die beobachtete Pulsfrequenzänderung nur ein Indikator für die geänderte psychische Beanspruchung ist. Die Höhe des Pulsfrequenzanstiegs sagt also wenig über die Höhe der Beanspruchung aus. Trotzdem kann es für viele Untersuchungsfragen von Interesse sein, überhaupt zu beobachten, dass eine psychische Reaktion vorliegt.

Die hier gemachte Aussage gilt auch für aus der Herzfrequenz abgeleitete Messgrößen. Eine der wichtigsten davon ist die sog. Pulsarhythmie. Bei unbelastetem Organismus ist nämlich der Pulsschlag nicht exakt regelmäßig. Seine Regelmäßigkeit nimmt bei zunehmender körperlicher Belastung zu. Auch bei psychischer Belastung kann man feststellen, dass die Pulsarhythmie geringer wird. Als Maßgröße für die Pulsarhythmie dient dabei die Standardabweichung der Pulsfrequenz. Auch für die so definierte Pulsarhythmie gilt allerdings, dass Ihre zahlenmäßige Größe nur in geringem Maße mit der Höhe der psychischen Beanspruchung korreliert und offensichtlich von weiteren nicht kontrollierbaren Einflüssen abhängt.

11.2.6.2 Hautleitwiderstand

Eine weitere auf psychische Belastungsänderungen reagierende physische Messgröße ist der Hautwiderstand. Er wird gemessen, indem man zwei Elektroden auf der Hautoberfläche aufklebt (meist am Unterarm) und zwischen diesen Elektroden einen leichten Messstrom fließen lässt. Aus ähnlichen Gründen, die für die Erhöhung der Herzfrequenz gelten, wird bei psychischer Belastung vom Organismus vorsorglich Schweiß ausgeschüttet, um die bei der zu erwartenden körperlichen Anstrengung erhöhte Wärmeabgabe der Muskulatur zu kompensieren. Der salzhaltige Schweiß zeigt einen geringeren elektrischen Widerstand als die trockene Haut, welcher durch den erwähnten Messstrom festgestellt werden kann. Da der Übergangswiderstand an den Elektroden auch bei sorgfältiger Anwendung bei je-

dem Neuaufkleben unterschiedlich ist, können Daten aus der Hautwiderstandsmessung ohnedies nur innerhalb eines Messzyklus miteinander verglichen werden. Auch hier gilt die obige Feststellung, dass die Menge der Schweißausschüttung von vielen weiteren Faktoren abhängt, so dass auch sie nur ein Indikator für geänderte psychische Beanspruchung ist.

Der Hautwiderstand kann aber auch dazu verwendet werden, zu objektivieren, ob der Proband die Hände am Lenkrad hat oder nicht. Wenn man nämlich einen leichten elektrischen Potenzialunterschied zwischen dem Lenkrad und dem Sitz herstellt, so fließt über den Fahrer ein leichter Strom. Sofern der Fahrer die Hände nicht am Lenkrad hat, wird dieser Stromkreis unterbrochen. Es stellt dies eine Anwendungsmöglichkeit dar, um bei bestimmten Assistenzsystemen, die den Erhalt der Reaktionsfähigkeit des Fahrers voraussetzen, zumindest seine körperliche Bereitschaft zur Reaktion technisch zu beobachten.

11.2.6.3 Elektroenzephalogramm (EEG)

Die Elektroenzephalografie (EEG) erlaubt es den Forschern, den mentalen Zustand oder die mentale Aktivität von Probanden besser zu verstehen und zu bestimmen. Bei dieser Methode wird die extrazelluläre kortikale elektrische Aktivität, die sich als Antwort auf eine bestimmte Aufgabe oder mehrere Aufgaben ergibt, verstärkt und anschließend gemessen (für genauere Beschreibungen siehe Niedermeyer und Lopez 2005; Speckmann und Elger 2005). Um derartige Untersuchungen zu ermöglichen, werden typischerweise Elektroden[3] verwendet, welche auf einer elastischen Haube befestigt sind und mittels leitfähigem Gel auf der Kopfhaut platziert werden.

Die aufgezeichneten Aktivitäten entsprechen der Potentialdifferenz zwischen der Messelektrode (z. B. aktive kortikale Bereiche) und der Referenzelektrode (z. B. weniger aktive Bereiche). Dabei zeigen die EEG Messungen zeitlich sehr präzise Messergebnisse, welche den Nachteil der geringen räumlichen Auflösung zum Teil ausgleichen. Obwohl technische Verbesserungen in der Quellenlokalisation z. B. durch „Low Resolution Electromagnetic Tomography“ (LORETA; Pascual-Marqui et al. 1994) erzielt worden sind, ist derzeit die maximale Auflösung nicht durch spezifische Gehirnstrukturen, sondern durch die intrakraniellen Quellen elektrischer Aktivität des Gehirns begrenzt.

Zur Quantifizierung des EEG-Signals werden häufig ereigniskorrelierte Potentiale (EKP) und die spektrale Leistungsdichte (Power spectral density, PSD) benutzt. EKPs, die eine Reizantwort des Gehirns auf einen bestimmten Stimulus darstellen, werden vor allem bei der Untersuchung spezifischer Fragestellungen hinsichtlich der Erfassung der Geschwindigkeit von wahrnehmenden, kognitiven und motorischen Komponenten genutzt. Andererseits sind PSDs besser geeignet für z. B. Block-Design Gehirnzustände, welche mit dieser Methode bestimmt werden. Gehirnfrequenzen können folgendermaßen kategorisiert werden: delta (1–4 Hz); theta (4–7 Hz); alpha (8–13 Hz); beta und gamma (20–60 Hz) (Steriade 2005). Obwohl das EEG ursprünglich vor allem im Bereich des klinischen Umfelds genutzt wurde (Niedermeyer 2005), setzt sich diese Methode immer mehr in praktischen Bereichen wie z. B. der Ergonomie und Arbeitswissenschaft durch und leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Entstehung der Neuroergonomie (vgl. Parasuraman und Rizzo 2008; für weiterführende Informationen bezüglich EEG: Gevins und Smith 2008). Moderne EEG Systeme sind mittlerweile in verschiedenen Bauformen und Größen, in mobilen Ausführungen und sogar ohne die Verwendung von leitfähigen Gelen verfügbar[4].

Mit Hilfe von EEG Systemen kann eine Vielzahl verschiedener Nutzerzustände wie beispielsweise die mentale Beanspruchung, die Vigilanz oder auch die Ermüdung des Fahrers gemessen werden. Die Zunahme der zentralen exekutiven Funktion und die daraus abgeleitete mentale Beanspruchung, ist mit der Erhöhung der Theta Amplitude in den frontalen Kopfbereichen verbunden (Sauseng et al. 2008).

Schmidt et al. (2009) und Simon et al. (2011) haben herausgefunden, dass sich die Alpha-Spindelrate erhöht und die P3-Amplitude verringert, wenn die Versuchspersonen für 4 Stunden Auto gefahren sind, was eine Reduzierung der Vigilanz bedeutet.

3 neuerdings aktive Elektroden.

4 z. B.: ▶ www.emotiv.com. Stand 30/April 2014. ▶ http://neurosky.com/products-markets/eeg-biosensors/; Brainproducts (▶ www.brainproducts.com). Stand 30/April 2014.

Zusätzlich dienen in anderen Studien erhöhte Delta- und Theta-Aktivitäten als Indikatoren für Müdigkeit. Insbesondere fanden Lal und Craig (2002), dass die Müdigkeit vor allem durch eine Erhöhung der Delta- und Theta-Aktivität begleitet wurde, wenn die Versuchspersonen eine monotone Fahraufgabe 2 Stunden lang oder bis zur Ermüdung ausgeführten. Auch über einige kleinere Änderungen der Alpha- und Beta-Aktivität wurden berichtet (Lal und Craig 2002). EEG-Systeme wurden sogar als Gehirn-Computer Schnittstelle (engl. Brain Computer Interfact; BCI) außerhalb des Fahrzeugs untersucht, um eine direkte Verbindung zwischen den kortikalen Signalen und der jeweiligen Maschine herzustellen. Wolpaw et al. (1991) nutzten Mue-Rhythmus Amplituden, um eindimensionale Cursorbewegungen zu realisieren. Momentan gibt es Projekte wie „BrainDriver" (2011) und „Think and Drive"[5], die sich damit beschäftigen, Autos durch Neuro-Signale zu steuern.

11.2.6.4 Elektromyogramm (EMG)

Muskelaktivität wird durch α- bzw. γ-Innervation erzeugt (siehe auch ▶ Abschn. 3.2.3). Da jede Innervation auch mit elektrischer Aktivität verbunden ist, können die dadurch bedingten Potenzialunterschiede durch Elektroden, die auf der Hautoberfläche in der Nähe des interessierenden Muskels aufgeklebt sind, beobachtet werden. Bei stärkerer Muskelanstrengung ist eine größere Innervationsrate notwendig, so dass das gemessene Potenzial ein Maß für die Muskelanstrengung ist. Die Aufzeichnung dieser Potenziale wird Elektromyographie (EMG) genannt. Natürlich gilt auch in diesem Zusammenhang, dass der Übergangswiderstand der Elektroden von Aufkleben zu Aufkleben unterschiedlich ist. Damit lassen sich EMG-Daten, die an verschiedenen Tagen aufgenommen worden sind, bezüglich ihrer Amplitude nicht miteinander vergleichen. Es sind in jedem Fall immer nur relative Vergleiche innerhalb eines Versuchszyklus möglich. Im automobilen Bereich wäre gerade im Hinblick auf eine Bewertung des Diskomforts von besonderem Interesse, die Aktivität der Rückenmuskulatur zu messen. Leider lassen sich diesbezüglich mittels EMG keine Aussagen machen, da der Übergangswiderstand zwischen Elektrode und Haut durch den Anpressdruck extrem verändert wird. Damit sind gerade in dem Bereich, wo der Rücken Kontakt mit der Lehne hat, Messungen nicht möglich.

5 AutoNOMOUS Lab (2011). BrainDriver. Stand 30/April 2014 von: ▶ http://www.autonomos.inf.fuberlin.de/subprojects/braindriver; Stand 30/April 2014. Think and Drive – Brain Driven Hybrid Vehicle von: ▶ https://www.facebook.com/Brain.driven.hybrid.vehicle. Stand 30/April 2014.

11.2.6.5 Adrenalinausschüttung

Die Ausschüttung von Adrenalin stellt in kritischen Situationen einen sehr zuverlässigen Indikator für Stresssituationen dar. Allerdings eignet sich diese Methode wenig für die Anwendung im Fahrzeug, denn der Adrenalingehalt kann zunächst nur durch Blutuntersuchungen festgestellt werden. Da Adrenalin sich auch im Speichel zeigt, lässt er sich, allerdings mit einer ziemlichen Zeitverzögerung zum Einsetzen der Stresssituation auch unblutig nachweisen. Diese Methode ist deshalb eher für eine integrative Objektivierung von Stresssituationen geeignet als für eine unmittelbare Zuordnung zwischen der Situation und der Reaktion.

11.3 Subjektive Messungen

11.3.1 Psychophysik

11.3.1.1 Psychophysische Gesetze

Das in der Ergonomie angewendete Modell des Belastungs-Beanspruchungs-Konzeptes besagt, dass eine bestimmte physikalisch oder auch soziologisch beschreibbare Situation in Abhängigkeit von den Eigenschaften, Fähigkeiten und Befindlichkeiten der Person, auf welche diese Situation wirkt, zu einer individuellen Beanspruchung führt. „Beanspruchung" kann dabei sowohl positiver (z. B. Gefallen, Wohlbefinden, enthusiastische Reaktion, Akzeptanz) wie negativer Natur (Diskomfort, Ablehnung) sein. Viele im Entwicklungsprozess eines Automobils gemachte Versuche beziehen sich darauf, quasi-gesetzmäßige Zusammenhänge zwischen den physikalischen Reizen, die ein bestimmtes Fahrzeugkonzept ausübt, und den Empfindungen, welche diese Reize hervorrufen, zu finden, da solche Zusammenhänge bereits in einer frühen Phase der Entwicklung eine nutzergerechte Konzeption ermöglichen. Solche Zusammenhänge herzustellen, ist Gegenstand der klassischen Psychophysik.

Allgemeines Ziel der Psychophysik ist es, einen gesetzmäßigen Zusammenhang der Form

$$E = \mathrm{f}(R) \tag{11.1}$$

zu formulieren. Dabei steht E für die subjektive Empfindung und R für den objektiven Reiz. Anhand des Abschätzens von Gewichten machte Weber (1834) grundlegende Versuche dazu. Er fand für viele Reize den Zusammenhang, dass der Reizzuwachs ΔR, der notwendig ist, um gerade eine Änderung zu empfinden, von der Reizhöhe R abhängt. Diesen Zusammenhang formulierte er in der Form:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \tag{11.2}$$

k wird als *Webersche Konstante* bezeichnet. Sie ist reizspezifisch und abhängig von den Versuchsbedingungen (z. B. der zeitlichen Darbietungsreihenfolge der Reize).

Fechner (1860) entwickelte aus der Weberschen Beobachtungen ein Gesetzt der Psychophysik, das den gewünschten Zusammenhang (Gl. 11.1) zwischen Empfindung E und Reiz R beschreiben sollte. Er machte dazu den – genau genommenen der Weberschen Beobachtungen widersprechenden – Grenzübergang $\Delta R \rightarrow dR$ und konnte damit die Webersche Gl. 11.2 integrieren. Das Ergebnis ist das bekannte Weber-Fechnersche Gesetz der Psychophysik:

$$E = c \cdot \log \frac{R}{R_0} \tag{11.3}$$

R_0 ist dabei die im Experiment gefundene Reizschwelle, die gerade zu einer Empfindung führt, c eine beliebig zu wählende Konstante[6]. Spätere Untersuchungen von Stevens vor allem im akustischen Bereich zeigten aber, dass eine Verdoppelung der Empfindung nach dem Weber-Fechnerschen Gesetz keineswegs einer Verdoppelung der empfundenen Lautstärke entspricht. Sehr viel bessere Ergebnisse fand Stevens mit einem Potenzansatz der Form:

$$E = c \left(\frac{R}{R_b} \right)^n \tag{11.4}$$

Dabei ist R_b ein beliebiger Bezugsreiz, durch den der Ausdruck R/R_b dimensionslos gemacht wird (normalerweise verwendet man hierfür die Maßeinheit des Reizes R). n ist ein exponentieller Faktor, der abhängig von Reiz und Versuchsbedingungen ist[7].

11.3.1.2 Bestimmung von Schwellwerten

Ein wesentlicher Teil der Psychophysik stellt experimentelle Methoden bereit, mit deren Hilfe absolute Reizschwellen (der Reiz, der gerade zu einer Empfindung führt)[8] und Reizunterschiedsschwellen (der Reizzuwachs oder -nachlass, der nötig ist, um gerade eine Änderung zu spüren)[9] herauszufinden. Die klassischen Methoden zur Schwellenbestimmung gehen bereits auf Fechner (1860) zurück. Um bei der sog. *Konstanzmethode* die Absolutschwelle experimentell herauszufinden, werden dem Probanden in zufälliger Abfolge zuvor festgelegte Reize R vorgelegt, zu denen er im Sinne einer ja/nein-Entscheidung angeben muss, ob er den Reiz wahrnimmt oder nicht. Geht es darum, die Unterschiedsschwelle herauszufinden, wird dem Probanden ebenfalls in zufälliger Abfolge ein Bezugsreiz R und ein Vergleichsreiz $R + \Delta R$ präsentiert. Er hat dann in Abhängigkeit von dem experimentellen Ansatz die Antwortmöglichkeiten „größer/klei-

6 In der Akustik stellt die Schallintensität I = R den Reiz dar. Bei einer Frequenz von 1000 Hz wird die gerade wahrnehmbare Intensität I_0 mit 10^{-12} W/m² angegeben. Es wird c = 10 gesetzt. Der als Empfindung bezeichnete, an sich dimensionslose Lautstärkepegel E = L wird dann in Dezibel [dB] angegeben. Zwischen dem an einem Mikrofon messbaren Schalldruckpegel Δp und der Intensität I besteht die Proportionalität $I \approx (\Delta p)^2$. Der gerade wahrnehmbare Schalldruck wird mit $\Delta p_0 = 2 \cdot 10^{-12}$ N/m² angegeben. Damit ergibt sich der Zusammenhang: $L = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} = 20 \cdot \log \frac{\Delta p}{\Delta p_0}$

7 Im akustischen Bereich fand Stevens, dass (bei einem Ton von 1000 Hz) ab einem Lautstärkepegel von L = 40 dB eine Zunahme von 10 dB einer Verdoppelung der empfundenen Lautstärke E entspricht. Damit lassen sich für das Stevenssche Potenzgesetz die Konstanten c und n berechnen. Es lautet: $E = \frac{1}{16} \cdot \left(\frac{\Delta p}{\Delta p_0} \right)^{0,6}$

8 z. B.: Welche Beschleunigung führt in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsniveau gerade zu der Empfindung einer Geschwindigkeitsänderung?

9 z. B.: Welches Nachlassen der Beschleunigung wird während eines Beschleunigungsvorgangs gerade noch gespürt?

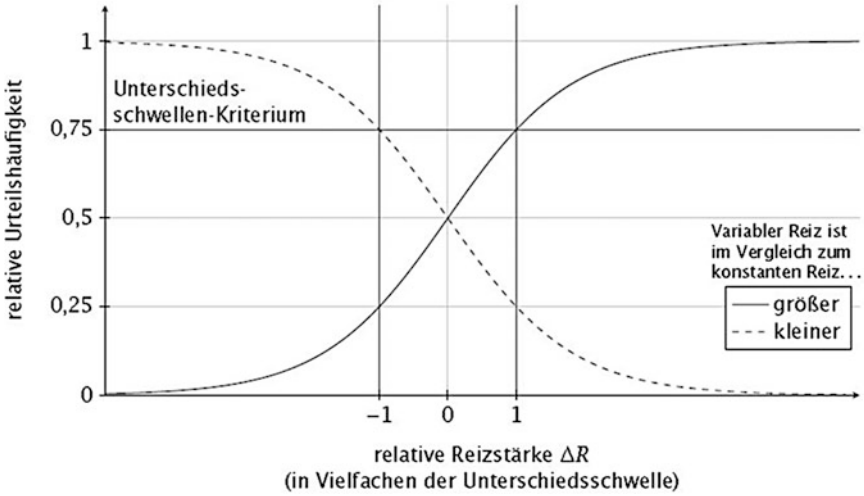


Abb. 11.15 Idealisierter Verlauf eines Experiments nach der Konstanzmethode zur Unterschiedsschwellenbestimmung mit den Antwortkategorien „größer/kleiner" (aus Kühner 2014)

ner", bzw. „größer/gleich" oder auch „größer/gleich/kleiner". Abbildung 11.15 zeigt den idealisierten Verlauf eines solchen Experiments mit der Antwortmöglichkeit „größer/kleiner". Mit zunehmendem Unterschiedsreiz nimmt die Wahrscheinlichkeit für die Antwort „größer" zu, umgekehrt nimmt die Wahrscheinlichkeit für die Antwort „kleiner" ab. Durch Festlegen einer 75 %-Grenze bestimmt man dann für ΔR einen Bereich, in dem sich 50 % unsicherer Antworten befinden (sog. 50 %-Kriterium).

Im Gegensatz zur Konstanzmethode wird bei dem *Grenzverfahren* dem Probanden nicht das gesamte Spektrum möglicher Reize präsentiert. Vielmehr werden ihm jeweils in mehreren Durchgängen zur Bestimmung der Absolutschwelle auf- und absteigende Reize bzw. zur Bestimmung der Unterschiedsschwelle Reizpaare solange vorgelegt, bis ein Wechsel der ja/nein-Antwort erfolgt. Die jeweilige Schwelle wird dann durch Mittelung dieser Abbruchreizstärken bestimmt.

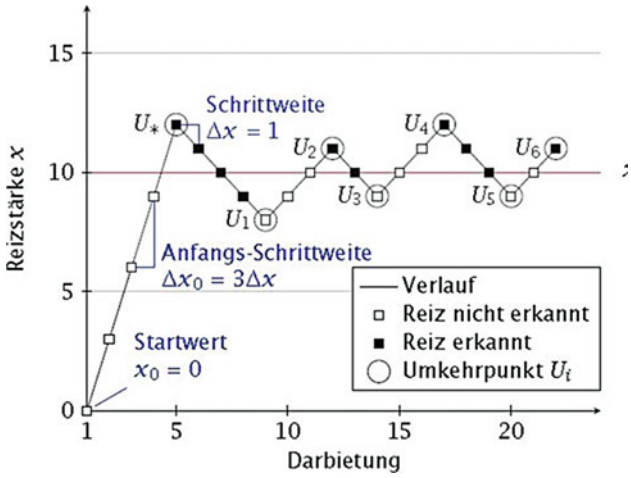
Eine moderne Variante der Grenzmethode stellt das sog. *Simple-Staircase-* bzw. *Up/Down-Verfahren* dar, das zuerst von Békésy (1947) bzw. Dixon und Mood (1948) vorgestellt worden ist (Abb. 11.16). Hier wird ausgehend von einem Startwert die Reizstärke zunächst in größeren Schritten solange vergrößert bis die Versuchsperson zum ersten Mal den Reiz R bemerkt bzw. wahrnimmt, dass der Reiz $R + \Delta R$ größer ist als der Vergleichsreiz R_0. Von diesen Umkehrpunkt U_* ausgehend werden die Reize nun in kleineren Schritten verringert, bis die Versuchsperson feststellt, dass der Reiz nun nicht mehr wahrnehmbar bzw. kleiner als der Vergleichsreiz ist. Nach diesem Umkehrpunkt U_1 wird das Ganze in die Gegenrichtung wiederholt bis zum nächsten Umkehrpunkt U_2 usw. Der Schwellwert ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel der Reizstärken an den normalerweise 6 Umkehrpunkten, wobei der erste Umkehrpunkt U_* häufig von der Schwellwertbestimmung ausgeschlossen wird. Natürlich kann das Verfahren auch in die umgekehrte Richtung durchgeführt werden, d. h. also von größeren Werten kommend. Wenn man beide Verfahren anwendet, kommt man üblicherweise zu leicht unterschiedlichen Grenzwerten.

Im weiteren Verlauf der Entwicklung wurden viele unterschiedliche adaptive Methoden entwickelt, die sich vor allem durch die Regeln zur Anpassung der Reizstärke unterscheiden. Die hier vorgenommene Zusammenstellung stellt ein Extrakt aus der Abhandlung zur Psychophysik bei Kühner (2014) dar, die noch viele weiterführende Literaturhinweise dazu enthält.

11.3.1.3 Anwendungen im automobilen Bereich

Zwar sind für viele Fragestellungen Reizschwellen und Reizunterschiedsschwellen von Interesse. In der automobilen Anwendung interessieren aber oft psychophy-

Abb. 11.16 Exemplarischer Verlauf bei einem Simple-Staircase-Verfahren (aus Kühner 2014)



sische Funktionen der Art von Gl. 11.1. Im einfachsten Fall geht es um die Zustimmung zu bzw. Ablehnung von bestimmten Ausführungsformen, in anderen Fällen um den Vergleich, ob eine bestimmte Variante als besser/schlechter als eine andere Variante empfunden wird. Häufig wird aber eine direkte Aussage über das Ausmaß einer Bewertung eines Objektes verlangt. Wie auch in ▶ Kap. 12 und auch in ▶ Abschn. 11.3.2.1 ausgeführt, ist mit der Art der Datenerhebung bzw. der Fragestellung das sog. *Skalenniveau* der jeweiligen Aussage verbunden. ◘ Abb. 11.17 zeigt eine Gegenüberstellung dieser verschiedenen Skalenniveaus.

Viele Daten werden auf *Nominalskalenniveau* erhoben, wobei entweder Eigenschaften der Versuchspersonen (beispielsweise Geschlecht, Alter, Fahrerfahrung u. ä.) eindeutig Kategorien zugeordnet werden oder die Versuchsperson selbst dazu aufgefordert wird, ihr Empfinden einer vorher definierten Kategorie zuzuordnen. Es ist dann möglich, in jeder dieser Kategorien die absolute Häufigkeit und bei genügend große Anzahl von Probanden auch die relative Häufigkeit[10] darzustellen. Das Ergebnis wird häufig in Form von Histogrammen, sog. Tortendiagrammen oder Spinnendiagrammen dargestellt. In Abhängigkeit von der Fragestellung muss man unter Umständen mit statistischen Methoden überprüfen, ob die Unterschiede zwischen den einzelnen Kategorien signifikant sind oder gegebenenfalls auch Gleichheit angenommen werden kann (▶ Kap. 12: χ^2-Test, ◘ Tab. 12.5). In manchen Fällen ist es von Interesse, die Verteilung der Häufigkeiten in den einzelnen Kategorien durch einen einzigen Wert, nämlich durch die Kategorie, die am häufigsten vorkommt, zu charakterisieren. Dieser Wert wird *Modalwert* genannt.

Besteht der Versuch darin, verschiedene Eindrücke bzw. Objekte oder Ausführungsformen miteinander zu vergleichen (im Sinne von besser/schlechter; mehr/weniger), so können die entsprechenden bewerteten Objekte in eine Rangreihe gebracht werden. Werden solche Rangreihen von unterschiedlichen Probanden erstellt, so unterscheiden sich diese im Allgemeinen. Es gibt verschiedene statistische Verfahren, daraus eine mittlere Rangreihe zu bilden. Die auf der Basis von paarweisen Vergleichen gewonnenen Daten entsprechen dem Niveau der *Oridinalskala*. Auch hier ist es oftmals von Interesse, durch nur eine Angabe das Ergebnis zu charakterisieren. Man macht dies durch die Angabe des so genannten 50. Perzentils. Das ist die Eigenschaft, bezüglich derer 50 % der Probanden ein geringeres/schlechteres und somit 50 % der Probanden ein größeres/besseres Empfinden zeigen. Dieser Wert wird auch *Median* genannt. Oft ist aber der Paarvergleich (z. B. größer/kleiner-Vergleich) Grundlage für die in ▶ Abschn. 11.3.1.2 beschriebene Schwellwertbestimmung. Unterstellt man die Gültigkeit des We-

10 Die relative Häufigkeit bzw. die Angabe in Prozent suggeriert, dass sich diese Aussage auf eine größere Bevölkerungsschicht bezieht. Wie in Kap. 12 dargestellt, setzt eine solche Verallgemeinerung eine repräsentative Stichprobe oder bei einer Zufallsstichprobe zumindest eine hinreichend große Probandenzahl voraus. In den meisten praktischen Fällen ist dies jedoch eigentlich nicht gegeben (selbst bei Versuchspersonenzahlen im Bereich zwischen 30 und 50!).

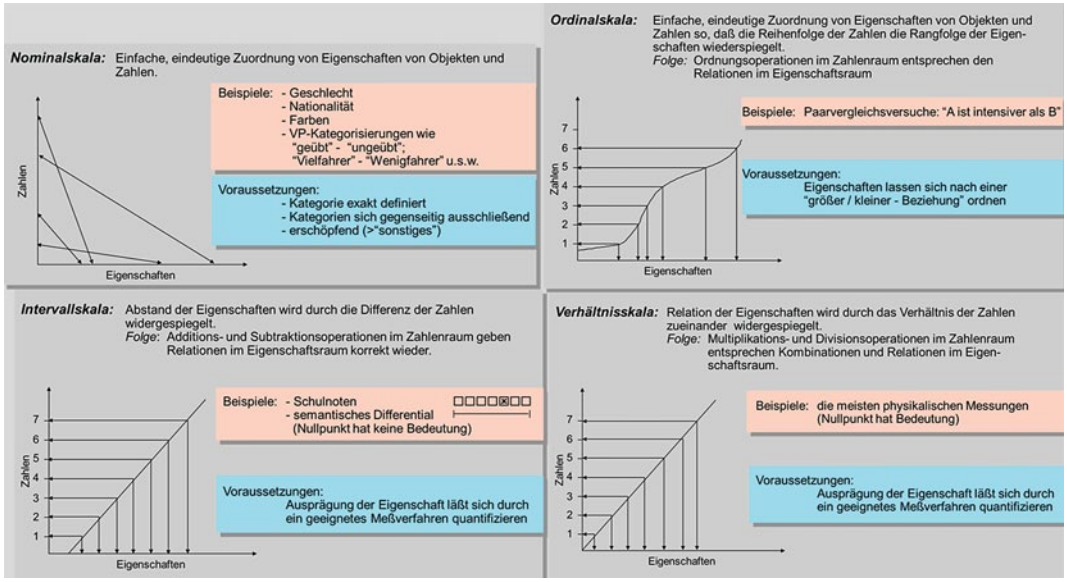


Abb. 11.17 Skalenniveau in Abhängigkeit von der Fragestellung, welche die Qualität der Zuordnung von Eigenschaften (hier im Allgemeinen „Empfindung") und Zahl beschreibt

ber-Fechnerschen Gesetzes, so lässt sich damit ein psycho-physischer Zusammenhang zwischen physikalischem Reiz und Empfindung gemäß Gl. 11.3 bestimmen. Aufgrund der Fragwürdigkeit der Fechnerschen Herleitung und der Erfahrungen von Stevens ist aber zu überlegen, ob dies opportun ist.

In vielen Fällen verlangt man von den Probanden ein quantitatives Urteil über die Qualität einer Empfindung ab. Das geschieht entweder durch die Vorgabe von mit Kästchen versehenen beschreibenden Adjektiven (z. B.: „sehr gut" – „gut" – „mittelmäßig" – „schlecht" – „sehr schlecht") oder durch eine Linie, an deren Enden zwei gegensätzliche Aussagen stehen (siehe hierzu ► Abschn. 11.3.2.3). Der Proband ist nun aufgefordert, sein Urteil abzugeben, indem er eines dieser Kästchen angekreuzt oder quasi analog sein Empfinden durch ein Kreuz auf der Linie charakterisiert. Durch Anlegen eines Maßstabs kann die Position des Kreuzes in einen Zahlenwert überführt werden. Dieser Maßstab unterstellt, dass die Abstände zwischen Empfindungen im unteren Bereich genauso eingetragen werden wie im oberen Bereich. Da die Gleichabständigkeit der Zahlen die Gleichabständigkeit der Empfindungen wiedergibt, wird diese Skala *Intervallskala* genannt. Da man Zweifel hegen kann, ob der mental imaginierte Abstand beispielsweise zwischen „sehr gut" und „gut" der gleiche ist wie zwischen „mittelmäßig" und „schlecht", wandelt man das semantische Differenzial häufig in der Form ab, dass man zwischen die gegensätzlichen Aussagen eine entsprechende Anzahl von Kästchen ohne konkrete Benennung eingefügt[11]. In jedem Fall wird unterstellt, dass der Proband in der Lage ist, sein Empfinden korrekt durch die Position dieses Kreuzes darzustellen. Experimente auf der Basis derartiger Angaben der Empfindung auf Intervallskalenniveau ermöglichen prinzipiell einen Zusammenhang zwischen Reiz und Empfindung in einem Koordinatensystem darzustellen[12].

11 Vielen Versuchspersonen fällt es offensichtlich schwer, die Anwendung des semantischen Differenzials richtig zu verstehen. Es ist die Erfahrung vieler Experimentatoren, dass dies durch das Anbieten eindeutiger Positionen deutlich erleichtert wird (aufgrund des Phänomens der „Tendenz zur Mitte" wird zudem empfohlen, möglichst eine geradzahlige Anzahl von Kästchen anzubieten; siehe hierzu Abschn. 11.3.2.3).

12 Prinzipiell kann dieser Zusammenhang auch mehrdimensional sein. Wenn man davon ausgehen muss, dass mehrere Einflussgrößen zu einer Empfindung führen (z. B. ist das beim Temperaturempfinden der Fall, wo die Einflüsse Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftbewegung und Strahlungseinfluss zu einer „gefühlten Temperatur" führen), so erhöht sich der experimentelle Aufwand entsprechend.

Man kann nun einen Zusammenhang im Sinne der Gl. 11.1 gewinnen, wenn man die Punktewolke, die durch die Experimente entsteht, durch eine optimale Funktion annähert. Auch in diesem Fall muss man eine mathematische Grundform annehmen, deren Parameter man dann durch regressionsanalytische Verfahren bestimmt. Im Allgemeinen wird man dabei von möglichst einfachen Grundformen ausgehen (linearer, quadratischer, kubischer Zusammenhang; in vielen Fällen ist es völlig ausreichend, die Gültigkeit der Stevens'schen Potenzfunktion zu unterstellen). Oft ist es sinnvoll, verschiedene mathematische Grundformen auszuprobieren und diejenige als beschreibendes psychophysisches Gesetz anzunehmen, die den größten Regressionskoeffizienten ausweist. Wegen der unterstellten Gleichabständigkeit ist es bei Daten auf Intervallskalenniveau erlaubt, Additionen und Subtraktionen vorzunehmen, die entsprechenden Abständen auf der Empfindungsebene entsprechen. Deshalb stellt das *arithmetische Mittel* ein Maß dar, das die zentrale Tendenz der intervallskalenverteilten Daten beschreibt.

Im Gegensatz zur Intervallskala hat bei der *Verhältnisskala* die Zahl „0" eine Entsprechung auf der Eigenschaft- bzw. Empfindungsseite. Da man im Allgemeinen davon ausgehen kann, dass zumindest bei komplexen Zusammenhängen der Fall „keine Empfindung" nicht vorkommt und damit auch kein weiterer Gewinn verbunden wäre, spielt die Verhältnisskala bei psychophysischen Experimenten kaum eine Rolle.

In vielen praktischen Fällen kann man sich nicht sicher sein, ob die erhobenen Daten tatsächlich auf dem Niveau angesiedelt sind, das durch die Art der Fragestellung unterstellt wird. Man wendet dann für die statistische Analyse häufig Verfahren an, die eigentlich für ein niedrigeres Skalenniveau gedacht sind, und kommt so zu konservativen Aussagen.

Bei allen psychophysischen Experimenten müssen die Probanden immer in irgendeiner Form eine Antwort geben (z. B. „Unterschied vorhanden: ja/nein"). Wegen der großen Streuungen solcher Experimente ist die Anwendung statistischer Methoden unbedingt notwendig, um sich so vor voreiligen Schlussfolgerungen zu schützen (siehe hierzu ▶ Kap. 12). Bei vielen Experimentatoren, die von einem technischen Hintergrund kommen und die es gewohnt sind, dass ein Experiment zu eindeutigen Ergebnissen führt, wird den in ▶ Abschn. 11.2.6 beschriebenen objektiven physiologischen Daten besonderes Vertrauen entgegengebracht. Abgesehen davon, dass auch physiologische Daten im Experiment eine erhebliche Streuung aufweisen, ist darauf hinzuweisen, dass Empfindungen niemals unbesehen physiologischen Daten gleichgesetzt werden dürfen. Empfindungen können letztlich nur durch eine Befragung – in welcher Form auch immer – des Probanden gefunden werden.[13]

11.3.2 Interview

Carmen Aringer

Um Fragen zu formulieren, deren Antworten Zahlen zugeordnet werden und die damit einer statistischen Analyse zugeführt werden können, ist es notwendig zu wissen, was man eigentlich fragen will. In vielen Fällen ist das nicht einfach festzulegen (z. B.: was ist „sportlich"?). Insbesondere im Zusammenhang mit neuen Anwendungsgebieten oder bisher unbekannten technischen Systemen fällt es sehr schwer, im vornherein die möglichen Reaktionen der Nutzer zu erahnen und infolgedessen durch entsprechende Fragen aufzufangen. In diesen Fällen sind sog. Qualitative Erhebungsmethoden eine gute Methode, überhaupt einmal das „Terrain abzustecken". Im Bereich der Automobilergonomie geht es häufig darum, das Wissen, die Einstellungen und Nutzungserfahrungen im Umgang mit technischen Systemen sowie die Bewertung des subjektiv wahrgenommenen Nutzens zu erheben und darüber hinaus die Kenntnis über vorhandene Nutzungsbarrieren zu gewinnen. (Trübswetter und Bengler 2013).

Im Gegensatz zu quantitativen Ansätzen, welche auf bereits bestehenden Theorien aufbauen, eigenen sich qualitative Methoden für die Untersuchung noch wenig beschriebener Gegenstandsbereiche. Sie bieten den Vorteil, tiefe Einblicke in neue Forschungsgebiete zu erlangen und neue Fragestellungen und Hypothesen zu generieren (Flick

13 So kann beispielsweise keineswegs davon ausgegangen werden, dass ein direkter Zusammenhang zwischen den lokalen Druckwerten, die an der Kontaktfläche zwischen Proband und Sitz gemessen werden, und dem empfundenen Diskomfort existiert (Hartung 2006; Mergl 2006).

Abb. 11.18 Ablaufmodell der qualitativen Inhaltsanalyse (In Anlehnung an Mayring 2008, S. 60)

11

et al. 2009). Für die offene bzw. teilstandardisierte qualitative Befragung bieten sich unterschiedliche Methoden an. Zu den in der Praxis am häufigsten eingesetzten Verfahren im Feld der Ergonomie zählen das Leitfaden- und Experteninterview sowie die Gruppendiskussion. Je nach Untersuchungsgegenstand sowie zeitlichen und finanziellen Rahmenbedingungen bietet jede Methode ihre Vor- und Nachteile.

Zur Auswertung des qualitativen Datenmaterials eignet sich die sog. Inhaltsanalyse. Hierbei wird wiederum zwischen der quantitativen und der qualitativen Inhaltsanalyse unterschieden. Während quantitative Analyseverfahren primär die Häufigkeit vorkommender Textelemente zählen, wird mit qualitativen Verfahren der gesamte Text auf Basis eines Kategoriensystems analysiert.

Eine Methode, welche sich wissenschaftlich bewährt hat und häufig Anwendung findet, ist die Inhaltsanalyse nach Mayring (2008). Abbildung 11.18 zeigt das Ablaufmodell der Inhaltsanalyse. Zunächst muss das Ausgangsmaterial der Analyse, also Anzahl und Umfang der Transkripte, festgelegt werden und die Entstehungssituation, beschrieben werden. Im nächsten Schritt werden die konkreten Fragestellungen der Analyse definiert, welche die Richtung der Analyse vorgeben (Mayring 2008, S. 50). Wenn möglich sollen diese auf bereits vorhandene Theorien aufbauen. Im Rahmen eines Ablaufmodells werden sowohl die Analysetechnik als auch die einzelnen Analyseeinheiten bestimmt. Im nächsten Schritt folgt die Erstellung eines Kategoriensystems. Dieses geschieht auf Basis deduktiver, d. h. theoriegeleiteter, oder induktiver, d. h. aus den Transkripten abgeleiteter, Kategorienbildung oder einer Kombination aus beiden. Mayring (2008) unterscheidet drei Vorgehensweisen: Die Zusammenfassung, die Explikation und die Strukturierung. Eine detaillierte Beschreibung dieser Analysetechniken findet sich in Mayring (2008). Sobald das Kategoriensystem feststeht, kann die eigentliche Codierung des Textmaterials durchgeführt werden. Zur Analyse der Ergebnisse in Richtung der Fragestellung empfiehlt sich die Ableitung von Hauptkategorien anhand von Häufigkeitsanalysen. Daraus wird ersichtlich, was die zentralen Erkenntnisse aus der Befragung sind.

Am häufigsten werden aber Studien im Bereich Automobil durch Fragebogenverfahren durchgeführt bzw. ergänzt. So werden Probanden über den NASA-TLX zur subjektiv empfundenen Beanspruchung nach einem Versuch befragt, das Komfortempfinden bei Autositzen wird erhoben oder Fahrer werden bezüglich ihrer Einstellung oder Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen befragt. Auch wenn man in vielen Fällen auf standardisierte Fragebögen/Tests wie den NASA-TLX zurückgreifen kann, ist man für eine spezielle Thematik oft gezwungen, einen eigenen Fragebogen zu konstruieren, beispielsweise wenn man die Einstellung von Probanden bezüglich eines konkreten Sachverhalts erfassen möchte oder wenn man eine Experten-Studie wie die Gruppendiskussion oder das Interview durch einen Fragebogen ergänzt.

Prinzipiell können Fragebögen unterschiedliche Aspekte erfassen. In der Psychologie werden sie häufig als Test-Instrumente eingesetzt und erfassen beispielsweise summarisch über einen Punktwert die Ausprägung von Persönlichkeitsmerkmalen (z. B. Ängstlichkeit etc.; vgl. Bortz und Döring 2006, S. 253) oder die Leistung einer Person. Im Folgenden wird schwerpunktmäßig die Erstellung von Fragebögen behandelt, die Verhaltensweisen oder Einstellungen von Personen erfassen. Die Konstruktion solcher Fragebögen unterliegt prinzipiell den gleichen Gütekriterien (Objektivität, Reliabilität, Validität) wie ein (Persönlichkeits-)Test, allerdings werden an Tests strengere Anforderungen gestellt, weshalb für die Testkonstruktion auf weiterführende Literatur verwiesen wird (u. a. Bühner 2011).

Im Folgenden liegt der Schwerpunkt auf einer überblicksartigen Darstellung der Konstruktion *standardisierter* Fragebögen im Rahmen einer Befragung, d. h. die Abfolge der Fragen und die möglichen Antwortmöglichkeiten sind überwiegend vorgegeben. Diese Fragebögen können mündlich (durch die Versuchsleitung) oder schriftlich (Probanden füllen den Bogen selbst aus) eingesetzt werden. Es ist darauf zu achten, dass bei schriftlichen Befragungen der Fragebogen selbsterklärend und ohne weitere Instruktionen zu bearbeiten ist und dass im Rahmen einer mündlichen Befragung die verwendeten Instruktionen und Formulierungen der Interviewer identisch sind. Scholl (2009, S. 78) nennt als konkrete Beispiele, dass Interviewer Text und Fragen nicht variieren dürfen, sich die Interviewer bei Nachfragen an vorgegebene Regeln halten und der Interviewstil neutral (weder zu autoritär noch zu persönlich) sein sollte. Die Verhaltensweisen sollten vorab mit den Interviewern durchgesprochen oder geschult werden, zudem können Hinweise für die Interviewer im Fragebogen ergänzt werden (hierzu Porst 2008, S. 145 ff.). Ob eine mündliche (mit Interviewer) oder schriftliche Befragung (Probanden füllen den Bogen selbstständig aus) eingesetzt wird, orientiert sich an der konkreten Fragestellung. Geht man davon aus, dass Probanden Zeit brauchen, um sich ein Urteil über den Sachverhalt zu bilden oder Antworten ohne Interviewer ehrlicher beantworten, kann eine schriftliche Befragung sinnvoller sein. Für komplexe Sachverhalte, die möglicherweise Nachfragen beinhalten, bietet sich eine Befragung mit Interviewer an (für einen Überblick der Vor- und Nachteile siehe Scholl 2009, S. 60).

11.3.2.1 Methodisches Vorgehen

Vom theoretischen Konstrukt zu den Fragen

Der Konstruktion eines Fragebogens liegen eine theoretische Fragestellung und Hypothesen zugrunde, die mit Hilfe des Fragebogens beantwortet werden. Soll mit dem Fragebogen z. B. erfasst werden, wie die Nutzer die Usability (Bedienbarkeit) eines neuen Instruments im Vergleich zum Vorgängermodell beurteilen und besteht die Hypothese, dass das neue Modell besser abschneidet, so muss der Begriff der Bedienbarkeit genauer dargestellt werden, um die passenden Fragen zur Überprüfung der Hypothese zu stellen. Diesen Prozess der Übersetzung theoretischer Fragestellungen in einen Fragebogen bzw. ein empirisches Instrument nennt man Operationalisierung (vgl. Scholl 2009, S. 144). Einen ersten Schritt kann die Recherche bereits bestehender Fragebogenkonzepte zu einer Fragestellung darstellen, wobei darauf zu achten ist, dass besonders die Ergebnisse der Güteeigenschaften (Reliabilität, Objektivität und Validität) nicht ungeprüft auf die eigene Untersuchung übertragen werden und eine Anpassung an die Zielgruppe – beispielsweise bezüglich der Formulierungen vorgenommen wird (vgl. Bortz und Döring 2006, S. 253). Die Recherche von Literatur und Definitionen kann in dieser Phase Aufschluss darüber geben, ob der Begriff der Usability möglicherweise mehrere Dimensionen, wie

z. B. die intuitive Bedienung des Systems oder die angemessene Rückmeldung an den Nutzer aufweist, die es zu erfassen gilt. Weitere Ideen für eine Annäherung an ein Thema können qualitative Verfahren wie Interviews mit Experten oder Probanden liefern (vgl. Raab-Steiner und Benesch 2012, S. 48). Für die konkrete Sammlung von Fragestellungen bietet sich ein Brainstorming im Team an (vgl. hierzu Bortz und Döring 2006, S. 253 f.). Nach der Eingrenzung der Fragen auf thematische Aspekte folgt die Festlegung des Aufgaben- und Antwortformats.

Frageinhalte und Antwortformate

Die Fragen eines Fragebogens werden an dieser Stelle im Hinblick auf Inhalt und Form unterschieden (vgl. Porst 2008, S. 51). Bezüglich des Inhalts wird an dieser Stelle lediglich eine Auswahl präsentiert, da die Inhaltsform im Allgemeinen frei wählbar ist (ebd.). Trotzdem ist es sinnvoll, sich im Hinblick auf die Interpretation der Daten zu überlegen, welches inhaltliche Format einer Frage zugrunde liegt, eine Auswahl wird im Folgenden vorgestellt (vgl. hierzu und für weitergehende Ausführungen Scholl 2009, S. 147 ff.):

- ***Faktfragen*** (beziehen sich auf feststehende, konstante Sachverhalte)
  Beispiel: „Besitzen Sie ein Auto?“ bzw. alle demographischen Fragen (Alter, Beruf etc.)
- ***Wissensfragen*** (das Wissen der Befragten wird ermittelt)
  „Welche Assistenzsysteme gibt es auf dem Markt?“
- ***Bewertungsfragen***(es wird eine subjektive Bewertung über einen Sachverhalte abgegeben)
  „Wie gefällt Ihnen das neue System?“
- ***Verhaltensfragen*** (beziehen sich beispielsweise auf gegenwärtiges oder vergangenes Verhalten)
  „Wie häufig haben Sie in den letzten zwei Wochen den Spurwechselassistent genutzt?“
- ***Absichtsfragen*** (beziehen sich auf zukünftiges Verhalten)
  „Könnten Sie sich vorstellen, dieses System in Zukunft häufiger zu nutzen?“

Neben der Inhaltsform können Fragen auch bezüglich des Antwortformats unterschieden werden. Man unterscheidet prinzipiell zwischen offenen und geschlossenen Fragen, zusätzlich werden von manchen Autoren auch halboffene Fragen bzw. Mischformen genannt (beispielsweise Porst 2008, S. 55 oder Raab-Steiner und Benesch 2012, S. 51).

11.3.2.2 Offene Fragen

Bei offenen Fragen werden keine definierten Auswahlmöglichkeiten vorgegeben. Befragte haben die Möglichkeit frei auf eine Frage zu antworten. In einer schriftlichen Befragung wird dies durch Linien signalisiert, in einer mündlichen Befragung muss sichergestellt werden, dass der Interviewer die Antwort möglichst umfassend und korrekt mitschreibt (vgl. Porst 2008, S. 54 f.). Die Antwort muss im Gegensatz zur geschlossenen Frage im Nachhinein kategorisiert werden, wozu sich Verfahren wie die Inhaltsanalyse (vgl. ◘ Abb. 11.18) anbieten. Dies bedeutet einen höheren Aufwand bei der Auswertung. Bortz und Döring (2006, S. 254) weisen zudem darauf hin, dass Befragte aus Angst vor Rechtschreibfehlern häufig nur kurze und unvollständige Sätze in die vorgesehenen Felder schreiben. Offene Antworten eignen sich insbesondere dann, wenn es keine überschaubare Anzahl an Antwortmöglichkeiten gibt bzw. das Themenfeld noch relativ unbekannt ist und wenn eine Zielgruppe befragt wird, die sich zu der Thematik ausdrücken kann und will (beispielsweise Experten) (vgl. Scholl 2009, S. 162). Zudem können offene Fragen bei längeren Fragebögen der Aufrechterhaltung der Motivation dienen und vermeiden, dass Befragte durch Antwortkategorien in eine vorgegebene Richtung gelenkt werden (vgl. Porst 2008, S. 64). Ein Beispiel für eine offene Frage könnte lauten:

» *Bitte formulieren Sie hier Ihre konkreten Ideen für eine Optimierung des Sitzes!*

11.3.2.3 Geschlossene Fragen

Geschlossene Fragen werden in der Fragebogenkonstruktion aufgrund der relativ einfachen Auswertungsmöglichkeiten häufig eingesetzt. Dabei wird den Befragten eine begrenzte Anzahl an Möglichkeiten vorgegeben, in deren Rahmen sich die Antwort bewegen kann. Dabei wird zwischen Antworten mit einer oder mehreren Auswahlmöglichkeiten (Mehrfachantworten) unterschieden. Die

In der folgenden Auswahl sind derzeit auf dem Markt verfügbare Assistenzsysteme aufgeführt.
Bitte kreuzen Sie alle Assistenzsysteme an, die Sie kennen (wenn auch nur vom Hörensagen).
o Antiblockiersystem (ABS)
o Einparkhilfe
o Spurwechselassistent
o Tempomat

Abb. 11.19 Beispiel für eine geschlossene Frage mit mehreren Antwortmöglichkeiten

Antwortmöglichkeiten zu geschlossenen Fragen, besonders bei Inhaltskategorien, müssen erschöpfend sein, d. h. der Befragte muss sich in den Antworten wiederfinden können. Würde die Häufigkeit der Auto-Nutzung beispielsweise mit den folgenden Kategorien erhoben werden: „täglich", „2–3 mal wöchentlich" und „weniger als 2 mal wöchentlich" hätten diejenigen Probanden Schwierigkeiten sich zuzuordnen, die zwar nicht täglich fahren, aber zumindest häufiger als 3 mal wöchentlich. Geschlossene Fragen bieten sich prinzipiell eher dann an, wenn es eine begrenzte und zugängliche Auswahl an Möglichkeiten gibt und das Thema mehr oder weniger bekannt ist (vgl. Porst 2008, S. 63 f.). In Abb. 11.19 ist ein Beispiel für eine geschlossene Frage mit mehreren Antwortmöglichkeiten wiedergegeben (die angeführten Assistenzsysteme dienen nur als Beispiel).

Neben den beiden Antwortformaten offen und geschlossen existieren auch *halboffene Fragen* bzw. *Mischformen*. Diese weisen wie das Beispiel der Abb. 11.19 Antwortkategorien auf, enthalten allerdings zusätzlich noch eine offene Kategorie. Das obige Beispiel könnte in einem solchen Fall um die Antwortmöglichkeit „Weitere, und zwar:_____" ergänzt werden. In dieser Kategorie können Befragte antworten, die sich keiner vorgegebenen Kategorien zuordnen konnten oder weitere Aspekte ergänzen wollen. Porst (2008, S. 57) empfiehlt diese Antwortmöglichkeit zum einen, wenn die möglichen Antworten auf eine Frage zwar grob abgeschätzt, aber nicht komplett aufgezeigt werden können. Zum anderen erlaubt diese Frageform den Befragten, sich bei unklaren Zuordnungen durch eine eigene Darstellung zu positionieren, was sich positiv auf die Motivation auswirkt. Diese Antworten müssen wiederum extra codiert und ausgewertet werden.

Wird ein geschlossenes Antwortformat eingesetzt, so stellt sich in einem nächsten Schritt die Frage, wie die Auswahlmöglichkeiten dargestellt werden. Im Rahmen einer statistischen Analyse geschlossener Fragen entsteht aus einer Frage im Fragebogen eine Variable (beispielsweise Nutzungsverhalten), die durch die Antwortmöglichkeiten festgelegte Ausprägungen (1 = sehr häufig, 2 = häufig oder 1 = männlich; 2 = weiblich) einnehmen kann (vgl. Scholl 2009, S. 164). „Wird die Antwort eines Befragten als Ausprägung einer Variablen gemessen, bezeichnet man die Antwortvorgaben als Skala." (ebd.)

Skalenniveaus

Variablen lassen sich hinsichtlich ihres Skalenniveaus unterscheiden, wie bereits in ▶ Abschn. 11.3.1.3 dargelegt und deshalb hier verkürzt dargestellt wird. Das Skalen- bzw. Datenniveau muss bei der statistischen Auswertung berücksichtigt werden, da nicht alle Berechnungen mit jedem Niveau möglich sind. Es werden die folgenden Arten unterschieden: **Nominalskalierte Variablen** werden genutzt, um Kategorien im Hinblick auf Gleichheit und Ungleichheit zu bilden, in der Regel wird das Geschlecht (männlich, weiblich) auf diese Weise erhoben. Auch das Beispiel mit den Assistenzsystemen liefert nominalskalierte Daten. Durch die Verwendung von **ordinalskalierten Variablen** können Reihenfolgen gebildet werden, beispielsweise der höchste erworbene Schulabschluss (1 = Hauptschule, 2 = …). **Intervallskalierte Variablen** erlauben weitergehende Berechnungen (beispielsweise Mittelwertbildung, Standardabweichung, Faktorenanalyse), da die Abstände zwischen den Ausprägungen gleich groß sind. Des Weiteren erlauben **verhältnisskalierte Variablen** die Bildung von Verhältnissen, wie sie bei Länge und Gewicht auftreten.

Abb. 11.20 Beispiel für eine numerische, unipolare Skala mit verbalisierten Endpunkten

Anzahl der möglichen Antworten

Gibt es zu einer Frage lediglich zwei Antwortmöglichkeiten (ja/nein, richtig/falsch …) spricht man von einem dichotomen Antwortformat. Durch das eindeutige Antwortmuster können diese Fragen schnell ausgewertet werden, allerdings sind sie in ihrer Nützlichkeit für weitere Berechnungen durch die geringe Varianz der Antworten begrenzt (vgl. Raab-Steiner und Benesch 2012, S. 55), sie müssen deshalb gezielt eingesetzt werden. Dichotome Antworten eignen sich beispielsweise als Filterfragen („Besitzen Sie ein Auto?" – Wenn Sie mit „Ja" geantwortet haben, bitte weiter mit Frage 6) oder es können mehrere dichotome Fragen zu einem Index zusammengefasst werden (vgl. Scholl 2009, S. 168). In den meisten Fragebögen werden Skalen mit mehr als zwei Antwortmöglichkeiten eingesetzt (beispielsweise Ratingskalen). „Diese Mehrstufigkeit der Skalen entspricht zum einen dem Bedürfnis befragter Personen nach differenzierter Darstellung ihrer Position, zum anderen dann aber auch dem Bedürfnis der Auswerter nach möglichst breiter Variation möglicher Auswertungsverfahren." (Porst 2008, S. 75).

Ratingskalen

Erfasst man im Rahmen einer Befragung Meinungen, Einstellungen, Präferenzen, Verhaltensweisen etc., so werden häufig Ratingskalen eingesetzt (vgl. Scholl 2009, S. 167). „Ratingskalen geben (durch Zahlen, verbale Beschreibungen, Beispiele o.Ä.) markierte Abschnitte eines Merkmalkontinuums vor, die die Urteilenden als gleich groß bewerten sollen […]." (Bortz und Döring 2006, S. 177). Werden keine konkreten Skalenstufen angeboten und die Antwort kann frei an einer beliebigen Stelle auf einem Kontinuum abgegeben werden, so spricht man von einer Analogskala (vgl. Raab-Steiner und Benesch 2012, S. 59).

Unipolare und bipolare Ratingskalen

Der Aufbau solcher Skalen kann *unipolar* oder *bipolar* sein. Unipolare Skalen verlaufen von einem Nullpunkt aus in eine Richtung (beispielsweise von „nie" bis „häufig", Abb. 11.20), während bipolare Skalen durch jeweilige Gegensätze an den Skalenenden gekennzeichnet sind (beispielsweise „lehne ich voll und ganz ab" bis „stimme ich voll und ganz zu"; Abb. 11.21) und der Nullpunkt entweder fiktiv (bei einer geraden Anzahl an Skalenabstufungen) oder tatsächlich (bei einer ungeraden Anzahl an Skalenabstufungen) in der Mitte der Skala liegt (vgl. Raab-Steiner und Benesch 2012, S. 56 f.; Porst 2008, S. 90). „Fällt es schwer, zu einem Begriff einen passenden Gegenbegriff zu finden, verwendet man statt *bipolarer* Skalen *unipolare* Ratingskalen. Dier gilt vor allem für Merkmale mit natürlichem Nullpunkt, wie z. B. dem Ausmaß der Belästigung durch Lärm." (Bortz und Döring 2006, S. 177).

Bezeichnung der Skalenpunkte

Werden Ratingskalen eingesetzt, so besteht ein konkreter Bezug zum Skalenniveau, es wird nämlich davon ausgegangen, dass Ratingskalen und die Urteile der Befragten als intervallskaliert aufzufassen sind (ebd. und für die Diskussion um messtheoretische Probleme S. 181). Die Bezeichnung der unterschiedlichen Stufen ist auf verschiedene Weise möglich. Eine *numerische Kennzeichnung* unterteilt die Skala in gleich große Abstände, die jeweils mit einer Ziffer gekennzeichnet sind. Die Handhabung muss einleitend erklärt werden. Im Folgenden ist eine mögliche Ausgestaltung für eine unipolare und eine bipolare Skala mit verbalen Endpunkten aufgezeigt. Bortz und Döring (2006, S. 177) und Rohrmann (1978, S. 223) erwähnen, dass numerische Skalen abstrakt sind, weshalb bei einem Einsatz darauf geachtet werden sollte, dass die Zielgruppe mit diesem Format umgehen kann.

Bei einer *verbalen Kennzeichnung* wird jede Stufe der Skala wie im Beispiel der Abb. 11.22 mit einem Ausdruck versehen. „[Dies] hat den Vorteil, dass die Interpretation der Skalenpunkte intersubjektiv einheitlicher erfolgt […]" (Moosbrugger und Kelava 2007, S. 52). Dabei ist darauf zu achten, dass die verbalen Abstände auch von den Befragten als gleich groß angesehen werden und nicht willkürlich vergeben werden (der Abstand zwischen „selten" und „gelegentlich" sollte als genauso groß wahrgenommen werden wie der zwischen „oft" und „sehr oft").

Rohrmann (1978) liefert in seiner Forschungsarbeit Anhaltspunkte für eine äquidistante Formu-

Abb. 11.21 Beispiel für eine numerische, bipolare Skala mit verbalisierten Endpunkten

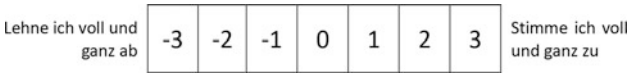
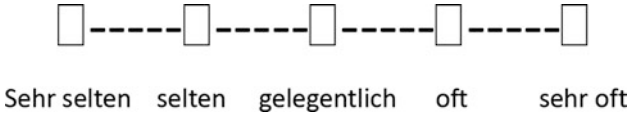


Abb. 11.22 Beispiel für verbale Skalenpunkte



lierung fünfstufiger Skalen mit unterschiedlichen Verwendungsmöglichkeiten:

- **Häufigkeit**(„Wie häufig fahren Sie Auto?"): „nie – selten – gelegentlich – oft – immer", wobei je nach Fragestellung „nie" durch „sehr selten" und „immer" durch „sehr oft" ersetzt werden kann (was sich für dieses Beispiel anbietet, da kein Befragter „immer" Auto fährt, siehe auch Abb. 11.22 bzw. Abb. 11.23).
- **Intensität**(„Sind Sie mit dem neuen System zufrieden?"): „gar nicht – wenig – mittelmäßig – überwiegend – völlig"
- **Wahrscheinlichkeit** („Werden Sie sich in den nächsten zwei Jahren ein neues Auto anschaffen?"): „keinesfalls – wahrscheinlich nicht – vielleicht – ziemlich wahrscheinlich – ganz sicher"
- **Bewertung von Aussagen** („Ich fahre gerne schnell!"): „trifft gar nicht zu – trifft wenig zu – trifft teils, teils zu – trifft ziemlich zu – trifft völlig zu"

Neben der numerischen und verbalen Kennzeichnung können Ratingskalen auch symbolisch (beispielsweise durch Plus/Minus oder Smileys) dargestellt werden (vgl. hierzu Bortz und Döring 2006, S. 177). Eine weitere Möglichkeit der Skalenbezeichnung stellt die Skalenverankerung durch Beispiele an bestimmten, ausgewählten Positionen der Skala dar (ebd. S. 180). Skalenbezeichnungen können auch miteinander kombiniert werden, sodass neben einer verbalen Bezeichnung auch eine numerische Bezeichnung dargestellt wird, diese Variante nennt Bühner (2011, S. 116), um Befragten die Bearbeitung zu erleichtern. Die Bezeichnungen sollten sich in einem solchen Fall logisch entsprechen und den Befragten die Interpretation einer Skala erleichtern. Eine fünfstufige Skala mit den beiden Endpunkten

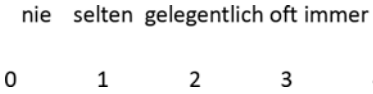


Abb. 11.23 Beispiel für eine verbal-numerische Skala

„nie" und „immer" sollte beispielsweise nicht mit Ziffern von −2 (nie) bis +2 (immer) sondern besser von 0 (nie) bis 4 (immer) bezeichnet werden (vgl. hierfür und für optische Skalenbezeichnungen: Moosbrugger und Kelava 2007, S. 53).

Stufenanzahl

Die Stufenanzahl von Ratingskalen kann gerade oder ungerade gewählt werden. Dies hat zur Folge, dass entweder eine Mittelkategorie existiert oder die Probanden eine Antwort in eine Richtung der Skala abgeben müssen. Unter Umständen werden sie bei einer Skala mit einer geraden Stufenanzahl zu einer Tendenz „gezwungen", die sie möglicherweise gar nicht vertreten. Andererseits wird als Argument gegen eine Mittelkategorie angeführt, dass diese Kategorie nicht nur bei einer ausgeglichenen Meinung zu einem Sachverhalt angekreuzt wird, sondern auch, wenn sich die Befragten in ihrer Antwort unsicher sind und aus diesem Grund auf die Mitte der Skala ausweichen (vgl. Scholl 2009, S. 168). Die erwähnten Aspekte dürften allerdings bei einer Skala mit mehr Stufen (beispielsweise sechs oder sieben) weniger ins Gewicht fallen (vgl. ebd.). Bortz und Döring (2006, S. 180) empfehlen, keine neutrale Mittelkategorie anzubieten, wenn man mit einer „Tendenz zur Mitte" der Befragten rechnet (s. für weitere Urteilsfehler S. 183 ff.). Moosbrugger und Kelava (2007, S. 54) konstatieren, dass die Argumente insgesamt eher gegen die Verwendung einer Mittelkategorie sprechen. Eine daran anschließende Überlegung betrifft die zusätzliche Kategorie „weiß ich nicht". Diese Kategorie sollte insbesondere dann aufgenommen werden, wenn ein Teil der Befragten

Abb. 11.24 Beispiel für eine Analogskala (es könnten beispielsweise auch prozentuale Angaben verwendet werden)

wahrscheinlich keine Einschätzung zu einem Sachverhalt abgeben kann (ebd.).

Neben der Entscheidung für eine gerade oder ungerade Stufenanzahl ist die Entscheidung über die Anzahl der Stufen an sich zu treffen. „Hier ist […] eine Güterabwägung zu treffen zwischen Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Je mehr Stufen vorgegeben werden, desto genauer ist die Skala, allerdings wird die Wahl einer bestimmten Stufe unzuverlässiger und zufälliger, weil der Befragte zu viele Auswahlmöglichkeiten hat." (Scholl 2009, S. 167). Porst (2008, S. 92) empfiehlt die Verwendung fünf bis siebenstufiger Antwortformate, da ab einem bestimmten Punkt die Befragten ihre Einschätzung nur noch wenig differenzieren können. Bei Skalen mit sehr vielen Punkten (beispielsweise 100) zeigt sich, dass die Befragten überwiegend Dezimalzahlen oder durch fünf teilbare Zahlen auswählen (vgl. Bortz und Döring 2006, S. 180). Bei der CP 50 Skala zur Erfassung von Diskomfort (50 Skalenpunkte) erfolgt die Einschätzung deshalb in zwei Schritten: In einem ersten Schritt werden die Probanden gebeten, grob (anhand von 5 Stufen) den empfundenen Diskomfort einzuschätzen, in einem zweiten Schritt ordnen sie sich innerhalb dieser Stufe einer konkreten Zahl von 1 bis 10 zu.

Analogskalen

Werden Analogskalen eingesetzt, so kann das Urteil der Probanden frei auf einem Kontinuum eingeschätzt und sehr genau ausgewertet werden (Abb. 11.24). Moosbrugger und Kelava (2007, S. 51) äußern, dass die Verwendung von Analogskalen aufgrund computerbasierter Auswertungsmöglichkeiten zunimmt, aber insgesamt gesehen noch immer selten eingesetzt werden, da die „Differenziertheit der Messung in der Regel nicht der Differenziertheit des Urteils entspricht" (ebd.). Die anschließende Auswertung der auf diese Weise gewonnenen Urteile erfolgt über eine Kategorisierung. Die Anzahl der zu bildenden Kategorien kann beispielsweise über die Sturges-Regel berechnet werden.

Neben diesen vorgestellten Ratingskalen gibt es noch eine Reihe an weiteren Möglichkeiten und Formen, für die allerdings auf die weiterführende Fachliteratur verwiesen wird (beispielsweise Bortz und Döring 2006).

11.3.2.4 Fragenformulierung

Bei der Formulierung einer Frage steht zu Beginn die Überlegung, ob sich für den Sachverhalt eine Frage („Sind Sie der Meinung, dass der Kauf von Elektroautos vom Gesetzgeber finanziell gefördert werden soll?") oder ein Statement („Der Kauf von Elektroautos sollte vom Gesetzgeber finanziell gefördert werden!") anbietet. Um Einstellungen und Positionen zu erfassen, eignen sich eher Statements, um konkrete Sachverhalte zu erfassen die Frageform (vgl. Bortz und Döring 2006, S. 254).

In Fragebögen sollten Begriffe mit *unklarer Bedeutung* vermieden werden (vgl. für die folgenden Aspekte Bühner 2011, S. 136 ff.). Die Aussage „Ich fahre gerne sportlich" könnte von Befragten sowohl positiv im Sinne von „gut, beherrscht, dynamisch" als auch in Richtung „zu schnell, unvorsichtig" interpretiert werden und ist somit unklar. *Verwendete Begriffe* (beispielsweise Head-Up-Display) müssen bei den Befragten bekannt sein und sich an der Zielgruppe (Kunden, Ingenieure, Mitarbeiter) ausrichten, dies kann durch einen Pretest im Vorfeld erhoben werden. In jeder Frage soll nur ***ein*** inhaltlicher Aspekt abgebildet sein. Die Aussage „Ich konnte das System gut einschätzen und kontrollieren" verweist auf zwei Aspekte, die Einschätzung und die Kontrolle, und sollte deshalb durch zwei Fragen ersetzt werden. *Doppelte Verneinungen* sind zu vermeiden, da sie die Verständlichkeit reduzieren, beispielsweise „Ich hatte nie das Gefühl, das System nicht kontrollieren zu können". Wird auf eine *Zeitspanne* Bezug genommen, sollte diese so konkret wie möglich sein. Die Frage: „Haben Sie in letzter Zeit Ihren Bremsspurassistenten genutzt" ist nicht eindeutig bezüglich „letzter Zeit". Besser wäre es hier beispielsweisekonkret nach den letzten zwei Wochen zu fragen. Auch *Verallgemeinerungen* wie „immer", „alle", „niemals" sollten aufgrund ihrer Pauschalität vermieden werden.

Porst (2000) empfiehlt in seinen „10 Gebote der Fragenformulierung“ folgende Aspekte, die an dieser Stelle abschließend aufgeführt werden:

1. *Du sollst einfache, unzweideutige Begriffe verwenden, die von allen Befragten in gleicher Weise verstanden werden!*
2. *Du sollst lange und komplexe Fragen vermeiden!*
3. *Du sollst hypothetische Fragen vermeiden!*
4. *Du sollst doppelte Stimuli und Verneinungen vermeiden!*
5. *Du sollst Unterstellungen und suggestive Fragen vermeiden!*
6. *Du sollst Fragen vermeiden, die auf Informationen abzielen, über die viele Befragte mutmaßlich nicht verfügen!*
7. *Du sollst Fragen mit eindeutigem zeitlichem Bezug verwenden!*
8. *Du sollst Antwortkategorien verwenden, die erschöpfend und disjunkt (überschneidungsfrei) sind!*
9. *Du sollst sicherstellen, dass der Kontext einer Frage sich nicht auf deren Beantwortung auswirkt!*
10. *Du sollst unklare Begriffe definieren!*

11.3.2.5 Gestaltung des Fragebogens

Die Ausgestaltung des Fragebogens muss sich insbesondere im Hinblick auf Komplexität und Formulierung an der Zielgruppe (Alter, Bildungsgrad, Vorwissen etc.) orientieren. Bei schriftlichen Befragungen sind zu Beginn eine kurze, einleitende Beschreibung des Forschungsvorhabens und der Verweis auf die Anonymität der Befragung üblich. Weiterhin können Hinweise zur Handhabung von Skalen aufgeführt werden. Werden im Rahmen der Befragung Interviewer eingesetzt, so enthält der Fragebogen für alle Interviewer geltende Hinweise, bei einer schriftlichen Befragung müssen die Instruktionen für die Befragten klar formuliert sein (beispielsweise ob ein oder mehrere Kreuze möglich sind). Die optische Gestaltung des Fragebogens sollte übersichtlich sein (Fragen klar voneinander trennen, keine Seitenumbrüche in einer Frage, bei längeren Fragebatterien jede zweite Zeile schattieren um ein Verrutschen in der Zeile zu vermeiden, angemessene Schriftgröße, genügend Platz bei offenen Fragen, etc.; vgl. hierzu Scholl 2009, S. 176 ff).

Bei der Festlegung der Reihenfolge der Fragen sollte darauf geachtet werden, dass am Anfang des Bogens leicht zu beantwortende Fragen stehen. Dies gilt bei längeren Fragebögen auch für das Ende, weshalb hier häufig die demographischen Fragen (wenn sie für den Verlauf der Befragung benötigt werden, dann stehen sie auch am Anfang des Bogens) erhoben werden (ebd. S. 175). Bei längeren Fragebögen sollten zur Strukturierung thematische Blöcke gebildet werden, sodass sich die Befragten auf ein Themengebiet konzentrieren können und nicht gedanklich springen müssen (Bsp. Nutzungsverhalten, Gefallen etc.) (vgl. hierzu auch Porst 2008, S. 142 f.), zudem sollte die Reihenfolge der Fragen möglichst so gewählt werden, dass sich diese nicht gegenseitig beeinflussen (vgl. Scholl 2009, S. 175). Gibt man Probanden in Frage 2 beispielsweise eine Auswahl an Assistenzsystemen und in Frage 10 sollen sie angeben, welche Assistenzsysteme sie kennen, so dürfte Frage 10 von Frage 2 beeinflusst sein.

„Antwortmuster sollten so oft, wie es praktikabel ist, variiert werden, um Ermüdungseffekte zu vermeiden, aber nicht zu oft, um den Befragten nicht zu verwirren.“ (ebd. S. 177). So sollten längere „Fragebatterien“ von Ratingskalen mit anderen Formaten dosiert abgewechselt werden (offene Frage, nominalskalierte Auswahlfrage), um Ermüdungserscheinungen zu vermeiden. Zudem können bei Fragebatterien Items vereinzelt umgepolt werden und anstatt positiv negativ formuliert werden, um die Aufmerksamkeit zu erhalten. Es wird dringend empfohlen, vor dem Einsatz eines Fragebogens, diesen an einer kleinen Stichprobe im Rahmen eines „Pretests“, beispielsweise mit der Methode des „lauten Denkens“ zu testen (vgl. Raab-Steiner und Benesch 2012, S. 61) und im Anschluss nochmals zu überarbeiten.

11.3.3 Standardisierte Fragebögen

N. Trübswetter, unter Mitarbeit von A. Conti und M. Zimmermann

11.3.3.1 Workload (NASA-TLX)

Zur Erhebung der subjektiv gefühlten Beanspruchung durch eine Aufgabe können der Fragebogen NASA-TLX (Hart und Staveland 1988) oder der davon abgeleitete **Driver Attentional Load Index**

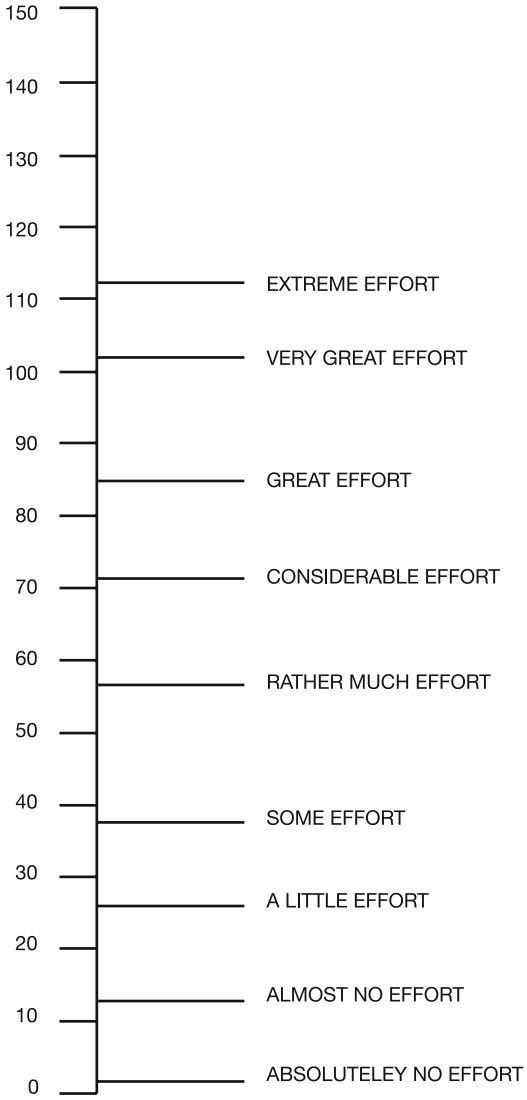


Abb. 11.25 RSME Skala (Zijlstra und Van Doorn 1985)

(DALI) (Pauzié und Pachiaudi 1997) eingesetzt werden. Als Aufgabe kommen sowohl die primäre Fahraufgabe als auch Nebenaufgaben oder deren Kombination in Frage.

Im Sinn einer mehrdimensionalen Messung soll die Beanspruchung (workload), die durch die Bearbeitung einer Aufgabe verursacht wird, vom Probanden anhand von Beurteilungen auf sechs Subskalen wiedergegeben werden. Die Subskalen umfassen die Faktoren mentale, physische, zeitliche Beanspruchung, erbrachte Leistung, Frustration und Aufwand zur Lösung.

Die Einzelurteile werden dann zu einem overall-work-load-index (OWI) mit einer Spanne von 0 bis 100 verrechnet. Dabei werden die subjektiven Einzelbeurteilungen x_i mit ihren jeweiligen Gewichtungsfaktoren w_i multipliziert. Die Gewichtungsfaktoren werden wiederum vor der Erfragung der Subjektivurteile in einem Paarvergleich ermittelt („Welche der zwei Dimensionen hat den größeren Einfluss auf Ihre Workload?“). Der Gewichtungsfaktor w_i ist die Summe der Bevorzugungen der Subskala i in diesem Paarvergleich.

$$OWI = \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{6} w_i \cdot x_i \qquad (11.5)$$

11.3.3.2 Rating Scale Mental Effort (RSME)

Die Rating Scale of Mental Effort (RSME) von Zijstra und Van Doorn (1985) ist eine eindimensionale, grafische Skala, welche die von den Probanden subjektiv erlebte Anstrengung bei der Durchführung einer Aufgabe erhebt (Abb. 11.25). Der RSME Wert wird auf einer 150 mm langen Skala mit neun verbalen Ankerpunkten, welche einer subjektiven Bewertung von *kaum anstrengend* bis *außerordentlich anstrengend* entsprechen, gemessen. Sie kann sowohl direkt nach als auch während einer Fahrt eingesetzt werden. Im Vergleich zu anderen Bewertungsmethoden ist die RSME außerordentlich sensitiv (Verwey und Veltman 1996). Zudem ist die RSME sehr reliabel und bildet im Umfeld der Fahrzeugergonomie die Belastung durch Fahraufgaben oder Nebenaufgaben sehr gut ab. So können kurzzeitige Belastungsspitzen sowie dauerhafte Zusatzbelastungen während der Fahrt identifiziert werden. Im Vergleich zur TLX stellt sie eine kurze, direkte Befragung des Probanden zur erlebten Beanspruchung dar, die sehr schnell und einfach zu beantworten ist.

Literatur

Verwendete Literatur

Baumann, M., Keinath, A., Krems, J.F., Bengler, K.: Evaluation of In-vehicle HMI using occlusion techniques: Experimental Results and Practical Implications. Applied Ergonomics **35**, 197–205 (2004)

G Békésy: A new Audiometer. Acta otolaryng **35**, 411–422 (1947)

Bengler, K., Mattes, S., Hamm, O., Hensel, M.: Lane Change Test: Preliminary Results of a Multi-Laboratory Calibration Study. In: Rupp, G.L. (Hrsg.) Performance Metrics for Assessing Driver Distraction: The Quest for Improved Road Safety. Chpt. 14 (pg, S. 243–253. SAE International, Warrendale, Pennsylvania (2010)

Bortz, J., Döring, N.: Forschungsmethoden und Evaluation, 4. Aufl. Springer, Heidelberg (2006)

Brooke, J.: SUS: a "quick and dirty" usability scale. In: Jordan, P.W., Thomas, B., Weerdmeester, B.A., McClelland, A.L. (Hrsg.) Usability Evaluation in Industry. Taylor and Francis, London (1996)

Bühner, M.: Einführung in die Test- und Fragebogenkonstruktion, 3. Aufl. Pearson Studium, München (2011). aktualisierte Auflage

Cherednischenko, A. (2007): Funktionales Modell der Einstiegsbewegung in einen PKW. Dissertation an der Technischen Universität München

Conti, A.S., Dlugosch, C., Schwarz, F., Bengler, K.: Driving and Speaking: Evaluations by the Head-Mounted Detection Response Task. In: Proceedings of the Seventh International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design (2013)

Conti, A.S., Dlugosch, C., Vilimek, R., Keinath, A., Bengler: An Assessment of Cognitive Workload using Detection Response Tasks. In: Proceedings 4th Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE) International Conference San Francisco, U.S., July 2012 (2012)

Diebschlag, W., Heidinger, F., Dupuis, H., Hartung, E., Meiller, H.: Ergonomie des Sitzens: Arbeitsmedizinische und technische Aspekte Sitzgestaltung Die Bibliothek der Technik, Bd. 68. Verlag Moderne Industrie, Reichenschwand (1992).

Dixon, W.J., Mood, A.M.: A Method for Obtaining and Analyzing Sensitivity Data. Journal of the American Statistical Assoziation **43**(241), 109–126 (1948)

Dlugosch, C., Conti, A.S., Bengler, K.: Driver Distraction through Conversation Measured with Pupillometry. In: Proceedings of the Seventh International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design (2013)

Estermann, S.: Komfortmodellierung für den 3D-Softdummy RAMSIS unter realen Fahrbedingungen. Dissertation an der Technischen Universität München (1999)

Fechner, G.T.: Elemente der Psychophysik. Breitkopf & Härtel, Leipzig (1860). Bände 2

Flick, U., Kardorff, E., von Steinke, I. (Hrsg.): Qualitative Forschung: Ein Handbuch, 6. Aufl. Rowohlt-Taschenbuch-Verl., Reinbek bei Hamburg (2009)

Foley, J.P.: Now you can see it. Now you don't. Visual occlusion as a surrogate distraction measurement technique. In: Rupp, G.L. (Hrsg.) Performance Metrics for Assessing Driver Distraction: The Quest for Improved Road Safety, S. 123–134. SAE International, Warrendale, PA (2010). Chapter 9

Fröhmel, C: Validierung des RAMSIS-Krafthaltungsmodells. Dissertation an der TU-München (2010)

Gevins, A., Smith, M.E.: Electroencephalography in neuroergonomics. In: Parasuraman, R., Rizzo, M. (Hrsg.) Neuroergonomics - The Brain at Work, 1. Aufl., S. 15–31. Oxford University Press, USA (2008)

Hart, S.G., Staveland, L.: Development of a multi-dimensional workload rating scale: Results of empirical and theoretical research. In: Hancock, P.A., Meshkati, N. (Hrsg.) Human mental workload, S. 139–183. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands (1988)

Hartung, J.: Objektivierung des statischen Sitzkomforts auf Fahrzeugsitzen durch die Kontaktkraft zwischen Mensch und Sitz, Dissertation an der Technischen Universität München (2006). http://www.gesis.org/fileadmin/upload/forschung/publikationen/gesis_reihen/howto/how-to2rp.pdf, Zugegriffen: 22.04.2014

ISO/TS 15007-2: Road vehicles - Measurement of driver visual behavior with respect to transport information and control systems - Part 2: Equipment and procedures (2001)

Jahn, G., Oehme, A., Krems, J., Gelau, C.: Peripheral detection as a workload measure in driving: Effects of traffic complexity and route guidance system use in a driving study. Transportation Research Part F **8**, 255–275 (2005)

Nielsen, J.: Usability Engineering. Morgan Kaufmann, San Francisco, S. 155–163 (1994)

Knappe, G., Keinath, A., Bengler, K.: Driving Simulators as an Evaluation Tool - Assessment of the Influence of the Field of View and Secondary Tasks on Lane Keeping and Steering Performance ESV Conference, Lyon (2007)

Kühner, M.: Haptische Unterscheidbarkeit mechanischer Parameter bei rotatorischen Bedienelementen. Dissertation an der Technischen Universität München (2014)

Lal, S.K.L., Craig, A.: Driver fatigue: electroencephalography and psychological assessment. Psychophysiology **39**(3), 313–321 (2002). doi:10.1017.S0048577201393095

Lange, C., Bubb, H.: Trajectory preview in vehicles by means of contact analogue display: an evaluation using eye movement tracking. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 2008(03), 134–143 (2008)

Marshall, S.P.: The Index of Cognitive Activity: measuring cognitive workload. In: Proceedings of the IEEE 7th Conference on Human Factors and Power Plants, S. 7-5–7-9 (2002)

Martin: Lehrbuch der Anthropologie, 4. Aufl. R. Knußmann, Stuttgart (1987). 1. Aufl. (1914)

Mayring, P.: Qualitative Inhaltsanalyse – Grundlagen und Techniken, 10. Aufl. BelzVerlag, Weinheim und Basel (2008)

McDonald, W.A., Hoffman, E.R.: Review of relationships between steering wheel reversal rate and driving task demand. Human Factors **22**(6), 733–739 (1980)

Menn, M., Studer, N., Cohen, A.: Eye movement behaviour when driving through the Gotthard tunnel: A pilot study ECEM13, European Conference on Eye Movements. Mental Workload, Bern, 2005. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands (2005)

Merat, N., Jamson, A.H.: The Effect of Stimulus Modality on Signal Detection: Implications for Assessing the Safety of In-Vehicle Technology. Human Factors **50**, 145–158 (2008)

Mergl, C.: Entwicklung eines Verfahrens zur Optimierung des Sitzkomforts auf Automobilsitzen, Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München (2006)

Moosbrugger, H., Kelava, A.: Testtheorie und Fragebogenkonstruktion. Springer, Heidelberg (2007)

Niedermeyer, E.: Historical Aspects. In: Niedermeyer, E., Lopes da Silva, F. (Hrsg.) Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields, 5. Aufl., S. 1–15. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, PA (2005)

Niedermeyer, E., Lopez da Silva, F.: Electroencephalography: Basic principles, Clinical Applications, and Related Fields, 5. Aufl. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, PA (2005)

Nilsson, G.: Speeds, accident rates and personal injury consequences for different road types. VTI, Linköping (1984). Rept. VTI-277

Parasuraman, R., Rizzo, M.: Introduction to neuroergonomics. In: Parasuraman, R., Rizzo, M. (Hrsg.) Neuroergonomics - The Brain at Work, 1. Aufl., S. 3–12. Oxford University Press, USA (2008)

Pascual-Marqui, R.D., Michel, C.M., Lehmann, D.: Low resolution electromagnetic tomography: a new method for localizing electrical activity in the brain. International Journal of Psychophysiology : Official Journal of the International Organization of Psychophysiology **18**(1), 49–65 (1994). http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7876038

Pauzié, A., Pachiaudi, G.: Subjective evaluation of the mental workload in the driving context. In: Rothengatter, T., Carbonell Vaya, E. (Hrsg.) Traffic and Transport Psychology: Theory and Application, S. 173–182. Pergamon, Oxford (1997)

Porst, R.: Question Wording –Zur Formulierung von Fragebogen-Fragen ZUMA How-to-Reihe, Bd. 2. (2000)

Porst, R.: Fragebogen. Ein Arbeitsbuch. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden (2008)

Raab-Steiner, E., Benesch, M.: Der Fragebogen. Von der Forschungsidee zur SPSS-Auswertung, 3. Aufl. facultas.wuv, Wien (2012)

Rigel, S.: Entwicklung und Validierung einer Methode zur quantitativen Untersuchung der Ein- und Ausstiegsbewegung in einen Pkw. Dissertation an der Technischen Universität München (2005)

Rohrmann, B.: Empirische Studien zur Entwicklung von Antwortskalen für die sozialwissenschaftliche Forschung. Zeitschrift für Sozialpsychologie **9**, 222–245 (1978)

Saito, S.: Does fatigue exist in a quantitative measurement of eye movements? Ergonomics, **35**, 607–615 (1992)

Sauseng, P., Hoppe, J., Klimesch, W., Gerloff, C., Hummel, F.C.: Dissociation of sustained attention from central executive functions: local activity and interregional connectivity in the theta range. The. European Journal of Neuroscience **25**(2), 587–593 (2007). doi:10.1111/j.1460-9568.2006.05286.x

Schmidt, E.A., Schrauf, M., Simon, M., Fritzsche, M., Buchner, A., Kincses, W.E.: Drivers' misjudgement of vigilance state during prolonged monotonous daytime driving. Accident Analysis and Prevention **41**(5), 1087–1093 (2009). doi:10.1016/j.aap.2009.06.007

Schmidtke, H.: Handbuch der Ergonomie mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien. Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage. Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr, Koblenz (1989)

Scholl, A.: Die Befragung, 2. Aufl. UVK, Konstanz (2009). überarbeitete Auflage

Schweigert, M.: Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben. Dissertation an der Technischen Universität München (2003)

Simon, M., Schmidt, E.A., Kincses, W.E., Fritzsche, M., Bruns, A., Aufmuth, C., Bogdan, M., Rosenstiel, W., Schrauf, M.M.: EEG alpha spindle measures as indicators of driver fatigue under real traffic conditions. Clinical Neurophysiology **122**, 1168–1178 (2011)

Speckmann, E.-J., Elger, C.E.: Introduction to the Neurophysiological Basis of the EEG and DC Potentials. In: Niedermeyer, E., Lopes da Silva, F. (Hrsg.) Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields, 5. Aufl., S. 17–29. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, PA (2005)

Steriade, M.: Cellular Substrates of Brain Rhythms. In: Niedermeyer, E., Lopes da Silva, F. (Hrsg.) Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields, 5. Aufl., S. 31–83. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, PA (2005)

Taylor, T., Pradhan, A.K., Divekar, G., Romoser, M., Muttart, J., Gomez, R., Fisher, D.L.: The view from the road: The contribution of on-road glance-monitoring technologies to understanding driver behavior. Accident Analysis & Prevention **58**(0), 175–186 (2013). doi:10.1016/j.aap.2013.02.008

Thompson, L.: Development and Evaluation of a Driver Assistance Concept for Speed and Lane Assistance, Master Thesis, Lehrstuhl für Ergonomie der TU München (2005)

Trübswetter, N., Bengler, K.: Why Should I Use ADAS? Advanced Driver Assistance Systems and the Elderly: Knowledge, Experience and Usage Barriers. In: Proceedings of the 7th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, Bolton Landing New York, June 17-20. (2013)

Verwey, W.B., Veltman, H.A.: Detecting Short Periods of Elevated Workload: A Comparison of Nine Workload Assessment Techniques. Journal of Experimental Psychology: Applied **2**(3), 270–285 (1996)

Weber, E.H.: De Pulsu, Resorptione, Auditu Et Tactu: Annotationes Anatomicae et Physiologicae. Koehler, Leipzig (1834)

Wolpaw, J.R., McFarland, D.J., Neat, G.W., Forneris, C.A.: An EEG-based brain-computer interface for cursor control. Electroencephalography and Clinical Neurophysiology **78**, 252–259 (1991). http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1707798

Young, R.A., Hsieh, L., Seaman, S.: The Tactile Detection Response Task: Preliminary validation for measuring the attentional effects of cognitive load. In: Proceedings of the Seventh International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training, and Vehicle Design Iowa City, USA: University of Iowa. S. 71–77 (2013)

Zijlstra, F.R.H., Van Doorn, L.: The Construction of a Scale to Measure Perceived Effort. University of Technology, Delft (1985). Technical Report

Weiterführende Literatur

Akamatsu, M., Green, P., Bengler, K.: Automotive Technology and Human Factors Research: Past, Present, and Future. In International Journal of Vehicular Technology, 2013 (2013). Article ID 526180, 27 pages, http://dx.doi.org/10.1155/2013/526180 doi:10.1155/2013/526180

Bengler, K., Bubb, H., Totzke, I., Schumann, J., Flemisch, F.: Automotive. In: Sandl, P., Stein, M. (Hrsg.) Information Ergonomics - A theoretical approach and practical experience in transportation. Springer, Berlin, Heidelberg (2012)

Bengler, K., Praxenthaler, M., Theofanou, D., Eckstein, L.: Investigation of Visual Demand in Different Driving Simulators within the ADAM Project Driving Simulator Conference 2004 Europe, Paris., S. 91–104 (2004). Proceedings

Breuer, J., Bengler, K., Heinrich, C., Reichelt, W.: Development of advanced driver attention metrics (ADAM). In: Strasser, H., Kluth, K., Rausch, H., Bubb, H. (Hrsg.) Proceedings of the Annual Spring Conference of the GfA on the occasion of the 50th Anniversary of the Foundation of the Gesellschaft für Arbeitswissenschaft and the XVII Annual ISOES Conference. Quality of work and products in enterprises of the future, S. 37–40. ergonomia, Stuttgart (2003)

Conti, A.S., Dlugosch, C., Bengler, K.: The Effect of Task Instruction on Detection Response Task Performance. In: de Waard, D., Brookhuis, K., Wiczorek, R., di Nocera, F., Brouwer, R., Barham, P., Weikert, C., Kluge, A., Gerbino, W., Toffetti, A. (Hrsg.) Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2013 Annual Conference (2013). http://hfes-europe.org

DIN 33402: Körpermaße des Menschen. Part 1 – 3. Berlin: Beuth (1978)

DIN EN ISO 9241, Teil 10: Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten - Teil 10: Grundsätze der Dialoggestaltung (ISO 9241-10:1996); Deutsche Fassung EN ISO 9241-10:1996. Berlin: Beuth (1996)

DIN EN ISO 9241, Teil 11: Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten - Teil 11: Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit – Leitsätze. (ISO 9241-11:1999); Deutsche Fassung EN ISO 9241-12:1998. Berlin: Beuth (1999a)

DIN EN ISO 9241, Teil 110: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion –Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung. Deutsche Fassung EN ISO 9241-110:2006, Normenausschuss Informationstechnik und Anwendungen, Berlin, 2008 (2006)

DIN EN ISO 9241, Teil 12: Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten - Teil 12: Informationsdarstellung (ISO 9241-12:1998); Deutsche Fassung EN ISO 9241-12:1998. Berlin: Beuth (2000)

Engström, J., Åberg, N., Johansson, E., Hammarbäck, J.: Comparison between visual and tactile signal detection tasks applied to the safety assessment of in-vehicle information systems (IVIS). In: Proceedings of the Third International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design Rockport, Maine (2005)

Flügel, B., Greil, H., Sommer, K.: Anthopologischer Atlas, Grundlagen und Daten. Edition Wörtzel, Frankfurt a. M. (1986)

Gradenegger, B., Rauch, N., Krueger, H.-P., Bengler, K.: Situation awareness in driving with in-vehicle information systems. In: Rupp, G.L. (Hrsg.) Performance Metrics for Assessing Driver Distraction: The Quest for Improved Road Safety, S. 217–231. SAE International, Warrendale, Pennsylvania (2010)

ISO 26022 (2010): Road vehicles – ergonomic aspects of transport information and control systems – simulated lane change test to assess in-vehicle secondary task demand (Norm Nr. ISO 26022). Geneva, CH: ISO.

Keinath, A., Baumann, M., Gelau, C., Bengler, K., Krems, J.: Occlusion as a technique for evaluating in-car displays. In: Harris, D. (Hrsg.) Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics, 5. Aufl., S. 391–397. Ashgate, Brookfield (2001)

Kincses, W.E., Hahn, S., Schrauf, M., Schmidt, E.A.: Mobiles EEG zur Messung der mentalen Fahrerbeanspruchung. ATZ **110**(3), 204–209 (2008)

Krems, J., Keinath, A., Baumann, M., Gelau, C., Bengler, K.: Evaluating Visual Display Designs in Vehicles: Advantages and Disadvantages of the Occlusion Technique. In: Camarinha-Matos, L., Afsarmanesh, H., Erbe, H.-H. (Hrsg.) Advances in Network Enterprises, S. 361–368. Kluwer, Dordrecht (2000)

Krems, J.F., Keinath, A., Baumann, M., Gelau, C., Bengler, K.: Evaluating Visual Display Designs in Vehicles: Advantages and Disadvantages of the Occlusion Technique. In: Camarinha-Matos, L.M., Afsarmanesh, H., Erbe, H.-H. (Hrsg.) Advances in Network Enterprises, S. 361–368. Kluwer, Dordrecht (2000)

Kühner, M., Wild, J., Bubb, H., Bengler, K., Schneider, J.: Haptic perception of viscous friction of rotary switches. In: Jones, L.A., Harders, M., Yokokohji, Y. (Hrsg.) IEEE World Haptics Conference WHC 2011, Istanbul, Turkey, 21-24 June 2011. S. 587–591. IEEE Computer Society, Istanbul (2011)

Lange, C.: Wirkung von Fahrerassistenz auf der Führungsebene in Abhängigkeit der Modalität und des Automatisierungsgrades. Dissertation an der Technischen Universität München (2008)

Lewis, J.R.: IBM Computer Usability Satisfaction Questionnaires: Psychometric Evaluation and Instructions for Use. International Journal of Human-Computer Interaction **7**(1), 57–78 (1995)

ZijIstra, F.R.H.: Efficiency in Work Behavior: a Design Approach for Modern Tools. Doctoral thesis. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands (1993). http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3Ad97a028b-c3dc-4930-b2ab-a7877993a17 f/

Statistische Methoden

Mark Vollrath

12.1 Grundlegende Fragestellungen – Verteilung vs. Unterschiedsprüfung – 664

12.2 Ausprägung von Merkmalen – Vertrauensintervalle – 664

12.2.1 Methodik – Stichprobenziehung – 664

12.2.2 Statistik – Bestimmung von Kenngrößen – 666

12.3 Unterschiede zwischen Bedingungen – Signifikanztests – 669

12.3.1 Methodik – Versuchspläne – 669

12.3.2 Statistik – Signifikanztests – 673

12.3.3 Statistik – Darstellung der Ergebnisse – 679

12.4 Externe und interne Validität – 682

Literatur – 684

H. Bubb et al., *Automobilergonomie,* ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-8348-2297-0_12, © Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

12.1 Grundlegende Fragestellungen – Verteilung vs. Unterschiedsprüfung

Bei der Fahrzeugergonomie kann man im Wesentlichen zwei Fragestellungen unterscheiden, die mit Hilfe statistischer Methoden zu lösen sind:

- Bestimmung der Ausprägung bestimmter Merkmale in der relevanten Population
- Prüfung der Unterschiedlichkeit verschiedener Bedingungen

Beiden Fragestellungen ist gemeinsam, dass für die Beantwortung einerseits ein bestimmtes methodisches Vorgehen notwendig ist (Stichprobenziehung, Versuchsplanung), andererseits die angemessenen statistischen Verfahren zu wählen sind (Vertrauensintervalle, Signifikanztests, s. Abb. 12.1). Dies soll zunächst erläutert werden.

Die erste Fragestellung ist immer dann wichtig, wenn bei der Gestaltung von Bedienelementen oder Anzeigen bestimmte Eigenschaften der Kunden zu berücksichtigen sind. Bedienelemente im Fahrzeug sind so anzuordnen, dass sie von der Hand des Fahrers erreicht werden können, ohne dass dieser seine Sitzposition verändern muss. Hier ist die wesentliche Eigenschaft die Armlänge. Ein Display sollte in einer Höhe angebracht sein, dass es von jedem Fahrer gut gesehen werden kann. In diesem Fall ist die Augenhöhe über dem Sitz eine relevante Eigenschaft.

Das methodische Vorgehen in diesem Fall konzentriert sich auf die Auswahl einer repräsentativen Stichprobe. In der Regel will man eine Aussage für eine bestimmte Fahrerpopulation treffen, also z. B. für den deutschen Fahrer. Da man nicht alle Personen dieser Grundgesamtheit untersuchen kann, muss eine Stichprobe gezogen werden. Welche konkreten Personen müssen untersucht werden, damit die Ergebnisse repräsentativ für die deutsche Fahrerbevölkerung sind?

Bei den statistischen Verfahren für diese Fragestellung geht es einerseits darum, wie die Verteilung der Eigenschaft am besten zu beschreiben ist. Es kann die mittlere Ausprägung gesucht werden, um damit den für die meisten Personen besten Fall zu finden. Möglicherweise sind aber auch Minimal- oder Maximalwerte aussagekräftig, um zu demonstrieren, dass die gewählte Lösung auch für Personen mit den entsprechenden extremen Ausprägungen angemessen ist. Andererseits geht es um die Frage der Genauigkeit der Schätzung dieser Parameter. Diese hängt im Wesentlichen von der Größe der Stichprobe ab: Je mehr Personen untersucht werden, desto genauer kann man die Verhältnisse in der Grundgesamtheit schätzen.

Die zweite Fragestellung nach Unterschieden ist beim Vergleich von Varianten oder Gestaltungsalternativen relevant und bei der Prüfung, inwieweit bestimmte Bedingungen (z. B. ein Warnsystem) im Vergleich zu Kontrollbedingungen (z. B. einer Fahrt ohne Warnsystem) zu Veränderungen führen (z. B. einer schnelleren Bremsreaktion des Fahrers). In jedem Fall werden damit Personengruppen miteinander verglichen, wobei es sich auch um dieselben Personen zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten handeln kann (Messwiederholung). Vom methodischen Vorgehen her geht es hier um die Versuchsplanung. Wie werden die verschiedenen Gruppen „behandelt", so dass ein möglicherweise gefundener Unterschied tatsächlich auf die interessierende Variation von Einflussgrößen zurückgeführt werden kann?

Ein ganz wesentlicher Aspekt ist auch hier die Stichprobengröße. Je kleiner ein Unterschied ist, desto mehr Probanden werden benötigt, um diesen auch tatsächlich in der Untersuchung nachweisen zu können. Für den Nachweis des Effekts werden je nach Versuchsplan und Qualität der Daten unterschiedliche Verfahren eingesetzt. Die Auswahl des angemessenen und sensitiven Verfahrens ist der wesentliche Punkt der Statistik bei diesen Unterschiedsfragestellungen.

12.2 Ausprägung von Merkmalen – Vertrauensintervalle

12.2.1 Methodik – Stichprobenziehung

Das Ziel der Stichprobenziehung bei dieser Fragestellung ist die Gewinnung einer möglichst repräsentativen Stichprobe, d. h. einer Stichprobe, die die Verhältnisse in der Grundgesamtheit möglichst gut wiedergibt. Damit geht es einerseits um das Vor-

Abb. 12.1 Grundlegende Fragestellungen mit den zugehörigen methodischen und statistischen Aspekten. Zur weiteren Erklärung, s. Text.

	Fragestellung	
	Ausprägung von Merkmalen	**Unterschiede zwischen Bedingungen**
Methodik	Stichprobenziehung	Versuchsplanung
Statistik	Vertrauensintervalle	Signifikanztests

gehen bei der Ziehung der Stichprobe, andererseits um die notwendige Anzahl von Personen.

Die beste Methode der Stichprobenziehung ist die Zufallsauswahl. Bei dieser Methode hat jede Person der Grundgesamtheit die gleiche Chance, in die Untersuchung aufgenommen zu werden. Damit sind alle Einflussgrößen auf das zu messende Merkmal in der Stichprobe in derselben Weise verteilt wie in der Grundgesamtheit. Dies ist umso eher der Fall, je mehr Personen gezogen werden. Beispielsweise hängen viele Merkmale vom Geschlecht der Person ab. Zieht man per Zufall 1000 Personen aus der deutschen Bevölkerung, so wird das Geschlechtsverhältnis in einer solchen Stichprobe mit hoher Wahrscheinlichkeit dem in der Grundgesamtheit entsprechen. Zieht man dagegen nur eine kleine Stichprobe von zwei Personen, so wird man mit etwa 50 % Wahrscheinlichkeit nur Männer oder nur Frauen untersuchen und damit das gesuchte Merkmal, z. B. die mittlere Körpergröße, falsch abschätzen.

Allerdings ist die Zufallsauswahl einer hinreichend großen Stichprobe aus der Bevölkerung aus praktischen Gründen im Bereich der Fahrzeugergonomie nur selten möglich. Die Untersuchungen müssen z. B. mit einem bestimmten Fahrzeug an einem bestimmten Ort durchgeführt werden. Möglicherweise sollen die Ergebnisse vertraulich behandelt werden, so dass nur Mitarbeiter der Firma als Teilnehmer in Frage kommen. Und der Aufwand für die Untersuchung ist so hoch, dass nur etwa 30 Personen untersucht werden können. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie man unter diesen Umständen zu den besten Stichproben kommt.

Wichtig ist gerade bei kleinen Stichproben, dass möglichst viele Eigenschaften, die das relevante Merkmal möglicherweise beeinflussen können, bei der Stichprobenauswahl berücksichtigt werden. Dies bezeichnet man als stratifizierte Stichprobe. Zentrale Eigenschaften sind sicherlich Alter und Geschlecht. Man würde von da her ungefähr gleich viele Männer wie Frauen und Personen unterschiedlicher Altersgruppen in die Studie einschließen, um den Einfluss dieser Merkmale damit gezielt zu berücksichtigen. Weitere im Bereich der Fahrzeugergonomie relevante Merkmale sind die Körpergröße und das Gewicht, außerdem für viele Fragestellungen die Fahrleistung. Um die Bandbreite im Hinblick auf diese Merkmale gut abzubilden, würde man gerne versuchen, die möglichen Ausprägungen der Merkmale und ihre Kombinationen mit zumindest 3–10 Personen abzubilden. Dies führt allerdings bereits bei nur wenigen Merkmalen zu sehr großen Stichproben. Berücksichtigt man z. B. beide Geschlechter, bildet drei Altersgruppen, drei Klassen von Körpergrößen und drei Gruppen mit unterschiedlicher Fahrerfahrung, so hätte man $2 \times 3 \times 3 \times 3 = 54$ Kombinationen. Will man 10 Personen pro Kombination untersuchen, würde man entsprechend 540 Personen benötigen. Unter praktischen Gesichtspunkten ist damit dieser Zugang mit Hilfe von stratifizierten Stichproben, bei denen man die Kombination von Merkmalsausprägungen berücksichtigt, meist nur bei Einbezug von 2 bis 3 Merkmalen möglich.

Hinzu kommt, dass der Einbezug verschiedener Merkmale dazu führt, dass die Stichprobe heterogener wird. Die relevanten Eigenschaften streuen damit mehr, was eine zuverlässige Schätzung erschwert. Von da her kann es sinnvoll sein, zunächst mit einer homogenen Stichprobe zu arbeiten, um mit dieser schon bei einer relativ kleinen Anzahl von Probanden eine gute Schätzung zumindest für diese Art von Probanden zu erhalten, um dies dann in weiteren Schritten gezielt auf andere, wiederum homogene Stichproben zu erweitern.

Zusammenfassend hängt die Aussagekraft der Untersuchung im Hinblick auf die Grundgesamtheit ganz wesentlich von der Stichprobenziehung ab. Wenn man relativ homogene, örtlich begrenzte

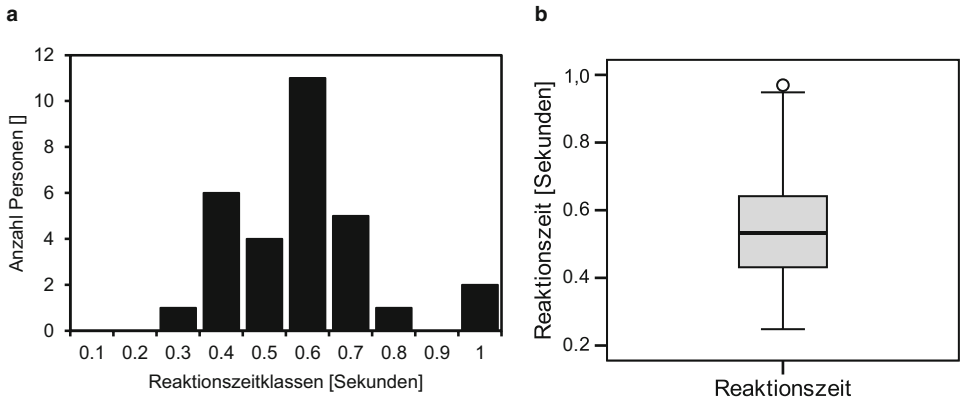


Abb. 12.2 Verteilung der Reaktionszeiten bei einer Spurwechselaufgabe. Dargestellt ist in (**a**) als Histogramm die Anzahl der Personen in den auf der x-Achse dargestellten Klassen von Reaktionszeiten. In (**b**) sind dieselben Daten als Boxplot dargestellt.

Stichproben untersucht, muss man bei der Interpretation der Ergebnisse abwägen, inwieweit diese Ergebnisse zu übertragen sind auf andere Gruppen der Bevölkerung. Wendet man auf diese Ergebnisse statistische Verfahren an, können diese möglicherweise zwar die „wahren" Werte in der Grundgesamtheit relativ genau schätzen. Allerdings gilt diese Schätzung nur für den Teil der Bevölkerung, der der Stichprobe entspricht. Für eine Bewertung der entsprechenden Ergebnisse sind daher nicht nur Informationen über die Stichprobengröße und die damit geschätzten Verteilungen wichtig, sondern auch über die Art der Stichprobenziehung und die wesentlichen Merkmale der Stichprobe. Nur damit kann eingeschätzt werden, inwieweit die Ergebnisse nicht nur genau, sondern auch repräsentativ sind.

12.2.2 Statistik – Bestimmung von Kenngrößen

Nach der Datenerhebung bietet es sich an, die erhobenen Daten zunächst deskriptiv darzustellen. Dies kann z. B. als Häufigkeitsverteilung oder Histogramm (s. Abb. 12.2a) geschehen. Hier werden sinnvolle Kategorien des Merkmals gebildet und pro Kategorie die Anzahl der Werte dargestellt. Man erkennt dadurch sehr gut die Art der Verteilung (z. B. symmetrisch oder schief, eingipflig oder mehrgipflig) und erhält einen ersten Eindruck der gemessenen Größenordnungen. Auch „Ausreißer" sind recht gut zu erkennen.

Eine etwas komprimiertere Art der Darstellung ist der Boxplot (s. Abb. 12.2b). Der graue Kasten enthält die mittleren 50 % der Messwerte. Die schwarze waagerechte Linie stellt den Median (s. u.) dar. Mit den senkrechten Strichen wird das 1.5-fache des Kastens nach oben und unten aufgetragen, allerdings nur bis zum jeweils letzten vorhandenen Wert. Alle Werte außerhalb dieses Bereichs werden als einzelne Punkte gezeichnet und sind so einfach als Ausreißer zu identifizieren. Diese Art der Darstellung ist auch sehr gut geeignet, um mehrere Bedingungen mit Hilfe von nebeneinander angeordneten Boxplots zu vergleichen.

Im nächsten Schritt versucht man, relevante Eigenschaften dieser Verteilungen über Kennwerte zu beschreiben. Wie Tab. 12.1 zeigt, werden damit einerseits die typischen Werte beschrieben, andererseits die Breite oder Streuung der Verteilung. Wie die Spalte rechts zeigt, ist die Interpretation der einzelnen Maße leicht unterschiedlich. Neben diesem unterschiedlichen Informationsgehalt sind diese Maße auch für verschiedene Arten von Daten am besten geeignet.

Dabei werden vier Skalenniveaus danach unterschieden, welchen Informationsgehalt der verwendeten Zahlen man interpretieren darf (siehe auch ▶ Abschn. 11.3.1.3). Für Berechnungen wird z. B. das Geschlecht häufig in die Werte „1: männlich" und „2: weiblich" klassifiziert. Bei diesen beiden Zahlen ist es nur sinnvoll, die Unterschiedlichkeit bzw. Gleichheit der Messwerte zu interpretieren. Dass die 2 doppelt so groß ist wie die 1, ist zwar für

Tab. 12.1 Überblick über wesentliche Kennwerte von Verteilungen.

Kennwert	Berechnung	Bedeutung
Mittelwert	$M = \frac{\sum_{1}^{n} x}{n}$ x: Messwerte n: Anzahl der Messwerte	Typischer Wert der Stichprobe Summe der Abweichungen von diesem Wert ist minimal
Median	Sortieren der Messwerte Wert, über dem 50 % der Messwerte liegen (Interpolation bei kategorialen Werten)	Typischer Wert der Stichprobe 50 % der Werte liegen darunter/ darüber
Modus	Häufigster Messwert	Typischer Wert der Stichprobe Der Wert, der am häufigsten vorkommt
Standardabweichung	$s = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n}(x-M)^2}{n-1}}$ X: Messwerte M: Mittelwert N: Anzahl der Messwerte	Streuung der Werte Mittlere Abweichung vom Mittelwert
Interquartilabstand	Abstand zwischen dem Wert, unter dem 75 % der Werte liegen und dem, unter dem 25 % der Werte liegen	Streuung der Werte Breite des Bereichs, in dem die mittleren 50 % der Werte liegen
Spannweite	Maximum – Minimum	Streuung der Werte Breite des Bereichs, in dem die Werte liegen

die Zahlen richtig, nicht aber für die Kategorien, für die die Zahlen stehen. Eine derartige Klassifikation bezeichnet man als *Nominalskala*. Ein sinnvoller Kennwert ist der Modus (oder auch Modalwert). Ein Modus von 2 besagt im Beispiel, dass Frauen häufiger in der Stichprobe enthalten sind als Männer. Auch die Spannweite kann hier sinnvoll sein, um die Anzahl der verwendeten Kategorien zu beschreiben. Schließlich kann man die prozentuale Häufigkeit des Auftretens der verschiedenen Kategorien angeben („Die Stichprobe enthält 45 % Männer").

Das zweite Skalenniveau ist die *Ordinalskala*. Hier kann die Ordnung der Zahlen interpretiert werden. Wird z. B. eine Schriftgröße von Probanden als „1: klein" und „2: groß" beurteilt, so ist die Aussage bedeutsam, dass das Urteil 2 größer ist als das Urteil 1 – eine als „groß" beurteilte Schriftgröße ist größer als eine als „klein" beurteilte. Wiederum nicht bedeutsam ist die Aussage, dass diese große Schriftgröße doppelt so groß wie die kleine ist, da 2 doppelt so groß ist wie 1. Bei Daten auf diesem Niveau ist der Median eine sinnvolle Beschreibung des typischen Werts und der Interquartilabstand für die Streuung.

Die *Intervallskala* ist das dritte Skalenniveau. Hier können auch die Abstände zwischen den Messwerten verglichen werden. Beurteilt man z. B. die Lautstärke eines Warntons mit „1: sehr leise", „2: leise", „3: mittel", „4: laut" und „5: sehr laut", so kann zunächst sowohl die Unterschiedlichkeit als auch die Ordnung der Zahlen interpretiert werden. Zusätzlich macht die Aussage Sinn, dass der Unterschied zwischen 3 (mittel) und 1 (sehr leise) größer ist als der zwischen 2 (leise) und 1 (sehr leise). Ob dagegen 2 (leise) doppelt so laut ist wie 1 (sehr leise), ist zu bezweifeln. Auch hier dürfen demnach Verhältnisse von Zahlen nicht interpretiert werden. Sinnvolle Kennwerte für das Intervallniveau sind der Mittelwert und die Standardabweichung.

Wie der Name sagt, können für Daten der *Verhältnisskala* auch Verhältnisse interpretiert werden. Dies ist häufig bei physikalischen Daten gegeben. Eine Messung von Reaktionszeiten ist ein Beispiel für Daten auf dem Verhältnisniveau. Eine Reaktionszeit von 500 ms ist doppelt so lang wie eine von 250 ms. Auch für dieses Skalenniveau sind Mittelwert und Standardabweichung eine gute Beschreibung des typischen Werts und der Streuung.

Insgesamt sind damit auf einem bestimmten Skalenniveau nur bestimmte Interpretation der Zahlen und damit auch nur bestimmte Kennwerte sinnvoll. Auf dem jeweils höheren Skalenniveau können auch die Kennwerte der niedrigeren Niveaus verwendet und interpretiert werden und liefern teilweise interessante, zusätzliche Informationen.

Neben der Beschreibung der Daten der Stichprobe durch bestimmte Kennwerte geht es häufig darum, mit Hilfe der Stichprobe die Verhältnisse in der Grundgesamtheit abzuschätzen. Gerade für den Mittelwert, aber auch den prozentualen Anteil bestimmter Kategorien stellt sich die Frage, wie präzise die Berechnung der Stichprobenkennwerte die Verhältnisse in der Population wiedergibt. Diese wird mit Hilfe von Vertrauensintervallen (Konfidenzintervalle) beantwortet. Ein Vertrauensintervall gibt den Bereich an, in dem 95 % (manchmal auch 99 %) der Populationskennwerte liegen, die den Stichprobenkennwert erzeugt haben können. Oder: Mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % (bzw. 99 %) liegt der wahre Wert in der Population in diesem Bereich. Von der Methodik her gilt dies natürlich nur, insofern die Stichprobe eine repräsentative Auswahl der Population darstellt. Mit Vertrauensintervallen wird also nur angegeben, wie präzise die Schätzung aufgrund der Stichprobe ist, aber nicht, wie gut die Stichprobe die Population wiedergibt.

Die Formel des Vertrauensintervalls für einen Mittelwert ist wie folgt:

$$\Delta_{crit} = M \pm z_{\frac{\propto}{2}} \cdot \widehat{\sigma_M} \tag{12.1}$$

Dabei ist

$$\widehat{\sigma_M} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x - M)^2}{n \cdot (n-1)}} \tag{12.2}$$

M steht in den Formeln für den Mittelwert. $\widehat{\sigma_M}$ ist der Standardfehler des Mittelwerts. Der z-Wert steht für den entsprechenden Wert einer Standardnormalverteilung, der die mittleren 95 % (99 %) dieser Verteilung einschließt. Formal entspricht dies dem z-Wert mit $\propto = 5\,\%/2$ bzw. $\propto = 1\,\%/2$. In entsprechenden Tabellen findet man dafür folgende Zahlenwerte:

$$95\,\%: z_{\frac{\propto}{2}} = 1.96$$

$$99\,\%: z_{\frac{\propto}{2}} = 2.58$$

Für die Daten aus Abb. 12.2 ergibt sich ein Mittelwert von $M = 0.53$ Sekunden bei $n = 30$ Personen und einem Standardfehler des Mittelwerts von 0.03. Damit ergibt sich $\Delta_{crit} = 0.53 \pm (1.96 \cdot 0.03) = 0.53 \pm 0.06$. Das 95 %-Vertrauensintervall reicht damit von 0.47 bis 0.59 Sekunden. Damit wird bereits mit 30 Probanden eine befriedigend genaue Schätzung des Populationsmittelwerts der Reaktionszeit erreicht.

Aus der Gl. 12.2 wird auch unmittelbar deutlich, welche Rolle die Stichprobengröße n spielt. Je größer die Stichprobe, desto kleiner wird der Standardfehler, der wiederum direkt die Breite des Vertrauensintervalls bestimmt. Man kann dies ausnutzen, um bei einer vorgegebenen zu erreichenden Genauigkeit die notwendige Stichprobengröße zu errechnen, wenn Mittelwert und Standardabweichung z. B. aus einer Pilotstudie bekannt sind. Als Formel ergibt sich:

$$N_{notwendig} = \frac{1.96^2 \cdot sd^2}{Genauigkeit^2_{gewünscht}} \tag{12.3}$$

Im obigen Beispiel betrug die Standardabweichung sd = 0.17. Möchte man der Mittelwert der Population mit einer Genauigkeit von ±0.1 Sekunde schätzen, so ergibt sich nach der Formel ein $N_{notwendig} = 11$.

Ebenso kann man Vertrauensintervalle für Prozentwerte berechnen. Die Grundformel ist vergleichbar:

$$\Delta_{crit(\%)} = P \pm z_{\frac{\propto}{2}} \cdot \widehat{\sigma_\%} \tag{12.4}$$

Dabei ist P der empirisch berechnete Prozentsatz. Der Standardfehler ergibt sich als:

$$\widehat{\sigma_\%} = \sqrt{\frac{P \cdot (100 - P)}{n}} \tag{12.5}$$

Im obigen Beispiel lag die Reaktionszeit von 11 der 30 = 37 % der Probanden in der Kategorie zwischen

0.5 und 0.6 Sekunden. Wie groß ist das Vertrauensintervall dieses Prozentsatzes? Der Standardfehler ist:

$$\widehat{\sigma_{\%}} = \sqrt{\frac{37 \cdot 63}{30}} = \sqrt{77.7} = 8.8$$

Damit errechnet sich

$$\Delta_{\text{crit}(\%)} = 37\,\% \pm (1.96 \cdot 8.8) = 37\,\% \pm 17$$

Das 95 %-Vertrauensintervall reicht damit von 20 % bis 54 %. Auch hier kann man durch Umformung angeben, welche Stichprobe notwendig wäre, um eine bestimmte Genauigkeit zu erreichen.

$$N_{\text{notwendig}\,\%} = \frac{1.96^2 \cdot (P \cdot (100 - P))}{\text{Genauigkeit}^2_{\text{gewünscht}}}$$

Möchte man also den Prozentsatz mit einer Genauigkeit von ±5 % schätzen, so ergibt sich nach der Formel ein $N_{\text{notwendig}\,\%}$ =358.

12.3 Unterschiede zwischen Bedingungen – Signifikanztests

12.3.1 Methodik – Versuchspläne

Bei dieser zweiten Art von Fragestellung werden mindestens zwei Bedingungen miteinander verglichen. Ganz allgemein geht es darum, inwieweit bestimmte Einflussfaktoren die Messwerte systematisch verändern. Das wissenschaftliche Anliegen dabei ist die Suche nach kausalen Gesetzmäßigkeiten, also nach Ursache-Wirkungsbeziehungen. Um dies deutlich zu machen, unterscheidet man Unabhängige Variablen (UV, Ursachen) und Abhängige Variablen (AV, Messwerte, siehe auch ▶ Abschn. 11.1.3). Die Beziehung wird schematisch wie folgt dargestellt:

$$\text{UV} \rightarrow \text{AV} \quad \text{oder} \quad \text{AV} = f(\text{UV})$$

Die UV verursacht systematisch bestimmte Veränderungen in der AV, den Messwerten. Damit sind die Messwerte eine Funktion der Unabhängigen Variablen. In der Ergonomie kann es z. B. um den Nachweis gehen, dass eine bestimmte Anzeigevariante im Head-Up-Display mit einem Warnton zu schnelleren Reaktionszeiten führt als die herkömmliche Anzeige mit Warnton im Kombidisplay. UV ist hier die Art der Anzeige in zwei Stufen (HUD vs. Kombi), AV die Reaktionszeit. Man vermutet, dass der Mittelwert der Reaktionszeiten einer Gruppe von Fahrern mit dem HUD kleiner ist als in einer Gruppe mit Kombi.

Auch komplexere Fragestellungen können in diesem Schema dargestellt werden. Man kann vermuten, dass neben dem Ort der Anzeige auch das Vorhandensein eines Warntons wesentlich für die Wirkung der Warnung ist. Um dies zu prüfen, würde man als zweite UV den Warnton in den Stufen „ohne“ und „mit“ einführen. Um die Wirkung beider UV allein und in Kombination zu untersuchen, müsste man jetzt beide UV kombinieren, so dass sich 4 Versuchsgruppen ergeben. Die Unabhängigen Variablen werden auch als „Faktoren“ bezeichnet, um damit Versuchspläne nach der Anzahl der untersuchten UVs zu unterscheiden. Dies führt zur Beschreibung als „einfaktorieller“, „zweifaktorieller“ usw. Versuchsplan (siehe ◘ Tab. 12.2).

Von der Anzahl der Faktoren ist die Anzahl der Stufen der Faktoren zu unterscheiden. Ein Einflussfaktor wird häufig in zwei Stufen (z. B. ohne vs. mit) untersucht. Aber auch der Vergleich mehrerer Stufen (Warnung im Kombi, im HUD, in der Mittelkonsole) ist nicht ungewöhnlich. Bei jedem Versuchsplan ist demnach zusätzlich zur Anzahl der Faktoren auch die Anzahl der Stufen anzugeben. Dies geschieht gerne in der Form „a x b x c x … faktorieller Versuchsplan“, wobei a, b und c die Stufen der jeweiligen UV sind. Obiges Beispiel mit den beiden Faktoren „Ort des Displays“ und „Warnton“ wäre so als 2 × 2 faktorieller Versuchsplan zu beschreiben.

Auch von Seiten der AV her unterscheiden sich die Versuchspläne. Hier ist ganz wesentlich, wie viele AVs untersucht werden. Misst man als einzige AV die Reaktionszeit, handelt es sich um einen univariaten Plan. Meist werden aber mehrere AVs erfasst, z. B. auch subjektive Bewertungen. Erfasst man nur ein Globalurteil („Wie gut war die Anzeige?“) als einzige zusätzliche AV so handelt es sich um einen bivariaten Plan. Allgemein spricht man bei mehreren AV von multivariaten Plänen.

Tab. 12.2 Überblick über wesentliche Aspekte von Versuchsplänen. Zur weiteren Erklärung, s. Text.

Kriterium	Bedeutung	Beschreibung
Anzahl UV	Wie viele Einflussfaktoren werden untersucht?	Einfaktoriell Zweifaktoriell … Multifaktoriell
Anzahl Stufen UV	Welche Aspekte der Einflussfaktoren werden untersucht?	2 Stufen 3 Stufen …
Anzahl AV	Wie viele Parameter werden gemessen?	Univariat Bivariat … Multivariat
Skalenniveau AV	Welche Bedeutung haben die gemessenen Zahlen?	Nominalskala Ordinalskala Intervallskala Verhältnisskala
Messwiederholung	Erhält jeder Proband nur eine oder mehrere Stufen der UV?	Unabhängig Gemischt Abhängig

Für die weiteren Auswertungen ist außerdem wichtig, welches Skalenniveau die Messungen aufweisen (s. ▶ Abschn. 12.2.2). Wie oben beschrieben, stellt sich hier die Frage, welche der in den Zahlen enthaltenen Informationen auch interpretiert werden können. Dies führt zu den oben beschriebenen unterschiedlichen Arten von Kennwerten, hat aber auch weitere Auswertungen bei den statistischen Vergleichen (s. ▶ Abschn. 12.3.2).

Das letzte Kriterium ist die Unterscheidung zwischen unabhängigen und abhängigen Versuchsplänen. Bei unabhängigen Plänen erhält jeder Proband nur genau eine Abstufung bzw. Kombination der Unabhängigen Variablen. Bei abhängigen Plänen oder Plänen mit Messwiederholung liefert jeder Proband Messwerte in allen Bedingungen. Bei mehrfaktoriellen Plänen ist es auch möglich, einzelne UVs mit Messwiederholung zu untersuchen, andere dagegen mit unabhängigen Gruppen. Die Entscheidung dafür ist unter inhaltlichen Überlegungen zu treffen. Wenn zu vermuten ist, dass das Erleben einer Bedingung die Reaktionen in einer anderen Bedingung beeinflusst, sollten lieber unabhängige Pläne gewählt werden. Wenn also die unterschiedlichen Warnungen mit Hilfe einer unerwartet auftretenden, kritischen Situation im Fahrsimulator untersucht werden sollen, macht ein abhängiger Plan wenig Sinn, da der Proband nach der ersten Bedingung diese kritische Situation bereits kennt und diese für ihn dann in der zweiten Bedingung nicht mehr unerwartet wäre. Immer wenn Lerneffekte zu vermuten sind, ist damit eine Messwiederholung zu vermeiden. Gleiches gilt, wenn die Untersuchungen für den Probanden sehr ermüdend sind, so dass ein Nachlassen der Motivation und Leistungsfähigkeit zu befürchten ist. Auch dies könnte die Ergebnisse verfälschen, sodass unabhängige Pläne sinnvoller wären.

Warum dann überhaupt Messwiederholung? Der Vorteil von abhängigen Plänen liegt darin, dass jeder Proband mit sich selbst verglichen werden kann. Gerade dann, wenn die Personen recht unterschiedlich reagieren, kann so eine Veränderung immer in Bezug auf den individuellen typischen Wert ausgedrückt werden. Damit können bereits mit wenigen Probanden kleine Effekte entdeckt werden, da die nicht interessierenden Unterschiede zwischen Personen auf diese Weise herausgerechnet werden. Pläne mit Messwiederholung sind daher sowohl von der benötigten Probandenanzahl als auch von ihrer Sensitivität her, Effekte zu entdecken, vorteilhaft.

Bei diesen Plänen sind allerdings mögliche Zeiteffekte zu kontrollieren. Da sowohl Lernen als auch Ermüdung prinzipiell nie völlig auszuschließen sind, muss man dafür sorgen, dass dies in den verschiedenen Bedingungen gleichmäßig wirkt. Man spricht hier von der Kontrolle der Störvariablen „Zeit". Erreicht wird dies, indem die Reihenfolge der Bedingungen für jeden Probanden variiert wird. Dabei gibt es im Wesentlichen zwei Möglichkeiten: Die vollständige Permutation aller möglichen Reihenfolgen und die Technik des Lateinischen Quadrats. Abbildung 12.3 zeigt dies im Überblick.

Bei zwei Bedingungen, d. h. nur einer UV, bildet man zwei Gruppen von Probanden, wobei diese per Zufall den beiden Gruppen zugewiesen werden, um auf diese Weise sicherzustellen, dass die Gruppen vergleichbar sind. Die erste Gruppe erhält zum ersten Zeitpunkt die Behandlung A, dann B. Bei der zweiten Gruppe ist die Reihenfolge umgekehrt.

2 Bedingungen Cross-Over

	T1	T2
G1	A	B
G2	B	A

3 Bedingungen Vollständige Permutation

	T1	T2	T3
P1	A	B	C
P2	A	C	B
P3	B	A	C
P4	B	C	A
P5	C	A	B
P6	C	B	A

4 Bedingungen Lateinisches Quadrat

	T1	T2	T3	T4
P1	A	B	C	D
P2	B	C	D	A
P3	C	D	A	B
P4	D	A	B	C

Zufallszahlen Spalten: 2 / 4 / 1 / 3

	T1	T2	T3	T4
P1	B	D	A	C
P2	C	A	B	D
P3	D	B	C	A
P4	A	C	D	B

Zufallszahlen Reihen: 4 / 1 / 3 / 2

	T1	T2	T3	T4
P1	A	C	D	B
P2	B	D	A	C
P3	D	B	C	A
P4	C	A	B	D

Abb. 12.3 Überblick über Techniken der Kontrolle der Zeit. Dargestellt sind die jeweiligen Versuchsbedingungen (A..D) für Probanden (P) bzw. Gruppen (G). Die verschiedenen Zeitpunkte sind als T1..T4 bezeichnet.

Bei drei Bedingungen wird ein Vielfaches von 6 Probanden benötigt. Jeder dieser 6 Probanden erhält eine andere Reihenfolge der Bedingungen. Die kleinste sinnvolle Anzahl für diesen Fall sind 12 Probanden, mit denen man durch den abhängigen Plan bereits Effekte nachweisen kann.

Kombiniert man mehrere UV miteinander, entstehen schnell mehr Bedingungen. Bei einem 2×2 Plan mit vollständiger Messwiederholung sind vier Bedingungen vorhanden. Wird ein dritter Faktor mit ebenfalls 2 Stufen eingeführt, so erhöht sich die Anzahl auf 8. Ein 3×3 Plan enthält 9 Bedingungen usw. Hier ist es meist nicht mehr möglich, alle denkbaren Reihenfolgen in einer vollständigen Permutation darzubieten. Eine Alternative ist hier die Technik des Lateinischen Quadrats, bei der jeder Proband alle Bedingungen erhält und die Reihenfolgen so gewählt werden, dass über die verschiedenen Probanden hinweg jede Bedingung zu jedem Zeitpunkt gleich häufig ist. Damit können zwar nicht alle Abfolgeeffekte kontrolliert werden, aber die einfachen Zeiteffekte. Bei dieser Technik werden ebenfalls Vielfache der Bedingungszahl benötigt. Bei vier Bedingungen (wie in Abb. 12.3) dargestellt, benötigt man also mindestens 4 Probanden. Das Basis-Quadrat für diesen Fall ist im mittleren Bereich der Abbildung dargestellt. Um hier eine gewissen Zufälligkeit einzuführen, erzeugt man dann eine zufällige Abfolge der vier Zeitpunkte, im Beispiel 2 / 4 / 1 / 3. Man sortiert dann im zwei-

Tab. 12.3 Vorteile von unabhängigen Plänen und Plänen mit Messwiederholung.

Unabhängige Pläne	Messwiederholung
Unempfindlich gegenüber Lern- und Ermüdungseffekte	Nur wenige Probanden werden benötigt
Wenn ein Effekt entdeckt wird, ist dieser besser replizierbar und bedeutsam	Bereits kleine Effekte können entdeckt werden

ten Quadrat die Spalten in dieser Reihenfolge. Die ursprüngliche Spalte 2 wird die neue Spalte 1 usw. Gleiches macht man dann mit den Zeilen, wo hier z. B. die Reihenfolge 4 / 1 / 3 / 2 gezogen wurde. Also ist die neue Zeile 1 die alte Zeile 4 usw. Diese Prozedur wiederholt man für alle Vierergruppen von Probanden, die untersucht werden sollen. Auch hier sind 12 Probanden die Untergrenze dessen, was in diesem abhängigen Plan sinnvoll erscheint. Für 5 und mehr Bedingungen lassen sich weitere Quadrate entsprechend erstellen.

Die Vorteile von unabhängigen Plänen und Plänen mit Messwiederholung sind in Tab. 12.3 dargestellt. Unabhängige Pläne sind unempfindlich gegenüber Lern- und Ermüdungseffekten. Bedingt durch die größeren Unterschiede zwischen den Probanden können Effekte nicht so leicht entdeckt werden wie in abhängigen Plänen. Dafür sind diese Effekte robuster, können besser repliziert werden und sind eher bedeutsam. Bei abhängigen Plänen werden wesentlich weniger Probanden benötigt und bereits kleine Effekte können entdeckt werden. Dafür können Zeiteffekte die Wirkungen der UV beeinflussen und die Effekte sind möglicherweise auf die spezielle Stichprobe begrenzt und damit schlecht auf andere Personen übertragbar. Je nach Fragestellung und praktischen Rahmenbedingung ist entsprechend abzuwägen, welcher Plan gewählt werden sollte.

Um das Vorgehen und den Versuchsplan für die Leser der entsprechenden Berichte gut verständlich zu machen, bietet sich eine schematische Darstellung an. Abbildung 12.4 zeigt ein Beispiel für einen dreifaktoriellen Plan. Als erste UV wird das Fahreralter in zwei Stufen untersucht, wobei junge und alte Fahrer unterschieden werden. Weiter gibt es als UV 2 den Warnton mit den Bedingungen „ohne“ und „mit“. Schließlich wird als dritte UV der Ort der Warnung in drei Stufen untersucht, wobei jeder Proband alle drei Orte erlebt (Messwiederholung). Neben den UV erkennt man in den Zellen die Probandenzahl. Über die Nummerierung wird deutlich, an welcher Stelle eine Messwiederholung eingeführt wurde und wo unabhängige Gruppen untersucht werden. Da die UV 3 mit Messwiederholung untersucht wird, wurde hier eine vollständige Permutation mit 12 Probanden eingesetzt.

Die Darstellung des Versuchsplans ist auch deshalb so wichtig, da sich daraus unmittelbar die Fragestellungen des Versuchs ableiten lassen. Wie oben dargestellt, soll geprüft werden, inwieweit die UVs zu einer systematischen Veränderung der AVs führen. Vergleicht man eine UV mit zwei Stufen (ohne und mit Warnton), so stellt sich die Frage, ob sich die Kennwerte der entsprechenden beiden Gruppen unterscheiden (siehe Tab. 12.4). Bei drei Stufen der UV kann man einerseits untersuchen, ob die UV überhaupt zu Unterschieden zwischen den drei Gruppen führt. Weiter ist man daran interessiert, welche der Gruppen sich voneinander unterscheiden.

Komplexer wird es bei zwei und mehr UV. Bei zwei UV ist man einerseits an der Wirkung jedes einzelnen Faktors interessiert, andererseits am Zusammenwirken der Faktoren. Wirkt der Warnton anders, wenn er mit dem HUD kombiniert ist als mit dem Kombidisplay? Einen solchen Effekt bezeichnet man als Wechselwirkung. Entsprechendes gilt für dreifaktorielle Pläne, wo zu den einzelnen Wirkungen und Zweifach-Wechselwirkungen noch die Wechselwirkung zwischen allen drei Faktoren hinzukommt. Diese zunehmende Komplexität führt dazu, dass bereits die Ergebnisse vierfaktorieller Pläne in der Praxis nur schwer zu interpretieren sind und man von da her nur empfehlen kann, sich auf die relevantesten drei UV pro Untersuchung zu konzentrieren und im Zweifel lieber mehrere Untersuchungen durchzuführen. Diese Probleme der Interpretation werden in ▶ Abschn. 12.3.2 ausführlicher dargestellt. Vorher ist es jedoch wichtig, die statistische Absicherung der Ergebnisse unter dem Stichwort „Signifikanztests“ darzustellen.

Abb. 12.4 Beispiel für einen dreifaktoriellen Versuchsplan mit Messwiederholung auf dem Faktor „Ort der Warnung".

		UV 1 "Fahreralter"			
		Junge Fahrer		Alte Fahrer	
		UV 2 "Warnton"			
		Ohne	Mit	Ohne	Mit
UV 3 "Ort der Warnung"	HUD	VP 1..12	VP 13..24	VP 25..36	VP 37..48
	Kombi	VP 1..12	VP 13..24	VP 25..36	VP 37..48
	Mittelkonsole	VP 1..12	VP 13..24	VP 25..36	VP 37..48

Tab. 12.4 Versuchspläne und dazugehörige Fragestellungen. Zur weiteren Erklärung, s. Text.

Versuchsplan	Fragestellungen
1 UV, 2 Stufen	Unterscheiden sich die beiden Gruppen?
1 UV, 3 und mehr Stufen	Wirkt die UV? Welche Gruppen unterscheiden sich?
2 UV	Wirkt die UV 1? Wirkt die UV 2? Wirkt die UV 1 anders je nach Ausprägung von UV 2 und umgekehrt? (Wechselwirkung)
3 UV	Wirkt UV 1, UV 2 und UV 3? Gibt es eine Wechselwirkung zwischen UV 1 und UV 2, UV 1 und UV 3 oder UV 2 und UV 3? Gibt es eine Wechselwirkung zwischen den drei UV?

12.3.2 Statistik – Signifikanztests

Warum ist für die Untersuchung von Unterschieden zwischen verschiedenen Bedingungen überhaupt eine Untersuchung mit mehreren Probanden notwendig? Die Ursache liegt in der oben dargestellten Unterschiedlichkeit von Personen. Nicht jeder reagiert z. B. mit derselben Schnelligkeit, so dass sich bei einer Gruppe von Personen immer eine Verteilung der Messwerte ergibt, obwohl sie unter denselben Bedingungen untersucht werden. Daraus folgt aber auch, dass beim Vergleich zweier Gruppen immer Unterschiede auftreten werden, auch wenn die Gruppen gleich behandelt werden. Wenn die Gruppen unterschiedlich behandelt werden, ergibt sich die Frage, ob die gefundenen Unterschiede durch den Zufallsfehler zu erklären sind oder systematisch als Wirkung der untersuchten Einflussfaktoren entstehen. Diese Frage untersucht die Statistik mit Hilfe von Signifikanztests. Im Wesentlichen wird mit diesen folgende Frage beantwortet:

- Frage der Statistik: Sind die gefundenen Unterschiede zwischen den verschiedenen Bedingungen so groß, dass von einem Effekt der untersuchten Einflussfaktoren auszugehen ist?

Um diese Frage zu beantworten, wird sie etwas anders formuliert:

- Wie wahrscheinlich sind die gefundenen Unterschiede unter der Annahme, dass nur der Zufall wirkt, nicht aber die untersuchten Einflussfaktoren?

Der Vorteil dieser Formulierung liegt darin, dass die darin beschriebene Annahme in ein statistisches Modell umgesetzt werden kann. Nimmt man an, dass nur Zufall wirkt, kann man damit eine Verteilung möglicher Unterschiede erstellen („Welche Ergebnisse würde man finden, wenn man die Untersuchung 100 Mal wiederholt?"). Hat man z. B. in zwei Gruppen je 10 Probanden untersucht und deren Reaktionszeit gemessen, kann man

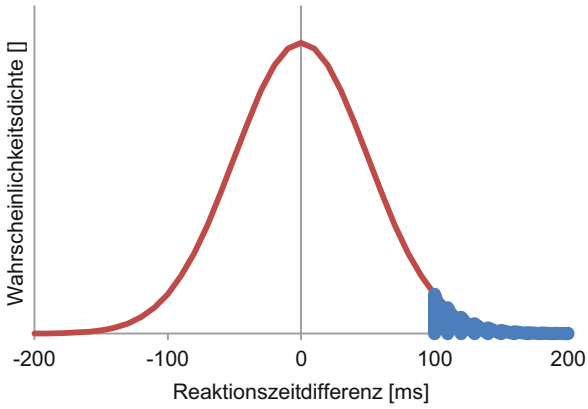


Abb. 12.5 Beispiel für eine Zufallsverteilung von Reaktionszeitdifferenzen. Ausgefüllt dargestellt ist der Bereich, in dem die tatsächlich gefundene Reaktionszeitdifferenz und extremere Differenzen liegen.

diese 20 Messwerte per Zufall zwei Gruppen von je 10 Messwerten zuweisen und den Unterschied zwischen den Mittelwerten der beiden Gruppen berechnen. Wiederholt man dies hinreichend häufig, erhält man eine Verteilung möglicher Unterschiede unter der Annahme, dass nur der Zufall (in diesem Fall die zufällige Verteilung auf zwei Gruppen) gewirkt habe. Eine solche Verteilung ist in Abb. 12.5 dargestellt. Man erkennt, dass unter Zufallsbedingungen gleiche Ergebnisse in beiden Gruppen relativ häufig sind (Reaktionszeitdifferenz = 0), während große Abweichungen in positive und negative Richtung jeweils seltener sind.

Mit Hilfe dieser Zufallsverteilung kann jetzt die oben gestellte Frage beantwortet werden, indem angegeben wird, wie wahrscheinlich die konkret im Versuch gefundene Differenz unter Zufallsbedingungen auftritt. Man nimmt dafür die Wahrscheinlichkeit von dieser und extremeren Differenzen, was der Fläche unter der Kurve entspricht. Dies ist in der Abb. 12.5 entsprechend ausgefüllt dargestellt. Um nun zu entscheiden, ob dieses Ergebnis dafür spricht, dass tatsächlich die Einflussgröße gewirkt hat, wird eine 0 eingeführt:

- Wenn der gefundene Unterschied unter Zufallsbedingungen extrem unwahrscheinlich ist, dann geht man davon aus, dass die Einflussgröße gewirkt hat, also der Unterschied systematisch und nicht zufällig ist.

Für die Entscheidung, ob etwas unwahrscheinlich ist, legt man ein sog. Signifikanzniveau α fest:

- „Unwahrscheinlich“ oder „signifikant“ entspricht in der Regel einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5\,\%$.

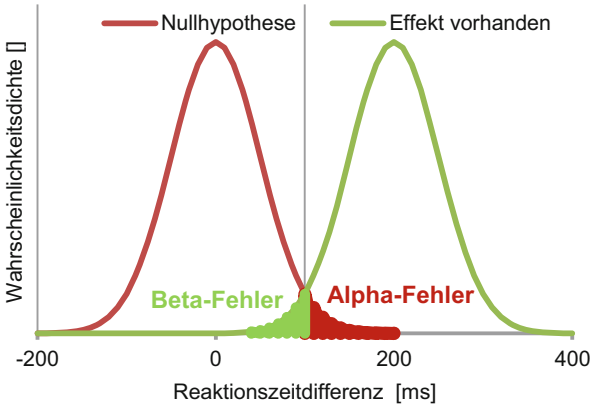
Man findet teilweise auch die Konvention, ein $\alpha = 1\,\%$ zu verwenden. Hier spricht man häufig von „hoch signifikanten“ Ergebnissen. Die verschiedenen Signifikanztests (s. u.) geben nun die Wahrscheinlichkeit des gefundenen Ergebnisses unter Zufallsbedingungen an, in der Regel als relative Häufigkeit von z. B. $p = 0.023$. Da dieses p kleiner ist als das Signifikanzniveau α (was in der Regel in Prozent angegeben wird), entscheidet man, dass das Ergebnis durch Zufall nicht gut erklärt werden kann, d. h. der Einflussfaktor hat gewirkt oder „das Ergebnis ist signifikant“. Zusammenfassend bedeutet damit ein signifikantes Ergebnis, dass dieses nur sehr schlecht durch Zufall zu erklären ist. Ein Beweis der Wirkung im ganz strengen Sinn ist damit natürlich nicht möglich, da immer ein gewisser Rest von Unsicherheit bleibt – auch unter Zufallsbedingungen hätte dieses Ergebnis, wenn auch sehr selten, auftreten können.

Statistisch wird die Annahme, dass nur der Zufall gewirkt habe, als Nullhypothese („H_0“) bezeichnet. Dieser wird die Alternativhypothese („H_1“) gegenübergestellt, dass eine Wirkung vorhanden sei. Dabei wird zwischen einer spezifischen und einer unspezifischen Alternativhypothese unterschieden. Die spezifische Alternativhypothese gibt die Richtung des Effekts an, z. B. dass die Reaktionszeiten mit einem neuen Warnsystem kürzer werden. Bei der unspezifischen Alternativhypothese vermutet

Abb. 12.6 Richtige und fehlerhafte Entscheidungen beim Signifikanztest. Zur weiteren Erklärung, s. Text.

	Wirklichkeit / Grundgesamtheit	
	Kein Unterschied Nullhypothese ist richtig	Effekt vorhanden Alternativhypothese ist richtig
Signifikanztest		
Signifikant	Alpha-Fehler	Richtige Entscheidung
Nicht signifikant	Richtige Entscheidung	Beta-Fehler

Abb. 12.7 Alpha- und Beta-Fehler für das Beispiel von Reaktionszeiten. Die rote Kurve zeigt die Verteilung der möglichen Ergebnisse (Unterschied zwischen den Mittelwerten der beiden untersuchten Gruppen, „Reaktionszeitdifferenz") unter der Annahme der Nullhypothese, die grüne Kurve die Verteilung möglicher Ergebnisse in der „Wirklichkeit", d. h. der Grundgesamtheit, in der ein Effekt vorhanden ist.



man demgegenüber einen Unterschied, der aber in beide Richtungen ausfallen kann. Hier wird z. B. formuliert: „Die Reaktionszeiten in der Experimentalgruppe sind anders als die der Kontrollgruppe". Der Signifikanztest kann auch als Entscheidung über diese Hypothesen verstanden werden. Ergibt sich ein signifikantes Ergebnis, so kann man die Nullhypothese verwerfen. Dies spricht dann für das Vorliegen eines Effekts. Findet man kein signifikantes Ergebnis, muss die Nullhypothese beibehalten werden. Man konnte also keinen Effekt feststellen. Dabei ist wichtig zu beachten, dass damit nicht automatisch behauptet werden kann, dass kein Effekt vorliegt. Dies hängt mit zwei Arten von Fehlern zusammen, die in Abb. 12.6 dargestellt sind und im Folgenden erklärt werden.

Die erste Art von Fehlern ist der „Alpha-Fehler". Wenn man in einem Versuch ein signifikantes Ergebnis findet, obwohl eigentlich die Nullhypothese gilt, also in Wirklichkeit (d. h. in der Grundgesamtheit) dieser Unterschied nicht vorhanden ist, entscheidet man fehlerhaft: Aufgrund des Ergebnisses des Signifikanztests schließt man, dass ein Effekt vorliegt, was aber nicht stimmt. Dies ist in Abb. 12.7 grafisch dargestellt. Wenn die Nullhypothese richtig ist, sind die möglichen Ergebnisse von Studien entsprechend der roten Kurve verteilt. Findet man in einer Studie eine Reaktionszeitdifferenz von z. B. +150 ms, die entsprechend dem statistischen Test signifikant ist, so entscheidet man sich, die Nullhypothese abzulehnen, obwohl sie in Wirklichkeit, in der Grundgesamtheit, stimmt. Man schließt also auf das Vorliegen eines Effekts, obwohl keiner vorliegt.

Um sich vor diesem Alpha-Fehler zu schützen, kann man das Signifikanzniveau kleiner wählen, z. B. 1 % statt 5 %. Damit wird die Wahrscheinlichkeit, sich fälschlicherweise für einen Effekt zu entscheiden, geringer. Eine weitere Möglichkeit ist es, den Versuch zu replizieren, d. h. unter möglichst ähnlichen Bedingungen zu wiederholen. Findet man auch bei der Wiederholung ein signifikantes Ergebnis, so ist dadurch die Wahrscheinlichkeit einer Fehlentscheidung insgesamt deutlich kleiner. Führt man z. B. zwei Untersuchungen durch und findet jeweils bei $\alpha = 5\,\%$ ein signifikantes Ergebnis, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass beide Studien signifikant werden, obwohl in Wirklichkeit kein Unterschied vorhanden ist $p = 0.05*0.05 = 0.0025$, also nur 0.25 %. Auf diese Weise kann man die Wahrschein-

lichkeit einer fehlerhaften Interpretation minimieren im Sinne der Behauptung, dass ein Unterschied vorliegt, obwohl dies in der Grundgesamtheit nicht der Fall ist. Wenn man z. B. ein neues Warnsystem im Fahrzeug einführen möchte, das allerdings mit erheblichen Kosten verbunden ist, kann man auf diese Weise absichern, dass auch tatsächlich ein Nutzen für den Fahrer damit verbunden ist.

Bei dieser Minimierung des Alpha-Fehlers ist allerdings zu bedenken, dass damit eine Erhöhung einer zweiten Art von Fehler, des sog. Beta-Fehlers, verbunden ist. Dieser ist in Abb. 12.7 mit Hilfe der grünen Kurve verdeutlicht. Diese zeigt die Verteilung von Versuchsergebnissen für den Fall, dass in der Grundgesamtheit tatsächlich ein Effekt vorhanden ist, der im Beispiel als Verlängerung der Reaktionszeiten um 200 ms zu beschreiben ist. Da in jeder Studie nur ein Teil der Grundgesamtheit untersucht wird, ist es möglich, dass aus Zufall gerade eine Stichprobe untersucht wird, in der sich dieser Effekt nicht zeigt, so dass die Reaktionszeitdifferenz z. B. nur +50 ms beträgt. Entsprechend dem in der Abbildung gezeigten Entscheidungskriterium kann dann die Nullhypothese nicht abgelehnt werden, da dieses Ergebnis auch bei Vorliegen keines Effekts recht wahrscheinlich ist. Diese fehlerhafte Entscheidung wird als Beta-Fehler bezeichnet. Hier schließt man aufgrund des Versuchsergebnisses, dass kein Effekt vorliegt, obwohl in Wirklichkeit, in der Grundgesamtheit, tatsächlich ein Unterschied festzustellen wäre. Je mehr man nun versucht, den Alpha-Fehler zu minimieren, desto größer wird der Beta-Fehler, desto weniger wird man also einen Effekt entdecken, obwohl er tatsächlich vorhanden ist.

Will man demnach sichergehen, keinen Effekt zu übersehen, ist es sinnvoll, das Signifikanzniveau Alpha relativ groß zu wählen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn man nachweisen möchte, dass zwei Varianten gleichwertig sind. Hat man z. B. ein neues Warnkonzept entwickelt, dass mit deutlich geringeren Kosten verbunden ist als eine ältere, relativ teure Lösung, so soll die Gleichwertigkeit der Varianten im Versuch demonstriert werden. In diesem Fall liegt das Interesse daran, die Nullhypothese zu bestätigen. Hier ist es dann wichtig, es nicht zu übersehen, wenn doch ein Unterschied zwischen den Varianten vorhanden ist. Üblicherweise legt man dann das Signifikanzniveau auf 25 % fest. Außerdem gibt es auch eigene Arten von Signifikanztests, die sog. Äquivalenztests, die man zum Nachweis der Gleichheit verwenden kann. Eine ausführliche Darstellung ist bei Wellek (Wellek 2010) zu finden.

Die statistische Testung auf Unterschiedlichkeit setzt damit voraus, dass Verteilungen möglicher Unterschiede unter Zufallsbedingungen vorhanden sind. Man könnte jetzt für jeden Versuchsplan mit den dort gemessenen Parametern jeweils entsprechende Zufallsverteilungen selbst erstellen, um diese statistische Abschätzung zu erreichen. Da dies relativ aufwändig wäre, transformiert man entweder die Messwerte in Ränge oder Kategorien und zieht entsprechende Tabellen zur Hilfe, die für die verschiedenen Versuchspläne erstellt wurden. Dabei ist jeweils zu berücksichtigen, wie viele Unabhängige Variablen in welchen Stufen untersucht wurden und wie viele Probanden dabei beteiligt waren. Oder man transformiert die Messwerte auf eine Weise, dass sie damit bestimmten statistischen Verteilungen entsprechen, die dann zum Ablesen der Wahrscheinlichkeiten vergleichbar wie im Beispiel in Abb. 12.5 genutzt werden. Bei der letzteren Möglichkeit spricht man von verteilungsbasierten Verfahren, während die ersten als verteilungsfreie oder nicht-parametrische Verfahren bezeichnet werden. Mit „verteilungsfrei“ ist dabei gemeint, dass auf keine theoretische Verteilung bezogen wird. Diese Bezeichnung ist deshalb nicht ganz korrekt, da eine empirisch erstellte Verteilung (z. B. von Rängen) genutzt wird. Von da her ist die Bezeichnung als nicht-parametrische Verfahren vorzuziehen, da mit „Parametern“ die wesentlichen Kenngrößen der theoretischen Verteilung (z. B. bei einer Normalverteilung Mittelwert und Standardabweichung) gemeint sind. Solche Parameter werden bei den nicht-parametrischen Verfahren nicht benötigt.

Bei der Entscheidung über das anzuwendende Verfahren ist die Datenqualität zu berücksichtigen. Verteilungsbasierte Verfahren sind erst ab Intervallniveau wirklich sinnvoll, da bei der Berechnung der Kennwerte Differenzen berechnet werden, die erst auf diesem Skalenniveau bedeutsam sind. Weiter wird eine bestimmte Stichprobengröße benötigt (z. B. mehr als 30), da erst bei größeren Stichproben die Werte hinreichend ähnlich wie diese theoretischen Verteilungen verteilt sind. Und schließ-

lich stellt sich immer die Frage, ob die Messwerte tatsächlich hinreichend ähnlich verteilt sind, wie es die theoretische Verteilung vorgibt. Teilweise kann geprüft werden, ob die empirischen Werte bestimmten Voraussetzungen entsprechen. Allerdings sind diese Tests häufig relativ empfindlich und zeigen Abweichungen von Voraussetzungen an, die aber praktisch zu keiner substanziellen Veränderung der statistischen Bewertung führen. Die nicht-parametrischen Verfahren sind auch bei den niedrigeren Skalenniveaus anwendbar, allerdings nicht ganz so sensitiv, um signifikante Effekte zu entdecken. Gerade bei mehrfaktoriellen Plänen sind nicht-parametrische Auswertungen allerdings schwierig, da die Beurteilung des Zusammenwirkens mehrerer Faktoren häufig über die Addition von Effektschätzungen geschieht, was wiederum auf Ordinalniveau nicht sinnvoll erscheint. Von da her werden in der Praxis auch häufig parametrische Verfahren eingesetzt, obwohl die Voraussetzungen anzuzweifeln sind.

Bei der Darstellung der Ergebnisse der statistischen Tests werden, um die Berechnung nachvollziehen zu können, einerseits die entsprechenden Prüfgrößen, in die man die empirischen Kennwerte umgerechnet hat, angegeben. Zum Wert der Prüfgröße selbst gehört dabei auch die Angabe der Rahmenbedingungen, was im Wesentlichen der Anzahl der untersuchten Probanden bzw. der verwendeten Messwerte entspricht. Dies verbirgt sich (in leicht transformierter Form) in den sogenannten Freiheitsgraden („degrees of freedom", df). Andererseits wird das Ergebnis des statistischen Tests als p-Wert (wie oben dargestellt) mitgeteilt.

Für die Berechnung werden spezielle Programme wie SPSS, R (als Open-Source-Variante) oder Toolboxen in Matlab verwendet. Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Tests würde den Umfang dieses Kapitels sprengen. Eine ausführliche Darstellung findet sich in entsprechenden Lehrbüchern der Statistik, z. B. bei Bortz und Schuster (2010) oder Sedlmeier und Renkewitz (2008). Einen Überblick über die wichtigsten Verfahren gibt Tab. 12.5. Die in der rechten Spalte aufgeführten Kenngrößen sind in den entsprechenden Ausgaben der Statistikprogramme zu finden. Für die Auswahl der einzelnen Tests ist einerseits zu beachten, ob ein Versuchsplan mit Messwiederholung vorliegt oder unabhängige Gruppen verglichen wurden. Im ersten Fall müssen auch die Messwerte so angeordnet werden, dass pro Proband (Zeile der Datenmatrix) Messwerte für die verschiedenen Bedingungen (Spalten der Datenmatrix) vorliegen. Bei unabhängigen Gruppen wird die Gruppenzugehörigkeit über eine eigene Variable kodiert. Weiter ist das Skalenniveau der Messungen zu beachten. Bei kleineren Stichproben (pro Gruppe $n <= 10$) sollte wenn möglich nicht-parametrisch getestet werden, da Verletzungen der Voraussetzungen der verteilungsbasierten Tests bei kleiner Stichprobe stark ins Gewicht fallen. Um die Prüfgrößen zu beurteilen, ist die Angabe der Freiheitsgrade notwendig, da die Signifikanz (Ausprägung der p-Werte) von diesen abhängt. Für die Freiheitsgrade ist entweder die Anzahl der Probanden relevant (in der Tabelle mit „n" gekennzeichnet) und/oder die Anzahl der Stufen der unabhängigen Variablen (in der Tabelle mit „k" und „l" bezeichnet. Die Freiheitsgrade sind auch in den entsprechenden Ausgaben der Statistikprogramme zu finden.

Die Interpretation der statistisch signifikanten Effekte ist bei dem Vergleich zweier Gruppen einfach – diese beiden Gruppen unterscheiden sich. Werden mehrere Stufen einer UV untersucht, so gibt die Testgröße an, ob sich zumindest zwei der untersuchten Gruppen unterscheiden. Man kann dann entweder grafisch entscheiden, wo die Unterschiede liegen, oder entsprechende paarweise Vergleiche vornehmen, um dies statistisch zu entscheiden. Diese paarweisen Vergleiche werden in der Regel von den Statistikprogrammen automatisch durchgeführt.

Interessant ist weiter die Interpretation von Ergebnissen der zwei- und mehrfaktoriellen Varianzanalysen. Dort wird für die Hauptwirkungen, d. h. die Wirkungen der einzelnen untersuchten Faktoren, jeweils angegeben, ob der entsprechende Faktor unabhängig von den Ausprägungen der anderen Faktoren zu signifikanten Unterschieden führt. Weiter werden die Wechselwirkungen zwischen je zwei Faktoren und je nach Versuchsplan auch zwischen drei und mehr Faktoren geprüft. Liegen Wechselwirkungen vor, sind die Hauptwirkungen je nach Richtung der Effekte teilweise nicht mehr zu interpretieren. Dies wird im folgenden Kapitel beispielhaft dargestellt.

Tab. 12.5 Überblick über wichtige statistische Verfahren und die Darstellung der Testergebnisse.

Versuchsplan	Test	Skalenniveau	Messwiederholung?	Ergebnisformulierung
1 UV, 2 Stufen	t-Test für unabhängige Stichproben	Intervallniveau	ohne	$t(18) = 2.3$, $p = 0.017$
	t-Test für abhängige Stichproben	Intervallniveau	mit	$t(9) = 3.5$, $p = 0.003$
	U-Test	Ordinalniveau Verteilungsfrei	ohne	$U(9) = 14$, $p = 0.009$
	Wilcoxon-Test	Intervallniveau Verteilungsfrei	mit	$T(10) = 10$, $p = 0.042$
	Vorzeichen-Test	Ordinalniveau Verteilungsfrei	mit	$x(10) = 1$, $p = 0.011$
	Chi-Quadrat-Test	Nominalniveau	ohne	$X^2 = 5.05$, $p = 0.025$
	McNemar-Test (2 Kategorien)	Nominalniveau	mit	$X^2 = 4.5$, $p = 0.033$
1 UV, 3 und mehr Stufen	Einfaktorielle Varianzanalyse	Intervallniveau	ohne/mit	$F(2,27) = 4.7$, $p = 0.03$
	H-Test	Ordinalniveau	ohne	$H(1) = 7.06$, $p = 0.007$
	Friedman-Rangvarianzanalyse	Ordinalniveau	mit	$X^2r^{(2)} = 6.1$, $p = 0.047$
	Chi-Quadrat-Test	Nominalniveau	ohne	$X^2(3) = 12.5$, $p = 0.005$
	Q-Test von Cochran (2 Kategorien)	Nominalniveau	mit	$Q(3) = 8.3$, $p = 0.003$
2 UV	Varianzanalyse	Intervallniveau	ohne/mit	HW UV 1: $F(1,30) = 4.7$, $p = 0.038$ HW UV 2: $F(2,30) = 5.2$. $p = 0.011$ WW $F(2,30) = 4.4$, $p = 0.021$

Eine zentrale Eigenschaft der statistischen Tests kann abschließend an der Verteilung in Abb. 12.5 beschrieben werden. Je weniger die Differenzwerte streuen, umso schmaler ist diese Verteilung und umso eher wird man entscheiden, dass eine bestimmte Differenz unter Zufallsbedingungen sehr unwahrscheinlich ist. Das hat die Folge, dass man mit größeren Stichproben bereits kleinere Effekte entdeckt. Je größer die Stichprobe, desto zuverlässiger und genauer wird der wahre Wert der Gruppe geschätzt (s. o.). Damit ist auch die Differenz der Werte der beiden Gruppen weniger fehlerbehaftet, streut also in der Verteilung weniger. Dies wird bei den parametrischen Tests auch dadurch berücksichtigt, dass bei der Berechnung einer entsprechenden Prüfgröße in der Regel ein Maß für die Unterschiedlichkeit der Gruppen (z. B. die Differenz der Gruppenmittelwerte) in Relation zur den Messfehlern (z. B. der gepoolten Varianz innerhalb der Gruppen) gestellt wird. Besonders deutlich wird das bei der Prüfgröße der Varianzanalyse, wo der F-Wert (die Prüfgröße) ein Bruch aus Primärvarianz und Fehlervarianz ist. Primärvarianz beschreibt dabei die Unterschiedlichkeit der Messwerte, die durch die unterschiedlichen unabhängigen Variablen entsteht, Fehlervarianz die zufälligen Unterschiede zwischen den Probanden.

Neben der Vergrößerung der Stichprobe, um so die Unterschiede mit geringerem Messfehler zu erfassen, ergibt sich damit eine zweite Möglichkeit

der Versuchsplanung, um signifikante Effekte besser zu erkennen. Dazu verwendet man entweder homogene Gruppen von Probanden, um so die Fehlervarianz zu minimieren, oder vergleicht jeden Probanden unter unterschiedlichen Bedingungen mit sich selbst (abhängige Versuchspläne bzw. Versuchspläne mit Messwiederholung). Damit ist auch von der statistischen Seite her zu begründen, warum Versuchspläne mit Messwiederholung sehr gut bereits kleine Effekte entdecken können und das auch, wenn nur relativ wenige Probanden untersucht werden.

Mit der statistischen Absicherung von Effekten hängt auch die Überlegung der angemessenen Stichprobengröße zusammen. Mit dem Begriff der „Teststärke" (auch „Trennschärfe" oder Englisch „Power") wird beschrieben, wie gut ein statistischer Test dafür geeignet ist, einen vorhandenen Effekt auch statistisch nachzuweisen. Dabei ist die Teststärke eines Tests zu berechnen als Teststärke $= 1 - \beta$, wobei β der oben beschriebene Beta-Fehler ist. Je größer also die Wahrscheinlichkeit ist, einen Effekt fälschlicherweise abzulehnen, umso kleiner ist die Teststärke, also die Fähigkeit eines Tests, einen tatsächlich vorhandenen Effekt auch nachzuweisen. Als Untersucher ist man entsprechend daran interessiert, einen möglichst trennscharfen Test einzusetzen. Zum Beispiel sind die parametrischen Tests in der Regel trennschärfer als verteilungsfreie Verfahren. Die wesentliche Bestimmungsgröße für die Trennschärfe ist allerdings die Stichprobengröße. Je mehr Personen untersucht werden, umso eher kann man auch kleinere Effekte statistisch absichern. Wenn man weiß, wie sich die Messwerte verteilen, mit denen man über die Wirkung entscheidet, und wie groß der untersuchte Effekte in Wirklichkeit ist, dann kann man bereits vor der Untersuchung abschätzen, wie viele Probanden benötigt werden, um diesen Effekt statistisch nachweisen zu können. In der Regel kennt man allerdings vor Beginn einer Studie die Effektgröße nicht (sonst bräuchte man die Studie auch nicht). Man kann dann auf Konventionen zurückgreifen und sich mit Hilfe entsprechender Programme für den dem Versuchsplan entsprechenden Test Schätzwerte für geeignete Stichprobengrößen z. B. für kleine, mittlere und große Effekte berechnen lassen. Ein in diesem Kontext sehr häufig verwendetes Programm ist das frei verfügbare G*Power (Faul et al. 2009). Eine Abschätzung einer sinnvollen Stichprobengröße vor Beginn der Untersuchung ist sehr sinnvoll, um so sicherzustellen, dass man mit der gewählten Anzahl von Probanden einen relevanten Unterschied überhaupt nachweisen kann.

12.3.3 Statistik – Darstellung der Ergebnisse

Der Signifikanztest ermöglicht nur die Aussage darüber, ob die unabhängige Variable gewirkt hat. Dies ist die notwendige Voraussetzung dafür, dass Unterschiede überhaupt interpretiert werden dürfen. Ist der Test nicht signifikant, so könnten die gefundenen Unterschiede auch zufällig entstanden sein und sollten daher nicht als Effekte beschrieben werden. Von da her ist der erste Schritt bei der Interpretation der Effekte die Angabe darüber, an welcher Stelle überhaupt Effekte aufgetreten sind. Dazu werden die Ergebnisse der statistischen Tests entsprechend Tab. 12.5 aufgeführt. Bei sehr vielen abhängigen Variablen oder komplexen Versuchsplänen kann hier eine tabellarische Darstellung sinnvoll sein. Tabelle 12.6 zeigt ein Beispiel für eine zweifaktorielle Varianzanalyse. Im Vergleich von Navigationssystem und der Auswahl einer Telefonnummer (UV 2: System) wurde der Unterschied zwischen sprachlicher und manueller Bedienung (UV 1: Modalität) untersucht. Gemessen wurde die Standardabweichung der Abweichung von der Idealspur (SDLP) und eine Reaktionszeit auf Straßenschilder, die ein Lenken erforderten. Man findet jeweils die F- und p-Werte der Varianzanalyse. Da die Freiheitsgrade für die Tests jeweils gleich waren, sind diese in Klammern hinter dem F-Wert angegeben. Die signifikanten Ergebnisse bei $\alpha = 5\,\%$ sind fett dargestellt. Man erkennt, dass bei der SDLP beide Hauptwirkungen und die Wechselwirkung signifikant sind, bei der Reaktionszeit die Hauptwirkung der Modalität und die Wechselwirkung.

Ausgehend von einem solchen Ergebnis werden dann die signifikanten Effekte grafisch oder tabellarisch dargestellt und beschrieben. Die beste Art der Darstellung, gerade bei zweifaktoriellen Versuchsplänen, ist die Liniengrafik, da diese die unterschiedlichen Interpretationsmöglichkeiten am deutlichsten sichtbar macht. Bei zweifaktori-

Tab. 12.6 Beispiel für eine tabellarische Darstellung der Ergebnisse einer zweifaktoriellen Varianzanalyse. Beim F-Wert sind die Freiheitsgrade in Klammern angegeben. SDLP ist die Standard Deviation of Lane Position, die Standardabweichung der Abweichung von der Idealspur.

	UV 1 Modalität: Sprache vs. Manuell		UV 2 System: Navigation vs. Telefonnummer		Wechselwirkung Modalität x System	
	F (1,29)	p	F (1,29)	p	F (1,29)	p
SDLP	***9.1***	***0.005***	***4.6***	***0.040***	***5.2***	***0.029***
Reaktionszeit	***56.9***	***0.000***	0.9	0.345	***11.3***	***0.002***

ellen Versuchsplänen sind zwei Arten der Darstellung möglich, die in Abb. 12.8 gezeigt sind. Auf der linken Seite stellt die blaue Linie das Navigationssystem dar, die rote das Telefon. Man erkennt, dass bei beiden Systemen die Linien nach unten verlaufen, d. h. die SDLP ist kleiner bei sprachlicher Bedienung. Mit Sprache wird demnach die Spur besser gehalten. Diese Beschreibung entspricht dem Haupteffekt der UV 1 „Modalität". Man erkennt weiter, dass für die UV 2 „System" kein Haupteffekt vorhanden ist, da das Navigationssystem bei manueller Bedienung zu größerer SDLP führt, während bei sprachlicher Bedienung keine Unterschiede zu sehen sind. Damit ist der Haupteffekt dieser UV nicht zu interpretieren, obwohl er signifikant ist. Diese unterschiedliche Wirkung des Systems in Abhängigkeit von der Modalität entspricht der signifikanten Wechselwirkung: Die Wirkung der einen UV ist nur in Abhängigkeit der anderen UV zu interpretieren. Jede Wechselwirkung kann in zwei Richtungen interpretiert werden: Als Wirkung der UV 1 in Abhängigkeit der Stufen der UV 2 und umgekehrt. Am Beispiel: Die Verbesserung der SDLP durch sprachliche Bedienung ist für das Navigationssystem deutlich stärker als für das Telefon (Interpretation 1). Bei manueller Bedienung ist die SDLP beim Navigationssystem deutlich schlechter als beim Telefon. Bei sprachlicher Bedienung ist dieser Unterschied nicht zu finden (Interpretation 2). Beide Interpretationen sind in der linken Seite der Abb. 12.8 gut zu erkennen. Betrachtet man die rechte Seite der Abbildung, so steht hier die zweite Interpretation stärker im Vordergrund. Die rote Linie ist parallel zur x-Achse, während die blaue Linie fällt. Je nachdem, welche Effekte signifikant und für den Leser bedeutsam sind, kann die rechte oder linke Abbildung sinnvoller sein.

Abbildung 12.9 zeigt die Ergebnisse zur Reaktionszeit. Hier waren die Hauptwirkung der Modalität und die Wechselwirkung signifikant. Man erkennt, dass die Reaktionszeit bei sprachlicher Interaktion kürzer ist als bei manueller Bedienung. Bei der Wechselwirkung sieht man, dass die Interaktion mit dem Navigationssystem stärker von der sprachlichen Bedienung profitiert als die Bedienung des Telefons. Oder: Bei manueller Bedienung leidet die Reaktionszeit stärker durch das Navigationssystem. Bei sprachlicher Bedienung ist das Telefon etwas schlechter.

Dieses etwas ausführliche Beispiel verdeutlicht die unterschiedliche Rolle der statistischen Testergebnisse und der Beschreibung der Ergebnisse. Nicht jedes statistisch signifikante Ergebnis ist auch zu interpretieren, wie das Beispiel der SDLP zeigt. Für die Interpretation ist eine grafische Beschreibung der Daten notwendig. Allerdings dürfen in den Grafiken nur die Effekte interpretiert werden, die auch tatsächlich signifikant waren. Von da her ist eine überlegte Auswahl der richtigen Darstellungsart sehr wichtig.

Grundsätzlich können bei zweifaktoriellen Versuchsplänen unterschiedliche Arten von Wirkungsmustern auftreten, die häufig falsch interpretiert werden. Abbildung 12.10 zeigt die wichtigsten Arten von Effekten im Überblick. Bei dem Beispiel handelt es sich um einen fiktiven Versuch, bei dem Unterhaltungslektüre bzw. ein Fachbuch jeweils entweder digital oder auf Papier gelesen wurde. Bewertet wurde die Schnelligkeit des Lesens als Leistungsgüte. Dabei sind folgende vier Fälle wichtig:

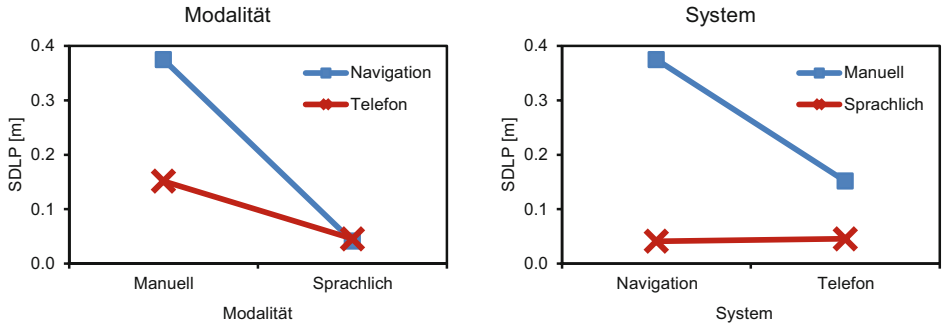


Abb. 12.8 Darstellung der Effekte für das Beispiel aus Tab. 12.6. Dargestellt sind die Mittelwerte. Zur Erklärung, s. Text

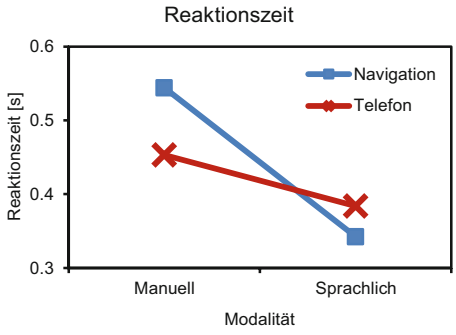


Abb. 12.9 Ergebnisse zur Reaktionszeit für das Beispiel aus Tab. 12.6. Dargestellt sind die Mittelwerte. Zur Erklärung, s. Text

- Nur Hauptwirkungen: Links oben erkennt man, dass die Leistung auf Papier für beide Textarten besser ist. Weiter erkennt man, dass die Leistung für die Unterhaltungslektüre besser ist. Hier findet man demnach die beiden Hauptwirkungen, aber keine Wechselwirkung.
- Disordinale Wechselwirkung: Rechts oben wird deutlich, dass keine Hauptwirkung interpretierbar ist, selbst wenn sie signifikant wäre. Der Effekt der Art der Lektüre hängt ab vom Medium. Beim digitalen Medium ist die Unterhaltung besser, auf Papier die Fachlektüre. Umgekehrt ist der Effekt des Mediums damit abhängig von der Art der Lektüre. Digital ist besser für Unterhaltungslektüre, Papier besser für Fachbücher. Hier ist demnach nur die Wechselwirkung zu interpretieren.
- Ordinale Wechselwirkung: Links unten ist zu erkennen, dass beide Hauptwirkungen und die Wechselwirkung zu interpretieren sind. Auf Papier wird besser gelesen und Unterhaltungslektüre wird schneller gelesen (Hauptwirkungen). Weiter ist der Vorteil der Unterhaltungslektüre auf Papier stärker als bei einem digitalen Medium. Oder: der Effekt des Papiers ist bei der Unterhaltungslektüre stärker als bei einem Fachbuch (Wechselwirkung).
- Semi-Disordinale Wechselwirkung: In dem rechts unten dargestellten Fall darf die Hauptwirkung des Bearbeitungsmediums interpretiert werden. Auf Papier ist die Leistung besser als digital. Die Art der Lektüre hat keinen einheitlichen Effekt und kann so als Hauptwirkung nicht interpretiert werden. Die Wechselwirkung ist wiederum interpretierbar, wenn sie signifikant ist. Der Effekt des Mediums ist für Unterhaltungslektüre stärker als für Fachbücher. Auf einem digitalen Medium liest sich das Fachbuch besser, während auf Papier die Unterhaltungslektüre besser zu lesen ist.

Diese Beispiele machen deutlich, dass der wissenschaftliche Gehalt nicht im Signifikanztest steckt, sondern in der grafischen oder tabellarischen Darstellung der Messwerte. Der Signifikanztest ist notwendig für die Entscheidung, was interpretiert werden darf. Mit der entsprechenden Darstellung wird dann für den Leser deutlich, was die Effekte bedeuten. Eine Auflistung der Ergebnisse der Signifikanztests ist wertlos ohne deskriptive Statistik und Grafiken.

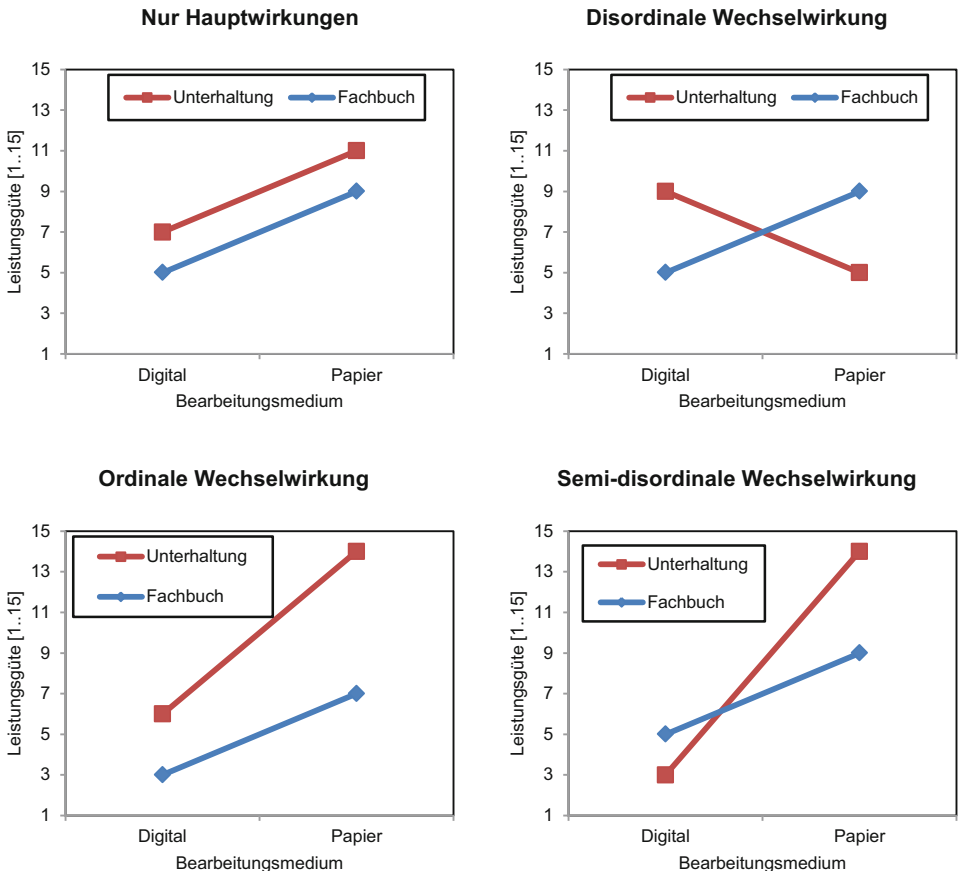


Abb. 12.10 Übersicht über Arten von Wechselwirkungen. Zur Interpretation, s. Text.

Eine weitere sinnvolle Art der Darstellung erfolgt über Balkengrafiken. Häufig werden hier Mittelwerte und Standardabweichungen dargestellt (siehe Abb. 12.11). Nebeneinanderstehende Balken sind sehr gut für direkte Vergleiche geeignet. Die Standardabweichungen sind hilfreich, um die Größe der Unterschiede zu relativieren. Wie oben dargestellt, wird bei der statistischen Prüfung der Effekt mit einem Maß des Zufallsfehlers verglichen, um so die Signifikanz zu untersuchen. Dies ist in gewisser Weise analog der Darstellung der Mittelwerte und der Standardabweichung.

Insgesamt ist bei Grafiken zu beachten, dass diese die relevante Information gut leserlich enthalten. Achsen müssen stets sinnvoll und mit Angabe von Einheiten beschriftet sein. Abzuraten ist von Hilfslinien, farbigen Hintergründen, 3-D-Darstellungen usw., da hier die Datenpunkte gegenüber den grafischen Gestaltungselementen in den Hintergrund geraten und dann häufig schlecht erkennbar sind. Auch vor diesem Hintergrund sind Liniengrafiken eine sehr effektive Möglichkeit der Darstellung.

12.4 Externe und interne Validität

Bei der Beschreibung der zwei zentralen statistischen Ansätze wurde eine Gemeinsamkeit deutlich. Bei beiden ist eine wesentliche Frage die der Repräsentativität der Ergebnisse. Dies wird auch als „externe Validität", also äußere Gültigkeit oder Übertragbarkeit bezeichnet. Diese hängt vor allem von der Ziehung einer geeigneten Stichprobe ab. Immer dann, wenn nicht nur Aussagen über direkt zu messende Größen gemacht werden sollen, sondern

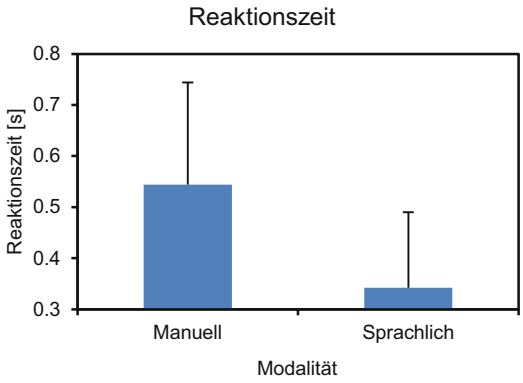
diese indirekt erschlossen werden, ergibt sich hier ein zweiter Aspekt der Validität: Sind die Merkmale valide, messen sie wirklich das, was sie messen sollen? Welche Frage muss man einem Fahrer stellen, um vorhersagen zu können, dass er ein bestimmtes Fahrzeug kaufen wird? Dieser Aspekt der externen Validität wird im ▶ Abschn. 11.1.1 ausführlicher dargestellt. Hinzu kommt ein dritter Aspekt der externen Validität, der sich aus der Untersuchungssituation ergibt. Sind die Daten, die man z. B. in einem Fahrsimulator gewonnen hat, repräsentativ für das Fahren im eigenen Fahrzeug im normalen Verkehr? Hier geht es einerseits um die Realitätsnähe der Untersuchung, andererseits um die Einstellung der Teilnehmer. Je besser es gelingt, bei diesen ein Verständnis für den Sinn und Zweck der Untersuchung zu vermitteln, umso mehr werden sie in der Lage sein, sich „normal" zu verhalten. Die Instruktion, die Aufklärung über die Ziele des Versuchs, spielt hier eine ganz zentrale Rolle.

Allerdings kann es unter bestimmten Umständen auch notwendig sein, die Versuchsteilnehmer im Vorfeld nicht richtig zu informieren. Wenn z. B. die Wirkung eines Kollisionswarnsystems untersucht werden sollte, ist es wichtig, dass die Fahrer von einem kritischen Ereignis ähnlich überrascht werden, wie dies im realen Verkehr der Fall ist. Deshalb kann es notwendig sein, über eine Cover-Story die Aufmerksamkeit der Fahrer abzulenken, um so einen Überraschungseffekt auch im Fahrsimulator erzielen zu können. Aus ethischen Gründen sind die Teilnehmer nach dem Versuch ausführlich aufzuklären. Sie müssen auch die Möglichkeit haben, ihre Daten vom Versuch auszuschließen. Prinzipiell ist jede Täuschung ethisch bedenklich und ihr Einsatz gründlich abzuwägen.

Zusammenfassend werden damit drei Aspekte der externen Validität unterschieden:

- Repräsentative Stichprobe
- Valide Messmethoden
- Realitätsnahe Situationen mit „normalem" Verhalten

Bei der zweiten Art von statistischen Fragestellungen, der Suche nach der Wirkung von Einflussfaktoren, kommt außerdem die „interne Validität" hinzu. Dabei geht es darum, ob eine gefundene Wirkung tatsächlich zweifelsfrei auf den Einfluss der unabhängigen Variablen zurückzuführen ist. Dies ist von der Logik des Experiments nur dann möglich, wenn sich die untersuchten Gruppen nur in der unabhängigen Variablen unterscheiden, ansonsten aber völlig identisch behandelt werden. Wie oben beschrieben, ist dies immer dann ein Problem bei Plänen mit Messwiederholung, wenn Ermüdung oder Übung vorliegen kann. Wenn z. B. die Fahrt mit dem visuellen Warnsystem immer die zwei Fahrt wäre, könnte auch ein Übungseffekt die bessere Reaktionszeit erklären. Um sicherzustellen, dass die Wirkung tatsächlich auf die UV zurückzuführen ist, wird man deshalb immer die Reihenfolge der Behandlungen permutieren (siehe ◘ Abb. 12.3). Die interne Validität hängt damit davon ab, wie gut es gelingt, den Einfluss von Störvariablen auszuschalten bzw. in den verschiedenen Bedingungen konstant zu halten. Dies ist der Grund dafür, den Versuchsablauf inklusive der Instruktionen möglichst stark zu standardisieren, um so eine vergleichbare Behandlung aller Teilnehmer sicherzustellen. Letztlich kann die interne Validität aber nicht durch einen Ablaufplan garantiert werden. Als Untersucher sollte man sich immer fragen, ob ein bestimmtes Ergebnis nicht auch durch andere Faktoren erklärt werden könnte als durch den Einfluss der unabhängigen Variablen. Diese kritische Denkweise ist eine wesentliche Voraussetzung für gute Forschung.



◘ **Abb. 12.11** Mittelwert der Reaktionszeit und Standardabweichung in Abhängigkeit der Modalität.

Literatur

Bortz, J., Schuster, C.: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler (Lehrbuch mit Online-Materialien). Springer, Berlin (2010)

Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A., Lang, A.-G.: Statistical power analyses using G*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. Behavior Research Methods **41**, 1149–1160 (2009)

Sedlmeier, P., Renkewitz, F.: Forschungsmethoden und Statistik in der Psychologie. Pearson, München (2008)

Wellek, S.: Testing statistical hypotheses of equivalence and noninferiority, 2. Aufl. Taylor & Francis, Boca Raton (2010)

Ausblick

Klaus Bengler, Heiner Bubb

13.1 Elektromobilität – 686
13.2 Automation – 687
13.3 Mobilitätsverhalten – 688
Literatur – 688

H. Bubb et al., *Automobilergonomie,* ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-8348-2297-0_13, © Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

In den vorangegangenen Kapiteln wurde eine Vielzahl von Gestaltungsaspekten der Ergonomie im Fahrzeug vorgestellt und diskutiert. Dennoch gibt es einige Themen, die gerade in Zukunft auch aus der Sicht der Ergonomie neue Herausforderungen darstellen. Dazu gehört speziell die Frage der energieschonenden Klimatisierung von Elektrofahrzeugen, das Empfinden der andersartigen Längsdynamik in solchen Fahrzeugen und verbunden damit die geänderte Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug, aber auch die Empfindung von Fahrzeugbewegungen in Fahrzeugen mit geregelten Fahrwerke.

Technologische Entwicklungen im Bereich der Fahrzeugtechnik und Verkehrstechnik werden in gerade diesen Gestaltungsumfängen für die Ergonomie völlig neue Möglichkeiten auftun bzw. für veränderte und gesteigerte Anforderungen sorgen.

Neue und verschärfte Anforderungen bezüglich des Schadstoffausstoßes und der Fahrzeugsicherheit treiben die technische Entwicklung voran und für die ergonomische Gestaltung des Automobils bedeutet dies, ebenfalls zur Verbrauchsreduktion und der nochmaligen Steigerung eines effizienten Fahrverhaltens vor allem in Elektrofahrzeugen oder Hybridfahrzeugen beizutragen.

13.1 Elektromobilität

Klaus Bengler

Der Übergang vom Verbrennungsmotor zum Hybridfahrzeug oder E-Fahrzeug lässt also eine neue Betrachtung des Fahrer- und Fahrverhaltens sinnvoll erscheinen (Helmbrecht et al. 2014). Die Information über die Reichweite und die Beeinflussung der Reichweite durch den Fahrstil erfordert zusätzliche Anzeigen und vor allem eine differenzierte Betrachtung von Pedalkonzepten, die beispielsweise über one-pedal-drive die Rekuperation von Energie ohne Einsatz des Bremspedals unterstützen. Die Auswirkungen verschiedener Ausprägungen einer Rekuperationsfunktion auf das Fahr-Erleben hat Eberl (2014) untersucht.

Bereits jetzt zeigt sich, dass die Elektrifizierung des Antriebs auch das Erleben der Längsdynamik verändert und der Ergonomie neuen Gestaltungsspielraum gibt (Müller et al. 2014; Helmbrecht et al. 2014). Es besteht daher ein großer Bedarf an einem besseren Verständnis des Erlebens der Längsdynamik (Beschleunigung, Verzögerung, Segeln). Die Wertebereiche der menschlichen Wahrnehmungsleistung bzgl. längsdynamischer Fahrzeugeigenschaften variieren je nach Versuchsbedingung relativ stark und basieren hauptsächlich auf experimentellen Laboruntersuchungen (Meiry 1965; Benson 1986; Kingma 2005) und nur in seltenen Fällen auf Realfahrzeug-Untersuchungen (Rockwell und Snider 1965). Müller hat das Thema unter Anwendung adaptiver psychophysischer Verfahren und unter Zuhilfenahme eines Versuchsträgerfahrzeugs mit aktueller Mess- und Kalibriersoftware erneut aufgegriffen (Müller et al. 2013). Hierbei konnten die Unterschiedsschwellen für Fahrzeuglängsbeschleunigungen präzisiert sowie die Auswirkungen verschiedener Einflussgrößen quantifiziert werden (Müller 2014). Die Versuche von Müller bieten eine praktische Bestätigung der Aussagen von Mallery et al. (2010) und Bigler und Cole (2011), wonach der für die Wahrnehmung von Beschleunigungsreizen verantwortliche Vestibularapparat im Gegensatz zu anderen Sinneskanälen keine quantifizierte Weber-Konstante aufweist und somit niedrige Wahrnehmungsschwellen auch bei steigenden Stimulusgrößen und über verschiedene Versuchsbedingungen hinweg beibehalten kann. Auch die Entwicklung entsprechender Versuchseinrichtungen ist nötig, um unterschiedliche Auslegungen vergleichend untersuchen zu können. Ein Ziel ist es, gerade im Bereich des elektrischen Fahrens mit seinem enormen längsdynamischen Potential den Anteil der Rekuperationsphasen ohne aktives Bremsen und den Anteil der Segelphasen zu erhöhen und das positive Erleben zu verstärken. Die Gestaltung des Bremssystems und der Interaktion mit dem Bremspedal wie auch die Auslegung der Rekuperationsfunktion und die Interaktion mit dem Gaspedal oder besser dem Stellteil für Beschleunigung und Verzögerung stehen hier im Zentrum. Dem Fahrer muss eine unmittelbare und eindeutige Rückmeldung in diesen neuen Fahrzeugkonzepten gegeben werden, sodass generell ein vorausschauender Fahrstil unterstützt wird, der eine noch größere Rolle als bisher spielen wird (Rommerskirchen et al. 2013). Der Fahrer braucht dazu zusätzliche Informationen über den Fahrzeugzustand (Reichweite, Rekuperationsstatus und Batteriestatus), aber auch die Konnektivität des Fahrzeugs und seine

Konfiguration vor Fahrtantritt werden wichtiger. Damit werden auch mobile Endgeräte, die einen Fernzugriff auf das Fahrzeug ermöglichen, an Bedeutung gewinnen.

Die zunehmende energetische Betrachtung des Fahrzeugs und des Betriebs hat natürlich nennenswerte Auswirkungen auf die Klimatisierung und das Fahrzeuggewicht. Im Fall der Klimatisierung liegen gesicherte Erkenntnisse vor (Fanger 1972; Fiala et al. 2010; Zhang 2003). Allerdings ist eine Effizienzsteigerung und Optimierung der Klimatisierungskonzepte erforderlich, da für den Fall, dass geheizt werden muss, nicht mehr wie bisher die Abwärme des Verbrennungsmotors genutzt werden kann. Grundsätzlich erscheint der Umstieg auf dezentralere und lokalere Komponenten als vielversprechend, allerdings darf es zu keinen fühlbaren Komforteinbußen kommen. Erste Erkenntnisse zeigen, dass es durchaus möglich ist, durch den Einsatz alternativer Klimatisierungskonzepte für Heizen und Kühlen im Sinn der Ergonomie zu schließen. Weiterhin ist es erforderlich, die bestehenden digitalen Menschmodelle so zu erweitern, dass eine modellbasierte Absicherung der Klimatisierung bereits in der frühen Phase möglich wird (Janta und Stuke). Auch hier gilt, dass die technische Entwicklung in diesem Bereich von klassischen ergonomischen Gestaltungsprinzipien begleitet sein muss aber auch eine Neubetrachtung erforderlich macht. Zunehmend werden Klimatisierungskonzepte diskutiert, die nicht mehr auf dem reinen Luftaustausch und Luftströmung beruhen, sondern ebenfalls radiative und konduktive Heiz- und Kühlelemente in Erwägung ziehen. Würde dies die bauraumintensive Auslegung des HVAC's (Heating, Ventilation and Ait Conditioning) und deren Luftführung ersetzen, könnte gewonnener Platz neu verwendet werden. Zudem könnte dies eine Unterscheidung in der Auslegung von Heiz- und Kühlkonzepten bedeuten, da jeweils unterschiedliche Körperstellen unterschiedlich starken Einfluss auf den globalen Komfort des Menschen haben. Deren Auslegung und Positionierung ist mit den derzeitigen Modellierungs- und Bewertungswerkzeugen aber nicht abgedeckt. Allenfalls der Einsatz digitaler Menschmodelle ermöglicht die ansatzweise Positionierung relativ zur Fahrerhaltung im Innenraum (Janta 2014).

Die Erweiterung bestehender Menschmodelle besonders um die Bewertung lokalen Komforts bzw. dessen Einfluss auf das Globalempfinden in dynamischen, inhomogenen Umgebungen erfordert umfassende Untersuchungen im Fahrzeug und in der Klimakammer. Im Rahmen der TUM Projekte MUTE (Both et al. 2010; Kremser et al. 2011; Lorenz et al. 2011) und VisioM wurden bereits einige Konzepte für den Heizfall untersucht und erprobt. Im Kooperationsprogramm TUM CREATE wurden ähnliche Versuche für den Anwendungsfall des e-Fahrzeugs EVA (Stuke und Bengler 2014) und für den Kühlfall in tropischen Großstädten betrachtet.

13.2 Automation

Zunehmende Automation des Individualverkehrs und der mögliche Übergang zur kooperativen Fahrzeugführung werden in der Zukunft immer größere Bedeutung bekommen. Auch hier stellt die technologische Entwicklung einen Paradigmenwechsel für die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug dar, durch den Sicherheit und Komfort aber auf keinen Fall beeinträchtigt werden dürfen (Flemisch et al. 2013, Bengler et al. 2014).

Wurden auch schon bisher Komfort und Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme wie ACC und Lane Departure Warning verbessert, kann eine weitere Integration dieser Systeme und eine Ausweitung ihres Funktionsbereichs erwartet werden. Wird aber auch der Grad der Automation zunehmen, ändert sich die Rolle des Fahrers hin zum Systemüberwacher. In diesem Fall sind spezifische ergonomische Maßnahmen zu ergreifen, die dazu dienen, die Interaktionskonzepte dahingehend abzusichern, dass der Fahrer in der Lage ist, die Fahrzeugführung rechtzeitig und kompetent wieder zu übernehmen. In jedem Fall stellt die Überwachung eines solchen Fahrzeugs andere und zum Teil auch höhere Anforderungen an den Fahrer als die manuelle Fahrzeugführung. Ebenso müssen die für die manuelle Fahrzeugführung konzipierten Anzeigen und Stellteile bezüglich ihrer Eignung für die teilautomatisierte und hochautomatisierte Fahrzeugführung überdacht werden.

13.3 Mobilitätsverhalten

Heiner Bubb

Viele Zukunftsszenarien gehen davon aus, dass das zukünftige Mobilitätsverhalten zumindest in den Ballungszentren nicht mehr wesentlich durch den individuellen Besitz von Fahrzeugen charakterisiert ist. Solche Szenarien suggerieren beispielsweise, dass mittels eines Smartphones – ähnlich wie es heute durch Winken nach einem Taxi am Straßenrand geschieht – ein autonom fahrendes Fahrzeug gerufen wird, das dann für den persönlichen Fahrtwunsch zur Verfügung steht und sich nach Erledigung des Fahrtauftrags selbstständig wieder zurückzieht. Für andere Mobilitätsaufträge könnte beispielsweise ein dafür geeignetes Fahrzeug für einen Wochenendausflug geordert werden. Auch diverse Kombinationen von öffentlichem und privatem Verkehr einschließlich der Nutzung des Fahrrads sind denkbar. Man hofft so, den Anteil des stehenden Verkehrs signifikant reduzieren zu können und somit in den Städten den verfügbaren Raum im Wesentlichen dem rollenden Verkehr vorzubehalten. Bei all diesen Szenarien, von denen eines hier nur schlaglichtartig dargestellt ist, spielt das Smartphone praktisch als Schlüssel für die mobile Welt eine zentrale Rolle. Damit ergeben sich für die Ergonomie ganz neue Anforderungen bezüglich der software-ergonomischen Gestaltung von solchen Nutzer-Smartphone-Interaktionen. Unabhängig von der technischen Problematik, Schnittstellen für unterschiedliche Smartphone- und Fahrzeugtechnologien zu schaffen, so dass die obige Version tatsächlich reibungslos funktioniert, ergeben sich auch ergonomische Visionen, wie beispielsweise die automatische Adaptation des georderten Fahrzeugs an die individuellen Fahrerwünsche – angefangen bei der Individualisierung des Cockpits bis hin zu der automatischen Anpassung von Fahrersitz-, Lenkrad und Spiegeleinstellung an den jeweiligen Fahrer; Daten, die womöglich im Smartphone gespeichert sind und auf das gerufene Fahrzeug übertragen werden. Dieser Aspekt spielt bereits bei vielen Szenarien, die noch keineswegs so ambitioniert sind wie das oben dargestellte und die auch mit heute unmittelbar verfügbarer Technologie realisiert werden können, eine wichtige Rolle.

Die angedeuteten technologischen Entwicklungen verdeutlichen, dass das Automobil nach wie vor markanten innovativen Änderungen unterworfen ist und sich die in Akamatsu et al. (2013) skizzierte Entwicklung fortsetzen wird. Einerseits werden ergonomische Forderungen in Konzepten umsetzbar andererseits neue methodische und konzeptuelle Fragen an die Ergonomie gestellt.

Literatur

Akamatsu, M., Green, P., Bengler, K.: Automotive Technology and Human Factors Research: Past, Present, and Future. In International Journal of Vehicular Technology 2013 (2013). Article ID 526180, 27 pages, http://dx.doi.org/10.1155/2013/526180 doi:10.1155/2013/526180

Bengler, K., Dietmayer, K., Färber, B., Maurer, M., Stiller, C., Winner, H.: Three Decades of Driver Assistance Systems: Review and Future Perspectives. IEEE Intell. Transport. Syst. Mag. 6(4), 6–22 (2014) 10.1109/MITS.2014.2336271

Benson, A.J., Spencer, M.B., Stott, J.R.R.: Thresholds for the Detection of the Direction Whole-Body, Linear Movement in the Horizontal Plane. Aviation, Space and Environmental Medicine, 1088–1096 (1986)

Bigler, R., Cole, D.: A review of mathematical models of human sensory dynamics relevant to the steering task. In: Proc. 22nd IAVSD Symposium on the Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks (2011)

Both, J., Kremser, F., Rüger, O.: Neue Grenzen, neue Freiheiten – das MUTE Elektrofahrzeug der TU München. Automobil Industrie INSIGHT **55**(B01046), 72–75 (2010)

Eberl, T.: Charakterisierung und Gestaltung des Fahr-Erlebens der Längsführung von Elektrofahrzeugen. Dissertation Technische Universität München (2014)

Fanger, P.O.: Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering. McGraw-Hill, New York (1972)

Fiala, D., Psikuta, A., Jendritzky, G., Paulke, S., Nelson, D.A., van Marken Lichtenbelt, W.D., Frijns, A.J.H.: Physiological modeling for technical, clinical and research applications. Frontiers in Bioscience 52, 939–968 (2010)

Flemisch, F.O., Bengler, K., Bubb, H., Winner, H., Bruder, R.: Towards a cooperative guidance and control of highly automated vehicles: H-mode and conduct-by-wire. Ergonomics 57(3), 343–360 (2014)

Helmbrecht, M., Olaverri-Monreal, C., Bengler, K., Vilimek, R., Keinath, A.: How Electric Vehicles Affect Driving Behavioral Patterns (2014). ID: T-ITS-14-01-0033.R1

Janta, M., Bengler, K., Senner, V.: Komfort durch lokale Klimatisierung in Elektroautos GfA-Frühjahrskongress, Gestaltung der Arbeitswelt der Zukunft., S. 398–400 (2014)

Kingma, H.: Thresholds for perception of direction of linear acceleration as a possible evaluation of the otolith function. BMC ear, nose, and throat disorders **5**(1), 5 (2005). doi:10.1186/1472-6815-5-5

Kremser, F., Pietsch, R., Wilden, W., Lienkamp, M., Bengler, K.: Anthropometrische Innenraumauslegung eines Elektrofahrzeugs der Subcompact-Klasse. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (GfA) (Hrsg.) Mensch, Technik, Organisation – Vernetzung im Produktentstehungs- und -herstellungsprozess, Bericht zum 57. Arbeitswissenschaftlichen Frühjahrskongress vom 23.-25. März an der Technischen Universität Chemnitz, S. 239–242. GfA-Press, Dortmund (2011)

Lorenz, D., Remlinger, W., Kremser, F., Matz, S., Bubb, H., Bengler, K.: Sichtauslegung eines kompakten Elektrofahrzeugs mit ‚RAMSIS kognitiv' 2. Automobiltechnisches Kolloquium, Antriebstechnik, Fahrzeugtechnik, Speichertechnik. VDI-Berichte. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2011)

Mallery, R.M., Olomu, O.U., Uchanski, R.M., Militchin, V.A., Hullar, T.E.: Human discrimination of rotational velocities. Experimental brain research **204**(1), 11–20 (2010). doi:10.1007/s00221-010-2288-1

Meiry, J. L.: The vestibular system and human dynamic space orientation (Doctoral Thesis). Massachusetts Institute of Technology (1965)

Müller, T., Hajek, H., Frank, T., Bengler, K.: Das menschliche Auflösungsvermögen von Dynamikveränderungen im Fahrzeug Conference on Future Automotive Technology, Garching b. München, 17-18. März 2014 (2014)

Müller, T., Hajek, H., Radić-Weißenfeld, L., Bengler, K.: Can You Feel The Difference? The Just Noticeable Difference of Longitudinal Acceleration September 2013. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting., S. 1219–1223 (2013)

Rockwell, T., Snider, J.: An Investigation of Variability in Driving Performance on the Highway: Final Report. Ohio State University, Columbus, Ohio (1965)

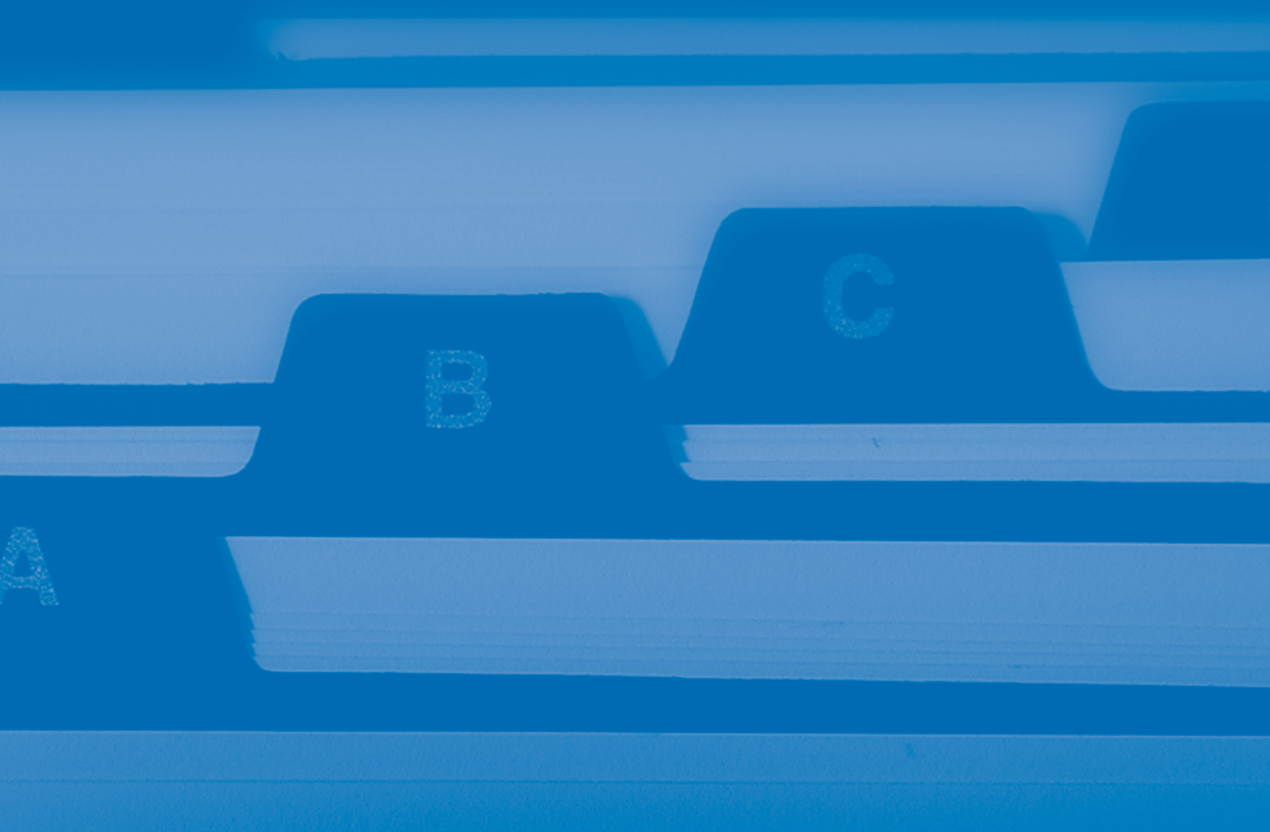
Rommerskirchen, C., Helmbrecht, M., Bengler, K.: The Impact of an Anticipatory Eco-Driver Assistant System in Different complex Driving Situations on the Driver Behavior. Intelligent Transportation Systems Magazin, IEEE 6(2), S. 45–56, doi: 10.1109/MITS.2014.2307078 (2014)

Stuke, P., Bengler, K.: New approach on vehicle interior cooling to increase comfort and reduce energy consumption Co-FAT 2014, München. (2014)

Zhang, H.: Human Thermal Sensation and Comfort in Transient and Non-Uniform Thermal Environments. PhD thesis, University of California, Berkley (2003)

Anhang

Sachwortverzeichnis – 692



H. Bubb et al., *Automobilergonomie,* ATZ/MTZ-Fachbuch,
DOI 10.1007/978-3-8348-2297-0, © Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

Sachwortverzeichnis

50. Perzentil 647
50-Perzentil Mann 238
α/2-Algorithmus 535
α-Innervation 71
α-Motoneurone 123
γ-Innervation 71
γ-Motoneurone 123
λ/4-Effekt 417

A

A-Bewertung
– kurve [dB(A)] 94
Ablage 425
Ablagefach 347
Ablenkung 127
Abmaße der Hand 193
Absolutschwelle 74
Absorptions- und Reflexionskoeffizient 473
ABS-System 6
Abstand der Pedale 376
Abstands
– regeltempomat 268
– tempomat 537
Abstützung 355, 371
A-, B- usw. Säule 355
Abwärme des Verbrennungsmotors 498
Abwendung 127
ACC Stop & Go 549
ACME 235
Active City Stop 543
Active Noise Control (ANC) 482
ADAMS 243, 251
Adaptation 87
Adaptationsfähigkeit 473
– des Geruchssinns 518
Adaptationsmechanismus 76
Adaptive Control of thought-Rational (ACT-R) 231
– Driver Model 231
Adaptive Cruise Control (ACC) 6, 536, 537
Adaptive Fahrgeschwindigkeitsregelung 537
Adaptives Lichtsystem 535
Adäquater Reiz 73
Adenosindiphosphat (ADP) 174
Adenosintriphosphat (ATP) 174
Adipositas 198
Adrenalinausschüttung 644
Advanced Driver Assistance Systems in Europe (ADASE) 528
Advanced Lane Departure Warning-System (ALDW) 545
Affordance 273, 298
AFS-Scheinwerfer (Advanced Frontlighting System) 535
Agent für 312
– Augenbewegung 236
– Kontakte 312
– Tank 312
– Termin 312
Aggressivität 498
Agonist 175
Airbag 4
Akklimatisation 499
Akkommodation 83, 595
Aktin 174
Aktives Fahrwerk 8
Aktivlenkung 11
Aktuator 333
Akzeptanzgrenze 152
– empirische 152
– physikalische 152
Alpha-Fehler 675
Alpine 530
Alter 178
Ältere
– Fahrzeugnutzer 455
– Personen 457
Alternativhypothese 674
– spezifische 674
– unspezifische 674
Alters
– pyramide 584
– sichtigkeit 401
Altersspezifische Veränderung 456
– Gedächtnisleistung 456
– Hörvermögen 456
– Intelligenz 456
– Sehleistung 401
Alterungsprozess 283
Ambientebeleuchtung 476
Amplitudengang 41
Analogskala 654
Anatomie 164
Anfahrassistent 11
Anfängerrisiko 117
Anforderungen an die Technik 505
Anhalteweg 51
Animation 244
Anlagefläche zu Tür- und Tunnelverkleidung 425
Annäherungszone 315
Anonymität der Befragung 657
Anschnallvorgang 382
Ansprechverhalten 323, 330
Antagonist 175
Antagonistisches Prinzip 123
Anthropometrie 179
Anthropometrische 18
– Arbeitsplatzgestaltung 18
– Gestaltung 586
ANTHROPOS 241
Antiblockiersystem (ABS) 9, 529, 531
Antischlupfregelung (ASR) 531
Antizipation 128
Antizipations
– agent 234
– repräsentation (AR) 234
Antriebsschlupfregelung (ASR, ASC) 10
Anwendungsklasse 607
ANYBODY 241, 244, 253
Anzahl der möglichen Antworten 654
Anzahl und Dauer (Summe) der Öffnungsintervalle (Total Shutter Open Time TSOT) 640
Anzeige 267, 273, 275, 276, 284
– akustische 273, 284
– analoge 276
– bildhaft situationsanaloge 276
– digitale 276
– fotorealistische 276
– haptische 273
– kontaktanaloge 276
– optische 273
– separate 267
– visuelle 276
Anzeigegenauigkeit 276
Äquivalenztest 676
Arbeits
– gedächtnis 70, 232
– leistung 31
– qualität 31
– wissenschaft 16
Area of Interest (AOI) 127, 632
Arithmetisches Mittel 649
Armstütze 384
Arretierbarkeit 292
Artificial Reality 589
Artikulationsindex (AI) 485
ASPECT-Programms (Automotive Seat and Package Evaluation and Comparision Tool) 357
Aspektwissenschaft 17

Assistenzaktiviereinheit 546
Assistenzmodus 575
– autonomes Fahren (AUTON) 575
– manuelles Fahren (MF) 575
– teilautomatisiertes Fahren (TA) 575
– unterstütztes Fahren (UF) 575
– vollautomatisches Fahren (VA) 575
Assistenzsystem 142, 235, 528, 559
– alternatives 559
– informierendenes 559
– simultanes 559
– warnendes 559
Assistierende Lichtverteilung 536
Ästhetischer Eindruck 590
Astigmatismus 82
Atemluft der Passagiere 514
Atlaswirbel 169
Atrophie 178
Attention Assist 565
AttraktDiff2 149
Aufgabe 28, 260, 266, 268, 309, 310, 607
– aktive 268, 309
– dynamische 266
– monitive 268
– reaktive 309
– statische 266
– tertiäre 310, 607
Aufgaben
– art 268
– auslegung 263
– inhalt 263
Aufmerksamkeits
– operator 233
– zuwendung 492, 614, 630
Aufstandsfläche 313
Auf- und Rückprojektion 601
Aufzeichnungsmöglichkeit 613
Augen
– dominanz 190
– ellipse 354, 396
– höhe 601
– höhe im Sitzen 191
– muskel 214
– punktlage 354, 366
– punkt V1 398
– punkt V2 398
Augenbasierte Metrik 632
Augenbewegung 233
– unwillkürliche 233
– willentliche 233
Äugigkeit 189
Augmented Reality 281
– im Realfahrzeug 609
Aus-Fädler 439
Ausfall- bzw. Fehlerrate 58
Ausfallquote 58
Ausnahmeverstoß 154
Ausnutzungsgrad (Kraft) 450
Aus-Plumpser 439
Ausrichtung des virtuellen Horizonts 596
Aussagekraft von Fahrsimulatoren 606
Aus-Schlüpfer 438
Außenbeleuchtung 474
Außenspiegel 515
Außentemperatur 504
– sommerliche 504
– winterliche 503
Äußeres Hautmodell 243
Aussteigen 433
Ausstieg 438
Ausstiegsstrategie 432
– Heben (Lifting) 439
– Klettern (Climbing) 439
– Spreizen (Bridging) 438
Austrittsöffnung 508
Ausweichassistent 550
Autobahnlicht 536
Automation 687
Automatische Geschwindigkeitskontrolle (Tempomat, Cruise Control) 530
Automatisches
– Getriebe 8
– Umschalten 536
Automatisierte Auswertung 633
Autonom eingreifendes Brems-System (AEBS) 543
Autonomer Bremsassistent 543
Autonomie 328
Autoradio 13
Axone 73

B

Bahnführungsaufgabe 533
Balkengrafik 682
Bandscheibe 171
Bandscheibenvorfall (Nucleus-pulposus-Prolaps) 170
Bang-Bang-Modell 228
Barleycorn 194
Basalganglien 71
Baseline-Fahrt 639
Basilarmembran 92
Basiscockpit 275
BAS plus 543
Batterie 3
– wechselstation 262
Beanspruchung 18, 149, 328, 495, 637
– mentale 642
– psychische 328
– subjektiv empfundene 651
– unter Schwingungseinfluss 495
– visuelle 630, 639
Bedeutung 73, 273
Bedienbarkeit der Gepäckraumöffnung 454
Bedienelement 273, 286, 288, 290, 291, 292, 293, 294
– aktives 290
– analoges 291
– digitales 292
– handbetätigtes 294
– integriertes 293
– rotatorisches 286
– translatorisches 288
Bedienkomfort 8, 148
Bediensicherheit 263
Bedien- und Anzeigekomponenten 355, 418
Bedienung 264, 265, 270, 292, 334
– Beidhand- 334
– Bein- 292
– divergierender Art 265
– Einhand- 334
– Finger- 292
– Fuß- 292
– Hand- 292
– sequentielle 265
– simultane 265
– stereotype 270
– variierender Art 265
– zwingender Art 265
Bedingung 669
Beeinflussbarkeit 328
Befächerungseffekt 519
Befragung
– offene 650
– qualitative 650
– teilstandardisierte 650
Behaglichkeit 498
Beifahrer 393
Bein- und Fußraum 356
Beitrag 528
– für die Sicherheit 528
– zur Verbesserung des Fahrkomforts 528
Beladen 356, 452
Belastung 18
Belastungs-Beanspruchungskonzept 18
Beleuchtungsstärke 472
Belüftung des Brust-Schoßbereiches 509
Benutzerfreundlichkeit 354
Beobachtungs
– kamera 631
– rauschen 227

Berührungsfreie Methode 631
Berührungsloses Verfahren 621
Beschattungssystem 428
Beschlagbildung 513
– außen 513
– innen 513
Beschleunigungs
– signal 599
– steuerung 47
– verhalten 329
– wert 638
Bestätigungsphase 586
Beta-Fehler 676
Betätigungselement 576
– formvariables 576
Betriebsgeräusch des Antriebmotors 478
Beugung (Flexion) 169
Beurteilung der Beschleunigung 481
Beweglichkeit 208, 209, 211
– aktive 209
– altersabhängige 211
– geschlechtsabhängige 211
– passive 209
Bewegung 292, 486, 623
– Hub- 486
– Nick- 486
– Roll- 486
– Rotations- 292
– Translations- 292
– Wank- 486
Bewegungs
– apparat 164
– art (Bewegungscodierung) 292
– bedarf 349
– dynamischer 347
– bereich
– gelenkspezifischer 209
– codierung 273, 294
– detektor 107
– freiraum 347
– krankheit 496
– messung 626
– parallaxe 91, 108
– programm 123
– raum 208, 356
– aufgabenspezifischer 208
– sehen 107
– simulation 602
– strategie 432
Bewertung 440, 443, 444
– der Fahrzeuglängsregelung 638
– der Gebrauchstauglichkeit 618
– des Bewegungsvorgangs 444
– des Einstiegsschlauchs 443
– geometr. Randbedingungen 440
– Methode 439
Bewusstsein 116
Bildaufbaurate 594
Bildverarbeitungstechnologie 622
Binokulares Sehen 90
Biomechanisches Menschmodell 492
Bird-view-Anzeige 30, 267, 308
Blaupunkt EVA (elektronischer Verkehrslotse für Autofahrer) 530
Blendfreies Fernlicht 537
Blendung 86, 358, 414, 474, 535
– diability glare 414
– discomfort glare 414
– physiologische 86, 414, 474
– psychologische 86, 414, 474, 535
Blickabwendung 311
Blickabwendungszeit 311
Blickachsenmessung (Point of Regard Measurement) 631
Blickbewegung 630
Blickbewegungsanalyse 401
Blickerfassungssystem 614
Blickfeld 215
Blickkontakt zur Umgebung 463
Blickverhaltenstyp 135
Blickwinkeldarstellung 601
Blick zum Horizont 396
Blickzuwendungszeit 401
Blinder Fleck 83
Bodediagramm 41, 223
Body-Builder 248
Body-grid-Verfahren 627
Body Mass Index (BMI) 197
Bodyscanner 180, 247
Bodyscanning 623
Bodystyles 347
BOEMAN 241
Bogengang 95
Boolesche Algebra 56
Boxplot 666
Brainstorming im Team 652
Brake-by-Wire 333
Bremsassistent (BA) 11, 532
Bremsbelag 304
Bremsen 331, 333
Bremsenquietschen 284
Bremskraftverstärker 9
Bremspedal 293, 331, 332
Brennstoffzellentechnologie 3
Brüstungshöhe 367

C

Cabriolet 347
CAD-Technik 240
CALSPAN-3D-CVS (Crash-Victim-Simulator) 241
Car-Kliniken 615
Car-Sharing 262
Car-to-Car (C2C) 24, 63, 555
Car-to-Car-Kommunikation (Car-2Car) 63
Car-to-Infrastructure (C2I) 556
CASIMIR 243, 252
CATIA 245, 359
CAVA (CATIA Automotive-Extensions Vehicle Architecture) 359
– Manikin 359
– Safety 359
– Vision 359
– Wiper 359
CAVE 587, 592, 593
Center-point-feeling 321, 322
– situationsabhängiges 322
Centrum-Collum-Diaphysen-Winkel (CCD) 186
Chauffeurfahrzeug 355
Checkliste 620
– TRL 620
Chunk 117
City-Pilot 530
City Safety System 543
Clothing unit (clo) 499
CO_2-Reduktion 2
Coccygealwirbel 170
Cockpitgestaltung 19
Codesystem 273
Codierung 73, 284
– analoge 73
– digitale 73
– räumliche 284
Cognitive Bands 230
COMAND-System 15
COMBIMAN 241
Compound-Material 269
Computeranthropometrie 621
Computional Fluid Dynamic (CDF)-Analyse 516
Cornea-Reflex-Methode 631
Corpus callosum 69
Cortex
– präfrontaler 72
Corticale Region 231
Cortisches Organ 92
COSMODRIVE (COgnitive Simulation MOdel of the DRIVEr) 234
Coulombsche Reibung 320
Cover-Story 683
CP-50-Skala 373
Crashverhalten 382
Cyberspace 589

D

Dach 355
– haltegriffe 349
– innenhimmelverkleidung 349
– rahmenlage 367
Dackelgang 325
Daimler-Scholly-Verfahren 250, 402
d'Alembertschen Prinzip 251
Dämpferkennlinie 494
Dämpfung 288
Darbietungszeit 90
Darstellung der
– Ergebnisse 677, 679
– realen Beschleunigung 603
Darstellungsart 267
Daten 614
– deskriptive 666
– exzellente 637
– objektive 614
– subjektive 614
Datenbank 443
Datenbasis 605
– dynamische 605
– modular statische 605
– statische 605
Datenhandschuh 595
Datenqualität 676
Dauer der Aufgabenbearbeitung (Total Task Time TTT) 639
Defrost-Taste 516
Degrees of freedom (OF) 677
Design for all 212, 461
Designfreeze 586
Detection Response Task (DRT) 640
Detektoren für spezifische Längen 107
Detents 287
Deutscher Verkehrssicherheitsrat (DVR) 528
Dezibel 41
Diaphyse 165
Diarthrosen 171
Dichotomes Antwortformat 654
Dienstreise 260
Differentialgleichung 39
Digitales Menschmodell 687
Digits 276
Dilemma 528
Dimensionalität 265, 292
Dimmbarkeit 475
Direktblendung (direct glare) 414
Direkte Bestrahlung der Körperpartien der Passagiere 507
Direkte Sicht 396
Disability glare 414
Diskomfort 146, 199, 328, 443
– dynamischer 443
Diskomfortwerte 491
– verbal definierte 491
Distronic 6, 537
DLC-System (Distance to Line Crossing) 544
Doppelkupplungsgetriebe 23
Doppelte Verneinung 656
Dornfortsatz (Prozessus spinosus) 171
Drainagekanal 315
Drehdrücksteller 14, 293, 310
Drehencoder 286
Drehmomentverlauf 330
Drehschalter 286
Dreifarbentheorie 84
Dreifingergriff 419
DRIVER 232
Driver Alert Control 565
Driver Attentional Load Index (DALI) 657
Driver in the Loop (DIL) 587
Driver Monitoring System 543, 565
Druck
– punkt 331
– schalter 286
– taster 286
– verteilungsbild 627
DSC 10
Dual-Task
– Aufgabe 640
– Messung 640
– Verfahren 619
Dual-View-Display 413
Duftstoff 520
Dummy 611
Dunkeladaptation 88
Dunkelanpassung 474
Durchstieg 356
Durchwobbeln 40
Düse 509
Düsenzahl 509
D-Verhalten 39
DYNAMICUS 243, 251
Dynamik 482
– der Maschine 266

E

Easy-Entry 451
Edge-Blending 601
E-Fahrzeug 686
Effektivbeschleunigung 490
Effektivität 619
Effektivtemperatur 500
Effektivwert 487
Effizienz 619
eHuman 241
Eigenfrequenz
– des Kindermagens 463
– des Systems 493
Eigenreflexbogen 71, 123, 337
Eigenstrahler 474, 475
Eindruck 481
– sportlicher 481
Einfädeln in eine Straße 406
Einfüllstutzen 356
– für Scheibenwaschwasser 356
Einleitende Beschreibung 657
Einparkassistenz 551, 552
– automatische 552
– geführte 552
– informierende 551
– semiautomatische 552
Einparken 306
Ein-Pedal-Interaktion 331
Einpunktanregung 490
– mehrachsige 490
Einsatzgebiet 546
Einschaltquote 570
Einschätzungsschwierigkeit 611
Einstieg 432
Einstiegs-(Dis)-Komfort 510
Einstiegsrelevante Hauptabmessung 440
Einstiegsstrategie 435
– Hürdenspringer (Hurdlejumping) 437
– Plumpsen (Sagging) 437
– Schlüpfen (Slipping) 434
Ein- und Ausstieg 356, 428
Ein- und Ausstiegsvorgänge 349
Eisbildung 513
Ektomorph 182
Elchtest 10
Electro Gyrocator 530
Electronic Stability Control (ESC) 532
Elektrische Beheizung 515
Elektro
– fahrzeug 483
– mobilität 3
Elektroantrieb 331
Elektroenzephalografie (EEG) 76
Elektroenzephalogramm (EEG) 643
Elektromyogramm (EMG) 644
Elektronisches Gaspedal 10
Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP) 10, 529, 532
Elektrookulogramm (EOG) 630
Elektrostatische Aufladung 506
Element 33
– mit Gedächtnis 35
– ohne Gedächtnis 35
Elementarwahrnehmung (Basic Perception) 233

EMMA (Eye Movements and Movement of Attention) 232
Emotionale Wahrnehmung 72
Empfänger 273
Empfindlichkeit 289
Empfindungsmaximum 488
Endanschlag 289
Endolymphe 92
Endomorph 182
Energie
– bilanz 500
– rückgewinnung 328
– umsatz 499
Engineering 17
Enteisung und Entfeuchtung 514
Entfernungswahrnehmung 594
Entriegelungsvorrichtung 429
Entscheidungsmechanismus 105
Entscheidungsregel 674
Entwicklungsszenarien 587
Epiphyse 165
Erbsenbein 166
Ereigniskorrelierte Potentiale (EKP) 643
Erfassen von Kontaktkräften 626
Ergebnis 28, 260
– genaues 666
– repräsentatives 666
ERGOMAN 241
Ergonomics 16
– Macro- 17
– Micro- 17
Ergonomie 16
– anthropometrische 20
– funktionale 20
– Informations- 20
– kognitive 20
– Kommunikations- 20
– Software- 20
Erkennung 273
– Gestik- 273
– Mimik- 273
– Sprach- 273
Erkennungs
– quote 534
– schwelle 104
Erleben der Längsdynamik 686
Erleiden 146
Ermüdung 263, 637, 643, 670
– physische 637
– psychische 637
Erreichbarkeit 367, 382, 418
– der Pedalerie 367
Erreichbarkeits
– fläche 418
– grenze 347
– untersuchung 249
Erschöpfung 150
Erwartungskonformität 271
Etak 530
Eustachische Röhre 91
EVA 687
Evaluation von innovativen Ideen 598
EVITA 612
Evolutionäre Entwicklung 642
Experten
– bewertung 620
– interview 650
Exponentialverteilung 58

F

Fähigkeit 498
– kognitive 498
– motorische 498
Fahr
– fehler 152
– geräusch 478
– lehrer 614
– mission 260
– pedal 293, 329
– schlauch 140, 326
– simulator 586, 587, 598
– situation 128
– stil 686
Fahraufgabe 20
– primäre 20
– sekundäre 22
– tertiäre 23
Fahrbahnkontakt 313
Fahrbetrieb 505
Fahren aus Spaß 260
Fahrer 363, 529, 575
– alkoholisierter 529
– arbeitsplatz 349
– assistenzsystem 586
– beobachtung 565
  – direkte 565
  – indirekte 565
– Informations-System (FIS) 16
– Rückfallebene 575
– situation 128
– überwachung 562
  – durch erzwungene Bedienhandlung 562
– unter Drogeneinfluss stehender 529
Fahrstreifenwechselassistenzsysteme (Lane Change Decision Aid Systems) 547
Fahrtenbuch 555
Fahrtrichtung 313
Fahrtverlauf 260
Fahrweise 639
– hektische 639
– unausgeglichene 639
Fahrzeug
– akustik 478
– architektur 347
– charakteristik 326
– folgeverhalten 638
– fond 393
– geometrie 432
– himmel 355
– informationssystem (FIS) 274
– innenraum 347
– konzept 347
– Mock-Up 248
– package 347
– scheibe 513
– spezifikation 347
– verhalten 324
  – neutrales 324
  – übersteuerndes 324
  – untersteuerndes 324
Fahrzeugtür (Öffnen und Schliessen) 485
Faktor 669
Faktoren 669
– Anzahl der 669
– Stufen der 669
Falk 530
Falten 627
Farb
– codierung 274
– gebung 426
– konstanzleistung 84
– kontrast 87, 475
Faseroptische Elemente 624
Faserring (Anulus fibrosus) 170
FAT-Projekt 244
Feder 493, 494
– aktive 494
– Luft- 494
– vorspannung 288
Feedback 28
Fehlberechnung 624
Fehler 37, 58, 151, 156, 266
– baum 60
– Bedienungs- 157
– Diagnose- 156
– Handlungs- 156
– Informations- 156
– kompensationsalgorithmus 642
– Methoden- 156
– quote 58
– rate 276
– robustheit 312
– struktureller 156
– unbeabsichtigter 151
– Zielsetzungs- 156

Fehlerkennung 301
Fehlhandlung 152
FEM-Methoden 251
Fensterheberschalter 392
Fernpunkt 232
Feststellbremse 390
Fettleibigkeitsklasse 197
Feuchtigkeitsgehalt 504
Finite Elemente (FEM) 243
First Man 241
Fixation 84, 632
Fixationsfeld 215
Flanke 289
Fliehkraft 603
Fließhecklimousine 452
Flügeltür 432
Flussdiagramm 265
Flüssigkristallbildschirme (Liquid Crystal Displays, LCD) 413
Focus of Expansion (FoE) 110
Folge
– aufgabe 30, 48, 267
– fahrtsituation 135
Fond
– bereich 355
– passagier 423
– raum 515
Formcodierung 273
Forschungsstuhl 372
Forward Alert 543
Fourierzerlegung 43
Fovea 127
– physiologische 126
– psychologische 127
Fovea Centralis 82
Frage 656
– Absichts- 652
– Bewertungs- 652
– Fakt- 652
– geschlossene 652
– offene 652
– Verhaltens- 652
– Wissens- 652
Fragebogenverfahren 651
Frageinhalt und Antwortformat 652
Fragenformulierung 656, 657
Frankfurter Horizontale 180
Freiheitsgrad 677
Freiland-Fahrererprobung 517
Fremd
– leuchter 413
– strahler 475
Frequenz 40
– bereiche 486
– gang 38
– peaks 481
– spektrum der Lenkeingaben 639
Fresnellinse 602
Frontalebene 164
Frontsicht 601
Fühlbares Geräusch 604
Führendes Körperteil 245, 434, 445
Führungsart 266
Führungsaufgabe 21, 28
Führungsgröße 28, 37
Funktion 260, 263, 528
– monitive 528
Fuß
– ballenpunkt, ball of foot (BOF) 352
– haltung 328
– raumaustrittstemperatur 516
– stellteile 273
Fuß und Schuh 194

G

Garagenparker 553
Gaspedal 329
– aktives 329
– elektronisches 329
GCIE-Austauschlisten (Global Car Manufacturers Information Exchange Group) 351
Gebrauchstauglichkeit (usability) 619
Gedächtnis 114, 231
– Kurzzeit- 114
– Langzeit- 114
– sekundäres 115
– sensorisches 114
– tertiäres 115
Gefahr 56
Gefährdung der Personen 611
Gefahrpunktwarner 555
Gefallen 146
Gegenwart 126
– der Vergangenheit 126
– der Zukunft 126
Gehirnareal 69
Gehör 606
Gehörknöchelchenkette 92
Gelenk
– echtes 166
– Ellipsoid- 167
– fortsätze (Processus articularis) 171
– kapsel 166
– knorpel 166
– Kugel- 167
– moment 175
– planes 169
– Rad- 167
– rezeptor 98
– Sattel- 167
– Scharnier- 167
– unechtes 166
– Zapfen- 167
GENPAD (GENeric PArametric Design) 359
Geradeauslauf 323
Geräusch 478, 483, 484
– angenehmes 478
– Bestätigungs- 484
– Klapper- 483
– kleines 483
– Knarz- 483
– Kontaktstellen- 484
– Schabe- 483
– spektrum 479
– störendes 478
Geruch 518
– emotionale Wirkung 518
– Objektivierung 518
Geruchssinn 104
Gesäß-Knietiefe 191
Geschlecht 177
Geschmacks-Knospen 104
Geschwindigkeit 599, 638
Geschwindigkeitsbegrenzer (speed limiter) 531
Geschwindigkeitsregelanlage (Tempomat) 9
Geschwindigkeitssteuerung 47, 266
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA) 17
Gesichtsfeld 214, 233
– funktionelles 233
– peripheres 233
Gesichtsleuchtfelddichte 85
Gestaltgesetz 80
Gestaltung 351
– des Fragebogens 657
– menschengerechte 351
Geste 301
– unwillkürliche 301
– willkürliche 301
Gestensteuerung 301
Gestiksteuerung 454
G-Faktor 354
Gier
– beschleunigung 97
– bewegung 604
Glas
– dach 428
– haus 355
– körper 81
– kuppelauto 401
Glatteisgefahr 304
Glaukom (Grüner Star) 455
Gleichgewichts
– organ (Vestibularorgan) 95
– sinn 599

Gleitsichtbrille 358, 412
Globaler Kunde 347
Global-Positioning-System (GPS) 530
Globetemperatur 501
GOMS (Goals, Operator, Methods, Selection) 234
Gong 284
Goniometer 623
G*Power 679
Gradient des Druckanstiegs 373
Greenhouse 355
Greifart 297
Greifraum 354, 420
– unterschiedlicher Priorität 420
Grenzbereich 315
Grenze 152
– forensische 152
Grenzrisiko 56
Grenzverfahren 646
Grenzwert 303
– anzeige 534
– dynamischer 303
Griff 297
– Kontakt- 297
– Umfassungs- 298
– Zufassungs- 297
Größencodierung 274
Gruppendiskussion 650
Gültigkeit 618
Gurt 382
Gurtverlauf 383
Gyrus 70
– motosensorischer 70
– postcentralis 70
– präcentralis 70
– sensomotorischer 70

H

H30-Maß 352
Habituations
– effekt 539
– untersuchung 145
Hackenaufstandspunkt 378
Haftreibung 313
Haltung 394
– entspannte 394
Haltungskomfortprognose 248
Hände am Lenkrad 643
Handhabbarkeit 148
Händigkeit 188, 392
Handlung 231
Handlungssequenz 116
Handschuh 197
Handstellteil 273
Hand- und Fußbewegung 250
Handwerklichkeit (craftmanship) 463
Haptik 426
Hardware-Dummy 243
Hardware in the Loop (HIL) 587
Harmonie 464
Härte 482
Haubenentriegelungshebel 392
Haubensicht-Faktor 368
Häufigkeitsverteilung 666
Hauptwirkung 681
Hautleitwiderstand 642
Hautsinn (Haptik) 599
Heading Control (HC) 12
Head-Mounted Display 587, 592, 595, 601
Headtrackingsystem 631
Head-Up-Display (HUD) 16, 53, 281
– kontaktanaloges 281
Hebeleistung 453
Hebeplatte 429
Heckwandtür 356
Hedonistischer Aspekt 328
HEINER 241
Heizung 498
Helladaptation 88
Helligkeit 426
Heranführen (Adduktion) 169
Herzfrequenz 642
Heuristische Evaluierung 620
Hexapod 603
Hi-Fi-Anlage 486
Hinweis 284
Hippocampus 72
Histogramm 647, 666
Historischer Überblick 529
HMD 587
HMD-Technologie 595
Hochgeübte
– Handlungen 120
– Tätigkeit 222
Hoch signifikant 674
Höhe des Ellenbogens über der Sitzfläche 192
Hohenstein Institut 247
Honda 530
Hörfläche 92
Hörschwelle 92
H-Punktmessmaschine 351
H-Punkt-Verstellfeld 351
HUD 305
– Gestaltung 358
– kontaktanaloges 305
– Technik 281
Hüftdrehpunkt 369
Hüftpunkt (H-Punkt) 351
Human Builder 359
Human Engineering 16
Human Error Probability (HEP) 60
Human Factors 16
Human Factors Engineering Committee 350
HUMAN FACTORS & ERGONOMICS SOCIETY (HFES) 17
Human Solutions GmbH 246
Hutzenlänge 417
Hybrid
– fahrzeug 686
– konzepte 4
Hybrid III 243
Hyperflexion 172, 371
Hypothalamus 498
Hypothese 620
Hysterese 333
– verhalten 321

I

Ia-Faser 123
Ib-Faser 125
i-Drive 13
Immersion 589
Immersionsfaktor 589
Importanzrechnung 62
Impuls
– methode 201
– rate 73
Indikator für geänderte psychische Beanspruchung 642, 643
Indirekte Sicht 408
Industrial Design 148
Information 33
Informations
– agenten 312
– aufnahme 68, 226
– umsetzung 68
– umsetzungsagent 235
– verarbeitung 68
– verarbeitungsagent 235
Ingenieurpsychologie (engineering psychology) 17
Inhaltsanalyse 650
Innen
– beleuchtung 475
– raumbeleuchtung 476
Inneres Modell 105
Inneres Skelettmodell 243
Innervationsrate 644
Innovation 584, 618
Input 34
Insassenakkommodation 347
Instationaritätsfaktor 491
Instruktion 683

Instrumenten
– beleuchtung 475
– feld 355
– tafel 347, 349
Integration 293
Intelligentes Lichtsystem 22
Intelligenz 456
– fluide 456
– kristalline 456
Interaktion 301
– multimodale 301
Interferenzen 312
Interieur 427
– dunkles 427
– helles 427
International Ergonomics Association (IEA) 17
Internet 310
Interpretation 672
– von Blickdaten 636
Interquartilabstand 667
Intervallskala 648, 667
Inverse Kinematik 245
Involviertheit 589
Ionisierung von Luft 520
Isochronen 401
I-Tafel 16
I-Verhalten 39

J

JACK 244, 246, 358
– Classic 358
J.D. Power 615
JILL 246
Joystick 310, 334
Jugendlichkeits-Risiko 117

K

Kalman-Filter 227
Kälte
– bedingung 498
– sinn 101
– zittern 498
Kaltrezeptor 101, 498
Kammscher Kreis 316
Kano-Methode 466
Kant 147
Kantendetektor 107
Kaskade-Vorhersagemodell 357
Katarakt (Grauer Star) 455
Kategorisierung der Fahrerassistenzsysteme für die primäre Fahraufgabe 486, 557
– Geräusch 486
– Impulsschall 486
– Klang 486
– Ton 486
Kennwert 666
Keyless-Entry-System 475
Kick-Down-Funktion 531
Kieler Puppe 239
Kinder 462
– sitz 462
Kinetose 79, 496
Klapp
– lösung 451
– mechanismus 396
Kleidung 498, 499
Kleidungsstück 196
Kleinhirn 71
Klima 497
– kleidung 510
– messpuppe 502
– summenmasse 500
– windkanal 517
Klimaanlage 498, 515
– halbautomatische 515
– manuelle 515
– vollautomatische 515
Klimadummy MARCO 517
Klimatisierung 510
– von Elektrofahrzeugen 510
Knautschzone 4
Knieraum 393
Kniescheibe 166
Knochen 165
– flache 165
– kurze 165
– lange 165
– mark 165
– punkt 179
– unregelmäßige 165
Kofferraum
– deckel 356
– volumen 347
Kognitive Architektur 231
Kognitives Fahrermodell 231
Kolibri (Kooperative Lichtsignaloptimierung) 556
Kollisionsanalyse 241
Kombilimousine 347, 452
Komfort 7, 146, 328, 347
– ausströmer 509
– eindruck 482
  – akustischer 482
– empfinden 19
– und Fahrsicherheit 492
– winkel 363
Komfortgleichung nach Fanger 501
Komfortpyramide 472
Kommunikation mit dem rückwärtigen Verkehr 550
Kompaktlimousine 347
Kompatibilität 263, 269, 271, 541
– externe 269
– interne 269
– primäre 269
– räumliche 541
– sekundäre 271
Kompensationsanzeige 267
Kompensationsaufgabe 30, 224, 266
Kompetenz 328
Konditionssicherheit 263, 472
Konfidenzintervall 668
Konflikt 60
Konkavlinse 82
Konnektivität 686
Konservative Aussage 649
Konstanzleistung 79, 290, 480
Konstanzmethode 645
Konstitutionsbiologie 182
Konstruktion standardisierter Fragebögen 651
Konstruktivität 79
Kontakt
– fläche 486
– griff 419
– zone 314
Kontaktanaloge Anzeige der Abbiegeempfehlung 308
Kontaktanaloges Head-Up-Display (kHUD) 573
Kontext 118
Kontraktionsart 174
– exzentrische 174
– konzentrische 174
Kontrollverlust 332
Konvektion 102, 498
Konvexlinse 82
Konzeptentwicklung 584
Kooperative Fahrzeugführung 687
Koordinatensystem 350
Kopf
– bedeckung 195
– bewegung 423
– freiheit 347
– hüllkurve 423
– kontur 354
– position 354
– stütze 375
Kopfbasierte Methode 630
Kopf- und Rumpfbewegung 406
Körper
– bau 164
– bewegung 498
– haltung 394, 623
– höhe (Statur) 190, 248, 360
– kontakt 498
– maße 179
– punkt 364

Körperschall 478
Körperteil 164
– distales 164
– dorsales 164
– kaudales 164
– kraniales 164
– proximales 165
– ventrales 164
Körperumrissschablone 238, 351
Korpulenz 248
Korrekturaufwand 323
Korrigierte Effektivtemperatur 501
Kraft 199
– atlanten 204
– aufnehmer 629
– aufwand 349
– hand 381
– messmaschine 201
Kraftmessung 199
– aufgabenspezifische 199
Kraftschlussbeiwert 51
Kraftservomechanismus 124
Kraftsprung 289
Krebsgang 313
Kreisfrequenz ω 40
Kreuzbein (Os sacrum) 170
Kreuzung 233, 235
Kreuzungs
– bremser 141
– huscher 141
– unfall 138
Kritische Fahrsituation 538
Kunden
– akzeptanz von ACC-Systemen 541
– bedürfnis 584
– reklamation 614
– rückmeldung 614
Kupplungspedal 293, 378
Kurvenfahren 135
Kurven gleicher Wahrnehmungsstärke 488
Kurvenlicht 535
– dynamisches 535
– statisches 535
Kurvenwarner 555
Kurzsichtigkeit 82
Kurzzeitgedächtnis 72
Kyphose 170

L

Ladeboden 356
Ladekabel 356
Ladestation 262
Ladevorgang 3
Lage der Gelenke 622
Lagesteuerung 48
Lagrange-Funktion 251
Lämpchen-Array 640
Landoltring 411
Landstraßenlicht 535
Lane-Change-Test 607, 641
Lane Departure Prevention (LDP) 546
Lane Departure Warning (LDW) 305
Länge der Extremitäten 193
Längenservomechanismus 124
Längsachse 164
Längsdynamik 28, 328, 537
Langzeitgedächtnis 72, 232
Lärm 478
Laserscanning 623
Lästigkeit 484
Lastzustand 479
Lateinisches Quadrat 670
Laterale Hemmung 74
Lautheit 482
Lautstärkepegel 284
LED-Lichtsystem 535
Leerhub 288
Left Hand Drive (LHD) 387
Lehnen
– einstellung 375
– fläche 372
Leichtbau
– sitz 372
– weise 3
Leistung (Performance) 149
Leistungsspektrum 494
Leitfadeninterview 650
Leitmaß 247
Lenkeingriff 545
Lenkgefühl 313, 317, 318
– im engeren Sinne 317, 318
– im weiteren Sinne 318
Lenkkraft
– niveau 323
– verlauf 323
Lenkmoment 317
– niveau beim Parkieren 317
– verlauf beim Parkieren 317
– verlauf um die Mitte 317
Lenkrad 347, 349
– banane 411
– durchmesser 319, 381
– lage 380
Lenkradkranz (Dicke) 382
Lenkradmoment 319
– bei Kurvenfahrt 318
– im Grenzbereich 319
– verlauf (Anlenken) 318
Lenksäulenverkleidung 349
Lenkübersetzung 318, 325
– geschwindigkeitsabhängige 325
– nichtlineare 325
Lenkung 50, 313, 325
– direkte 50, 325
– indirekte 50, 325
Lernen 670
Lernende Karten 554
Lernvorgang 274
Lesebrille 412
Leuchtdichte 473
Licht 476
– bewegungsgeführtes 476
– schwankung 632
– stärke 472
– strom 472
– verteilung 535
Lidar 11
Likert-Skala 620
Limbisches System 72
Liniengrafik 679
Linkslenkerfahrzeug 387
Local Mean Vote (LMV) 502
Lokale Geschwindigkeitsbegrenzung 533
Lokomotion 109
Lordose 170
Lordosenunterstützung 186
Luft
– feuchtigkeit 499, 506
– güte 516
– schall 478
– temperatur 498
Lüftungsdüse 514
Lumbalwirbel 170

M

Maculadegeneration 456
Maculaorgane (Statolithenorgane) 95
MADYMO 243, 251, 586
Magic-Body-Control 494
Magnetresonanztomographie 70
Man3D 241
Mangelversorgung der Bandscheiben 371
Manöverplanung 21
Manueller Bremseingriff 540
Markerbasiertes Verfahren 624
Markerlose Messung 626
Markierungslicht 536
Markov-Analyse 135
Marktforschungsunternehmen 615
Maskierungseffekt 492
Maß 182
– äußeres 182
– inneres 182
Massenträgheit 288
Maßkonzeption 347
Maximaler Druck 373

Maximale Regelgeschwindigkeit 537
Maximalkraft 199
Mean Time To Failure (MTTF) 58
Mechanische Impendanz 492
Mechanisches Spiel 320
Mechanoelektrisches Verfahren 623
Mechanorezeptoren 71
Mechatronik 334
Median 647, 666, 667
Medianebene (Sagittalebene) 164
Medulla oblongata 72
Mehrkörpermechanik 251
Meilensteine (mile stones) 586
Meissnerkörperchen 98
Memosik 492
Menschliche Schablone 182
Menschliches Versagen 153
Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) 272
Mensch-Maschine-Systems (MMS) 17, 35
Menschmodell 584
– virtuelles 584
Mentale Beanspruchung 643
Menü
– baum 310
– struktur 310
Merkelzellen 98
Mesomorph 182
Mess
– wert 669
– zyklus 643
Messbesteck 179, 621
Messsensor
– am Fahrzeug 629
Messung 201
– dynamische 201
– gute 637
– nicht akzeptable 637
– statisch isometrische 201
Metabolismus 499
Methode des „lauten Denkens“ 657
Microvan 347
Migration 146
Mindest
– größe 85
– kontrast 85
– leuchtdichte 85
– öffnungsweite 433
– zeit 85
Missbrauch 155
Mistakes 155
Mittelkonsole 347, 355
Mittelohrhöhle 91
Mittelwert 667
Mittengefühl 317, 323
MMI-System 15
Mobiles Endgerät 687
Mobile Unterhaltungsgeräte 463
Mock-Up 590, 591
– variable 591
Modalwert 667
Mode Awareness 268
Modell 222, 251
– adaptives 226
– anthropometrisches 222, 251
– biomechanisches 240, 251
– Cross-over- 224
– Dual-Mode- 226
– Fuzzy-Driver- 229
– kognitives 222
– optimaltheoretisches 226
– regelungstechnisches 222
– strukturveränderliches 226
Modelle aus Hartschaum 586
Modellierung 482
– des Zeitaufwandes 449
– psychoakustische 482
Mode und Zeitgeist 147
Modus 591, 667
– Automatik- 591
– interaktiver 591
Monopoint-System 194
Monotonie 150, 268
Motion-Cueing (Bewegungswahrnehmung) 602
Motivation 120
Motor
– leistung 330
– ordnung 478
– steuerung 304
Motorhaube 356
Motorik 71
– Fein- 71
– Grob- 71
Motorische Einheit 123
Motorisches Rauschen 227
Move eye and head 406
MTM-Methode 241
Müdigkeitswarner 6, 529, 562
Multi-Agent-System 235
Multi Purpose Vehicle (MPV) 347
Muskel
– anstrengung 644
– faser 173
– kraft 244
– querschnitt (PCSA) 175
– schmerz 371
– spindeln 71, 98, 123
– zellen 173
Muskulatur 68, 164
– glatte 173
– quergestreifte 173
MUTE 687
Myofibrillen 174
Myosin 174

N

Nachführgröße 28
Nachhaltigkeit (suitability) 619
Nachschwingen 485
Nachtsichtgerät 305
Nachtspiegelung (night reflection) 414
Nahpunkt 232
Nanobeschichtete Scheibe 515
NASA-TLX 651
Navigations
– aufgabe 20, 28, 554
– system 530
Navigator 530
Nebelorientierung 46, 226
Neigung des Lenkrades 382
Nervensystem 164
Netzhaut 82
Neuromuskuläre Verzögerungszeit 223
Neuronales Netz 229
Neuronenzelle 74
Neutrale Fahrwerkauslegung 49
Neutrale Körperbewegung 443
Neutrales Fahrverhalten 317
Night Vision 12
Nominalskala 667
Nominalskalenniveau 647
Normalgewicht 197
Normalsichtigkeit 82
Normativ vorgegebene Geschwindigkeitswerte 638
Notbremsassistent 6, 543
Nucleus pulposus 171
Nullhypothese 674
Nutzsignal 485
Nutzungs-
– häufigkeit 567
– verhalten 539, 614
NX General Packaging 358
Nystagmus 84

O

Oberflächenhaptik 285
– Bedien- oder Betätigungshaptik 285
Objektive Messung 621
Objektivität 618
Öffnungswinkel 349
Okklusion 639
– methode 639

Öko-Kennlinie 329
Olfaktorikexperte 518
Ölstab 356
– Ölstand 356
One-Pedal-Drive 331
Operationalisierung 651
Optimierungsmethode 357
Optische Präsentation 592
Optischer Fluss 109
Optische Ruhe 112
Ordinalskala 647, 667
Ordnung 264, 265
– räumliche 264, 265
– zeitliche 264
Original Equipment Manufacturer (OEM) 584
Ortsfenster 266
Ossa longa 165
Ossa plana 166
Output 34
Overall Vehicle Architecture (OVA) 359
Overall Workload Index (OWI) 658

P

Paarweiser Vergleich 677
Pacini-Korpuskel 98
Package Designer 357
Packaging 19, 238
PADRIC (PATH DRIVer Cognitive) 235
Panorama-Windschutzscheibe 428
Paper pilot 222
Parametric Model for Automotive Packaging and Ergonomic Design 359
Pariser Stich 194
Parkdistanzgerät 284
Parken 550
– Längs- 550
– Schräg- 550
– Senkrecht- 550
Parkhaus 262
Parkplatzsuche 262, 554
PCMAN 247
PD-Regler 222
Pedal 293, 349, 376
– anordnung 376
– nutzung 639
– referenzpunkt (PRP) 352
Pedalerie 347
PELOPS 235
Perilymphe 92
Personengruppe 664
Perzentil 181
– 50. 646
– 50-Perzentil Mann 238
– simulation 597
Pfeilachse (Sagittalachse) 164
Pfeilsymbol 308
Pfeilung 377
Phasen
– gang 45
– rand 45
– reserve 225
– winkel 41
Phasen eines Einsteigvorgangs 447
Philips CARIN 530
Photopischer Bereich 474
Physiologische Parameter 641
PID-Regler 39
Pilotstudie 668
Pionier 530
Plan
– bivariater 669
– mit Messwiederholung 670
– multivariater 669
– univariater 669
Plateaumethode 201
Point of no return 570
Polarisationssonnenbrille 415
Pollenfilter 516
Popometer 100, 324
Portaltür 431
Position 394
– aufrechte 394
– der Hände am Lenkrad 380
Positionierpunkt (PHPT) 369
Positionscodierung 273
Potentialtrigger 564
Power 679
Power spectral density (PSD) 643
Powerwall 588
Prädiktion von Diskomfort beim Einstiegsvorgang 450
Prädiktor 227
Präsenz 589
Praxeologie 17
Präzisionsmodell 223
Pre-Crash 566
Pre-Safe 543
Pretest 657
Previewing-Fahrwerk 494
Probabilistik 37
Produkt
– begehrlichkeit 465
– entstehungsprozess (PEP) 584, 618
– ergonomie 19
– planung 584
– qualität 463
Produktionsergonomie 19
Pro-Engineer 359
Programmierung 307
– bei stehendem Fahrzeug 307
– der Strecke 307
– während der Fahrt 307
Prolaps 172
Pronation 169
Proportion 248
Proportionen der Versuchspersonen 622
Proportionsunterschied 184, 360
Prozentuale Lastverteilung 373
Prozentualer Anteil an Umweltblicken 637
Prozess
– intensität 60
– konstante 58
Prüfkörper 492
Pseudodreidimensionalität 280
PSM 10
Psychologische Einheit 117
Psychophysik 148, 644
Pulsierendes Pedalgefühl 531
Punktewolke 649
Pupille 82, 474
Pupillendurchmesser 632
Push to Talk 300
P-Verhalten 39

Q

QN-MHP (Queuing Network – Model Human Processor) 234
Qualität 31, 464
– akustische 464
– einer Empfindung 648
– Geruchs- 465
– optische 464
– taktile 464
Qualitative Erhebungsmethode 649
Quasi-lineares Mensch-Modell 222
Querachse 164
Querdisparation 90
Querdynamik 28, 544
Querfortsatz (Prozessus transversus) 171
Querregelung (Lenkverhalten) 639

R

Rad 493
Radar 11
Radlastschwankung 494
Radstand 319, 493
Rampenmethode 201
Rangreihe 647
Rastscheibe 287
Rating Scale Mental Effort (RSME) 658
Ratingskala 654
– bipolare 654
– unipolare 654

Raumbedarf 367, 423
– bei dynamischer Kurvenfahrt 423
– dynamischer 423
– resultierender 423
– statischer 423
Raumgefühl 356, 426, 594
Räumliche Präsenz 589
Reafferenzprinzip 113
Reaktionszeit 51
Realitäts
– faktor 589
– urteil 589
REALMAN 253
Rechnergestütztes Anthropologisch-Mathematisches System zur Insassen Simulation bzw. Engl. Bezeichnung: Realistic Anthropological Mathematical System for Interior-comfort Simulation (RAMSIS) 241, 244, 246, 357, 361, 586
– Familie 361
– kognitiv 250, 358, 401
– Next-Generation 248
– sitzt 250
– Seat Belt Design 358
Rechtslenker
– fahrzeug 387
– markt 189
– problematik 386
Redundanz 59, 269
Reflexblendung (reflected glare) 414
Reflexion 355, 413
– diffuse 414
– diffus-gerichtete 414
– Entstehung 413
– gerichtete 414
Reflexionsbild 415
Regelabweichung 29
Regelkreis 38
– bild 37
Regelstrecke 28, 37
Regelung 224
Regelungstechnik 36
Regelungstheorie 37
Registrierung 630
– Augenlid- 630
– Limbus- 630
– Pupillen- 630
Regler 28, 37
Reglerhand 381
Regressionsanalytisches Verfahren 649
Reibung 288
Reibungshysterese 287
Reichweite 686
Reifen
– druck 304
– latsch 313
– nachlauf 313
Reihenfolge der Fragen 657
Reiseplanung 20
Reiz
– höhe 645
– schwelle 645
– stärke 73
– unterschiedsschwelle 645
– zuwachs 645
Rekuperation 3, 328, 331
Rekuperationsphase 686
Relative Luftfeuchtigkeit 499
Reliabilität 618
Repräsentationseinheit 117
Repräsentative Stichprobe 619
Repräsentativität der Ergebnisse 682
Resonanz 487
– biomechanische 487
Restreichweite 261, 308
Restriktion 363, 366
Resumability 640
Retina 82
Retinaler Fluss 113
Rezeptor 73
Richtungskonstanz 113
Richtungsorientierung 46, 95, 226
Riechkolben 105
Riechschleimhaut 104
Right Hand Drive (RHD) 387
Risiko 121, 234
– homöostase 122
– objektives 121
– subjektive Schätzung 121
Rollenrichtung 313
Rollgeräusch 478
Rotation 169
– Außen- 169
– Innen- 169
Rotationsbeschleunigungskraft 96
Routineverstoß 154
R-Punkt 352
Rücken
– kontur 375
– mark 171
– schmerzen 371
Rückkopplung 28
Rückmeldung 223, 263, 269, 300, 323, 330, 472
– akustische 330
– variable haptische 300
Rückstell
– -kraft 293
– -verhalten 323
Rück- und Seitenfenster 355
Rückwärtsfahrt 336, 406
– haltungsmodell 406
Rudimentäre haptische Rückmeldung 596
Ruffinikörperchen 98
Rundfahrt 260

S

Sacculus 95
Safari door 390
Safety 57
– primary 57
– secundary 57
SAFEWORK 244
– Human Builder 245
Sakkade 83, 84, 632
Sakralwirbel 170
Säkulare Akzeleration 188
SANTOS 242, 571
Sarkomere 174
Schall 478
– belästigung durch Klimaanlage 516
– raum 480
Schalt
– empfehlung 304
– hebel 421
– modell 228
– strauß 421
Schalter 35
Schattenrissverfahren 621
Scheibenwaschanlage 515
Scheinwerfer 392
Scheinwerferorientierung 46
Schematische Darstellung 672
Scherentür 432
Scherkraft 372
Schiebetür 431
Schimmelpilzbildung 519
Schlechtwetterlicht 536
Schleppmoment 332
– erlebbares 332
– hohes 332
– Verbrenner- 332
Schlupf 10
– zone 314
Schmerzrezeptor 172
Schmetterlingstür 432
Schnittfrequenz 224
Schnittstelle 272, 591
– bidirektionale 591
Schönheit 147
Schräglaufwinkel 313
Schuh
– größe 349
– typ 349
Schulterblick 408
Schulter- und Kopfraum 356

Schulungsmaßnahme 152
Schutz 57
Schutzabstand 434
Schwachpunkt 458
Schweiß 498
– rate 101
Schwelle 429
Schwereloser Zustand 363
Schwingung 486
Schwingungs
– bewertung 488
– phänomen 486, 491
– stoßhaltiges 491
Seating Reference Point (SgRP) 351
Seekrankheit 79
Segeln 331, 686
Seheindruck des Fahrers 401
Sehen 114
– indirektes 114
– peripheres 114
Sehne 164
– elemente (Golgielemente) 124
Sehschärfe
– dynamische 111
Sehzeichen 283
Seitenführungsqualität 31
Seitenhalt 375
Seitenkraft 313
Seitenwindeinfluss 336
Sekundenschlaf 546
Selbsterklärend 274
Selbsterklärungsfähigkeit 73, 275
Selbstleuchter 413
Sender 273
Seniorenfahrzeug 461
Sensor 273, 333
– Sensory conflict theory 496
Serienentwicklung 586
Service 356
Servobremse 332
Servolenkung 9
Shutterbrille 594, 639
Sicherheit 4, 56, 328, 354, 355, 566, 618
– aktive 5, 57, 566
– passive 4, 57, 355, 566
Sicherheits
– abstand 33, 52, 537
– fahrschaltung (SIFA) 562
– gurt 4, 355
– system 241
Sicherungselement 57
Sicht 355, 396
– auf Bedien- und Anzeigekomponenten 410
– auf die Straße 497
– direkte 355
– indirekte 355
– nach hinten 406
– pyramide 409
– simulation 600
– strahl 214
– verbesserungssystem 534
– ziel 355
Sichtbarkeit 401
– binokulare 401
– monokulare 401
Sichtbedingung 347, 367, 396
Sichtbereich 398
– nach vorne 398, 399
– zur Seite 398
Sichtverdeckung 398
– binokulare 398
Side Assist 549
Sidestick 334
Siebensegmentanzeige 276
Siemens PLM 242
Signal-Rausch-Abstand 485
Signifikanz 674
– -niveau 674
– -test 664, 672, 673
SIMPACK 251
Simple-Staircase-Verfahren 646
Simulation 599, 604, 605
– akustische 599
– Geräusch- 604
– Lenk- 605
– Programme 605
Simulationsansatz 245
Simulator
– krankheit 611
– technik 600
Simultane Raumschwelle 99
Simultanious-Engineering 584
Sinnes
– epithel 95
– organsystem 487
Situation Awareness 269, 565
Sitz 187, 347, 396, 509
– Bedarfs- 347
– für Kinder 396
– gestaltung 371
– heizung 498, 506
– kiste 587, 588, 590
– komfortaspekt 613
– kontur 372
– Not- 347, 396
– platz 347
– kompromittierter 347
– referenzpunkt 351
– tiefe 191
– ventilierter 509
Sitzbeinhöcker 372
Sitzbreite (Eingesessene Gesäßbreite) 192
Sitzdruck
– messmatte 626
– verteilung 626
Sitzeinstellung 355, 375
– automatische 375
Sitzen 355
Sitzflächenlänge 374
– veränderbare 374
Sitzflächenneigung 374
– einstellbare 374
Sitzhaltung 363
– in Eisenbahnzügen 394
Sitzposition 377
– symmetrische 377
Sitzreihe 356
– dritte 356
– zweite 356
Sitzriese 184
Sitz- und Lenkradheizung 512
Sitzzwerg 184
SizeGERMANY 180
SizeITALY 248
Skala 653
Skalen
– niveau 647, 653, 666
– verankerung 655
Skalierung der Muskelkräfte 208
Skelettmuskulatur 173
– glatte 172
– quergestreifte 173
Slips 155
Smartphone 614, 688
Social Attituds to Road Traffic Risk in Europa (SARTRE) 534
Society of Automotive Engineers (SAE) 350
Softdummies 590
Software-ergonomische Gestaltung 688
Software in the Loop (SIL) 587
Solardach 513
Soll-Blickverhalten 128
Sollgeschwindigkeit 51
Somatotyp 182
Sommerbetrieb 506
Sommerlicher Temperaturüberhöhung 505
Sommerluftaufheizung 506
Sonderausstattung 529
Sone 92
Sonnenblende 349, 416
Sound-Design 481
Soundprogramm 483
Soziale Konvention 607
Spaß 122

Spaßbremse 574
Speech-Transmission-Index (STI) 485
Spektrale Leistungsdichte 643
Spezifischer Winkel- bzw. Längenrezeptor 276
Spiegel 281, 408, 410, 602
– asphärisch gewölbter 410
– Außen- 408, 602
– Innen- 408
– Innenraumrück- 602
Spinnendiagramm 647
Split-half Berechnung 619
Spotlight-Scheinwerfer 536
Sprach
– signale 285
– steuerung 300
– verständlichkeit 485
Sprache 73, 231
Spreizen (Abduktion) 169
SPSS, R (als Open-Source-Variante) 677
Spurführungsassistent 6
Spurhalte
– -assistent 12, 544
– -qualität 32
– system (Lane Keeping Support-System, LKS) 545
Spurverlassenswarner (Lane Departure Warning, LDW) 544
Spurwechsel 282
– -assistent 12
– unterstützung 12
SSDRIVE 235
Stäbchen 83, 474
– mesopische 474
– skotopische 474
Stabilisierungsaufgabe 22, 28
Stadtlicht 535
Stammlänge (Sitzhöhe) 190
Standard
– abweichung 667
– normalverteilung 668
Standardhaltung 394
Standardisierte Methode 517
Standardisierter Fragebogen 620
Standards & Regulations 358
Standbelüftung mit Solartechnik 513
Standgas 9
Statement 656
State, Operator And Result (SOAR) 232
Stationäre Kreisfahrt 316
Statische Haltearbeit 371
Statischer Sitzdruck 492
Statistische Regel 621
Stauassistent 12, 549
Steer-by-Wire 313, 334
Stehende Peilung 141, 405
Stehende Wellen 479
Steißbein (Os coccygeum) 170
Stellgröße 29
Stereotypie 270
Steuerhorn 338
Steuerung 28, 36, 224, 225
– antizipatorische 225
Stichprobe
– heterogene 665
– repräsentative 664
– stratifizierte 665
Stichproben
– größe 664
– ziehung 664
Stillstandsmanagement 550
Stimulation 328
Störgröße 29, 37, 472
Störung 58
Störvariable „Zeit“ 670
Stößigkeit 323
Stotterbremse 531
Strahlungs 499
– -austausch 499
– -gleichgewicht 499
Strategie 438, 453
– Ein-Hand- 453
– Mischformen- 438
– Umdreh- 438
– Zwei-Hand- 453
Streckung (Extension) 169
Streuung 434
Strichmännchen 625
Strömungs
– geschwindigkeit 501
– verhältnis im Innenraum 516
Strukturelles Engramm 114
Stufenhecklimousine 347, 452
Sturges-Regel 656
Subjektiv erlebte Anstrengung 658
Subjektiver Nutzen 118
Subjektive Schätzung 121
Subskala 658
Summenpunkt 30, 35, 69
Superimpose-Methode (PCMAN) 622
Supination 169
Synapse 74
Synchropunkt 586
Synovia 166
System 33
– aktives 35
– dynamik 35
– grenze 537
– monitives 36
– Post-Study System Usability Questionnaire (PSSUQ) 620
– struktur 34
– System Usability Scale (SUS) 620
– zuverlässigkeit 37
Systemergonomie 18, 20, 260, 263
System for Aiding Man-Machine Interaction Evaluation (SAMMIE) 241
Systemtheorie 33
Szenarienforschung 584

T

Tachometer 303
Tageslichtspiegelung (daylight reflection) 414
Tank
– deckel 356
– öffnungsklappe 390
Targetfahrzeug 612
Tastsinn 100
Technikmodell 584
Technische Psychologie (technical psychology) 17
Technologievergleich 633
Tecmath 246
Teewageneffekt 313
Temperaturschwellenwerte 103
Tempomat 9
TEMPUS 246
Tendenz zur Mitte 655
Test
– fahrer 611
– gelände 611
Teststärke 679
Thalamus 71
Thematische Blöcke 657
Thermische
– Behaglichkeit 102
– Strahlung der Sonne 507
Thermorezeptor 101
Thorakalwirbel 170
Tiefenwahrnehmung 106
Timbre 482
Time
– to collision (TTC) 53
– to intersection (TTI) 233
– to line crossing (TLC) 50, 233
TLC-System (Time to Line Crossing) 544
TNO 251
Toleranzschwelle 330
Tommy 241
Toolboxen in Matlab 677
TOP-Event 60
Tortendiagramm 647
Toter Winkel 282
Totzeit 224, 227
Touchpad 297, 310
Touchscreen 71, 296, 310, 495

Tracking 39
– experiment 223
– pursuit 48
Trägheit des Hand-Armsystems 223
Trainingsdurchlauf 619
Trajektorie 21
Translationsbeschleunigungskraft 96
Transversal
– achse 164
– ebene 164
TravelPilot IDS 530
Treibhauseffekt 505
Tremor 84
Trennschärfe 679
Treppenstufe 429
Trommelfell 91
Tulpe 413
TUM CREATE 687
Tunnelblick 150, 324, 640
Tür 355
– außengriff 429
– hinten angeschlagene 430
– konzept 428
– schweller 356
– verkleidung 349
– vorne angeschlagene 428
Turbulenzgrad 509
Tustin 222
Tutorial 375
Typ
– athletischer 182
– leptosomer 182
– pyknischer 182

U

Übelkeit 347, 463
Überforderung durch Unterforderung 149
Übergangsfunktion 38
Übergangswahrscheinlichkeit 62
Übergangszone 315
Überholverbotsanzeige 305
Überlagerungslenkung 326
Übernahme 540
Übersteuern 49, 317
Übung 268
Umblickgesichtsfeld 215
Umfeldleuchtdichte 85
Umgebungseinfluss 472
Umsichtuntersuchung 249
Umwelt 34
– auswirkung 34
– einflüsse 29
– einwirkung 34
– ergonomie 18, 472
– objektbeeinflusste 34
– ursprüngliche 34
– wirksame 34
Unfallstatistik 4, 614
Untergewicht 198
Unterschiedsschwelle 74
Untersteuern 49, 317
Untersuchung 607, 608, 609
– fertigkeitsbasierter Stabilisierung 608
– regelbasierter Bahnführung 608
– regelbasierter sekundärer Aufgaben 609
– regel- und wissensbasierter Navigation 608
– regel- und wissensbasierter tertiärer Aufgaben 609
– sekundärer Fahraufgaben 607
– wissensbasierter sekundärer Aufgaben 609
Unterwasserversuch 363
Up/Down-Verfahren 646
Urban-Projekt 574
Ursache-Wirkung-Prinzip 36
Ursache-Wirkungsbeziehung 669
Utriculus 95

V

Validierungsversuch 249
Validität 599, 600, 618
– absolute 599
– externe 682
– interne 683
– relative 599, 600
Variable 621
– abhängige 621, 669
– unabhängige 621, 669
Variable Einstiegsgeometrie 445
Variable Leuchtweitenregelung 536
Variabler Ergonomieprüfstand 591
Variante 364
– augenpunktfixierte 364
– fester Fersenpunkt 364
Varianzanalyse
– zwei- und mehrfaktorielle 677
Varianz der Leistungsfähigkeit 455
VDO 530
Vehicle Information and Communication System (VICS) 557
Vehicle in the Loop (VIL) 587
Vehicle Occupant Accommodation 359
Vehicle Ownership Satisfaction Study (VOSS) 615
Verallgemeinerung 656
Verantwortung 151
Verbesserungsmaßnahme 61
Verbrauchsminderung 329
Verdeckung 355
Verdeckungs 355
– effekt 401, 485
– wahrscheinlichkeit 405
Verdrehung des Oberkörpers 377
Verdunstung 102
Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 350
Verfahren 42, 204
– gelenkspezifisches 204
– nicht-parametrisches 43, 676
– parametrisches 42
– Skalierungs- 207
– verteilungsbasiertes 676
– verteilungsfreies 676
Verfügbarer Platz 550
Verfügbarkeit 58
Vergleich
– von Gestaltungsalternativen 664
– von Varianten 664
Verhalten 121, 145
– fertigkeitsbasiertes 115, 121
– Processing- 127
– regelbasiertes 121
– regelkonformes 145
– Scanning- 127
– wissensbasiertes 121
Verhaltensmuster 600
Verhältnisskala 649, 667
Verkehr
– rollender 688
– stehender 688
Verkehrs
– konflikt 60
– psychologie 17
– situation 128
– zeichenassistent 305
– zeichenbeobachter 533
Verkippen der Simulatorkabine 599
Verknüpfung 59
– ODER- 59
– UND- 59
Verkümmerte Rückenmuskulatur 371
Vermeidungsaktion 60
Versagen 58
Verschaltung 35
– parallele 36
– serielle 35
Versetzbarer Ladeboden 453
Version 358
– Enhanced- 358
– Standard- 358
Verstärkungsreserve 45
Verstellbereich 382
Verstellung des Sitzes 364

Verstoß 151, 154
Versuch
– im öffentlichen Straßenverkehr 613
– im Realfahrzeug 611
Versuchs
– fahrzeug 613
– person 590
– personenpool 591
Versuchsplan 620, 664
– abhängiger 670
– einfaktorieller 669
– unabhängiger 670
– zweifaktorieller 669
Verteilung 674
– Breite 666
– Streuung 666
Vertikal- oder Longitudinalachse 164
Vertrauensintervall 664, 668
Verzögerungsverhalten 332
Verzweigungspunkt 35
Vestibular
– apparat 686
– organ 71
Videotechnik 599
Vigilanz 149, 643
Virtual 589
– Environment 589
– Presence 589
Virtual Reality (VR) 589
Virtuelle Car-Klinik 615
Virtuelle Realität (VR) 584
Virtueller thermischer Dummy 516
Virtuelles Fremdfahrzeug 611
Viskose Dämpfung 320
Visual Field 233
– functional 233
– peripheral 233
Vollständige Permutation 670
Vorausschau 225
– punkt 225
Voraussichtzeit 52
Vorhaltglied 222
Vortrieb 331
V(λ)-Kurve 472

W

Wahrnehmbarkeitsschwelle 492
Wahrnehmung 479
– haptische 101
– kinästhetische 101
– Tiefen- 101
Wahrnehmungs
– agent 235
– konflikttheorie (Sensory Conflict theory) 496
– schwelle 104
Wahrscheinlichkeitstopf 249
Wahrscheinlichste Stellung 363
Wankbeschleunigung 98
Wärme
– eintrag durch die Sonne 504
– schutzverglasung 508
– sinn 101
– strahlung 102
Warmrezeptor 101, 498
Warngrenze 152
Warnung 284, 543
Wash-out-Strategie 599
Wasserdummy 491
Wasserkasten 390
Weber-Fechnersches Gesetz der Psychophysik 645
Weber-Konstante 645, 686
Wechselwirkung 672, 677
– disordinale 681
– ordinale 681
– semi-disordinale 681
Weichgewebe 164
Weitsichtigkeit 82
WERNER 241
Whole-Body-Vibrations 371
Wiener Übereinkommen von 1968 (WÜStV) 533
Windgeräusch 479
– an der Karosserie 478
Windschutzscheibe 355
Winkeldetektor 107
Winterbetrieb 505
Wirbelbogen (Arcus Vertebrae) 171
Wirbelkörper (Corpus Vertebrae) 170
– zentrale 170
Wirbelloch (Foramen vertebrae) 171
Wirbelsäule 166, 169, 170
– präsakrale 170
Wirk
– erwartung 567
– potenzial 566
Wirkungsgrad 2
Wischeranlage 390
Workload (NASA-TLX) 657
Wortcodierung 274

X

X-by-Wire 333
Xenonlicht 535
X-Y-Schlitten 599

Z

Zapfen 83
– sehen 474
Zeichencodierung 274
Zeichenschablonensatz nach Jenik 239
Zeichenschablone (SAE J826) 238
Zeit
– budget 266
– druck 266
– fenster 266
– spanne 269, 656
– zone 566
Zeit bis zur Kreuzung 233
Zeitlicher Aspekt 322
zeitliche Relationen 604
Zelle 76
– hyperkomplexe 76
– komplexe 76
zentrale Verarbeitung 227
Zentrifugalkraft 48
Zervikalwirbeln 170
Zielgenauigkeit 323
Ziliarmuskel 82
Zufall 673
Zufalls
– auswahl 665
– verteilung 674
Zufassungsgriff 419
Zufriedenstellung 619
Zugang zur 2. und 3. Sitzreihe 450
Zündzeitpunktverstellung 8
Zuordnung 336
– funktionale 336
– richtungskompatible 336
Zusatzaufgabe 132
Zusatzheizung 512
Zustand der Welt 118
Zuverlässigkeit 57, 618
Zwei-Ebenen-Modell 224
Zweitaufgabe 640
Zweitüriges Fahrzeug 451
Zwischenwirbelscheibe (Discus intervertebralis) 170