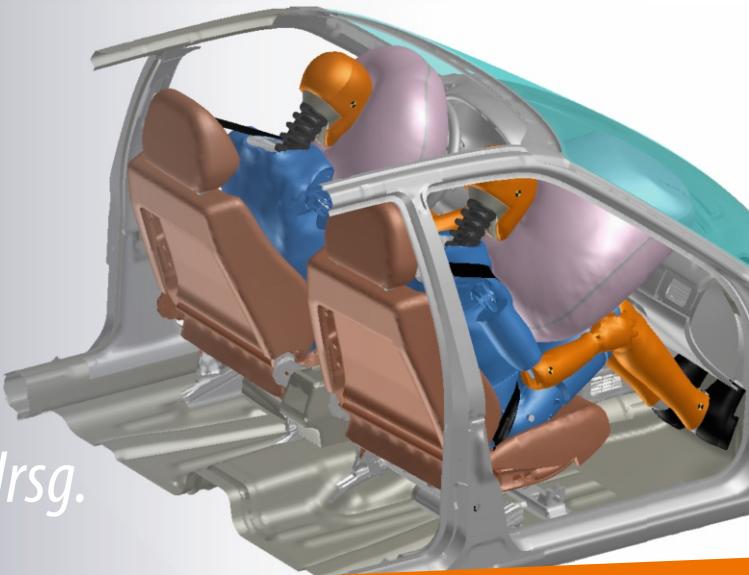


Florian Kramer *Hrsg.*



# Integrale Sicherheit von Kraftfahrzeugen

Biomechanik · Simulation · Sicherheit  
im Entwicklungsprozess

4. Auflage

---

## **ATZ/MTZ-Fachbuch**

Die komplexe Technik heutiger Kraftfahrzeuge 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 Reihe ATZ/MTZ-Fachbuch, welche die zum Verständnis erforderlichen Grundlagen, Daten und Erklärungen anschaulich, systematisch, aktuell und anwendungsorientiert zusammenstellt.

Die Reihe wendet sich an Fahrzeugingenieure in Praxis und Studium, die im Rahmen beruflicher Weiterbildung Nachschlagebedarf haben und im Zusammenhang Fragestellungen ihres Arbeitsfeldes verstehen müssen, sowie an Professoren und Dozenten an Universitäten und Fachhochschulen mit Schwerpunkt Kraftfahrzeugtechnik. Sie liefert gleichzeitig das theoretische Rüstzeug für das Verständnis wie auch für die Anwendungen, wie sie für Gutachter, Prüfer und Entwicklungingenieure in der Automobil- und Zuliefererindustrie benötigt werden.

---

Florian Kramer  
Herausgeber

# Integrale Sicherheit von Kraftfahrzeugen

Biomechanik – Simulation –  
Sicherheit im Entwicklungsprozess  
4., erweiterte und korrigierte Auflage

Mit 346 Abbildungen und 55 Tabellen



Springer Vieweg

*Herausgeber*

Prof. Hon.-Prof. Dr.-Ing. Florian Kramer  
SAFE  
Dresden, Deutschland

Das Bildmotiv für die Umschlaggestaltung wurde von TAKATA Insassenschutzsysteme zur Verfügung gestellt.

ISBN 978-3-8348-2607-7

DOI 10.1007/978-3-8348-2608-4

ISBN 978-3-8348-2608-4 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 1998, 2006, 2009, 2013

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 dürfen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorkrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media  
[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)

---

## Vorwort zur vierten Auflage

Es ehrt mich sehr, zu diesem hervorragenden Buch, das nunmehr bereits in seiner vierten Auflage erscheint, ein Vorwort schreiben zu dürfen. Dieses Buch kann jedenfalls als eine wesentliche Referenzarbeit der passiven Sicherheit bezeichnet werden. Dies zeigt auch die große internationale Nachfrage nach diesem Schriftwerk, das sowohl in der Ausbildung als auch als Nachschlagewerk umfassend verwendet wird.

Auch die Namensliste der Koautoren dieses Buches zeigt, dass viele bedeutende Wegbereiter der passiven Sicherheit wesentlich am Inhalt dieses Buches beteiligt waren. Die Tatsache, dass in dieser Auflage aber auch einige neue Autoren aufscheinen, zeigt, dass der Inhalt des Buches gegenüber der Voraufgabe wesentlich überarbeitet und aktualisiert wurde.

James Remfrey, der erstmals an diesem Buch mitgearbeitet hat, widmet sich mit seinem umfassenden Elektronikwissen den neuen, ungeheuer an Bedeutung gewinnenden Sensorsystemen. Trotz der schnellen Veränderungen, die in diesem Sektor vorliegen, gibt das von ihm gestaltete Kapitel einen exzellenten Überblick über die Funktionsweise sowie über Probleme verschiedener Sensorsysteme zur Unfallerkennung und Vermeidung. Aber auch die Aspekte der Elektronik in der passiven Sicherheit sowie die derzeit intensiv diskutierte Unfalldatenspeicherung werden in diesem Abschnitt behandelt.

Bernd Lorenz präsentiert als langjähriger Experte für passive Sicherheit und Biomechanik bei der BASt umfassend die umfangreichen gesetzlichen Rahmenbedingungen, die die passive Sicherheit beeinflussen.

Ulrich Franz diskutiert als eine der Schlüsselpositionen im Bereich numerischer Simulationstechniken in der integralen Sicherheit von Kraftfahrzeugen die derzeitigen Methoden aber auch neueste Möglichkeiten der Optimierung und des Datenhandlings, wobei gerade letztes Thema im Bereich der Fahrzeugsicherheit enorm an Bedeutung gewinnt.

Rodolfo Schöneburg in seiner Position als Leiter der Sicherheit und Fahrzeugfunktion in der Daimler AG in Sindelfingen präsentiert den Einfluss der Fahrzeugsicherheit auf den gesamten Entwicklungsprozess eines Fahrzeugs.

Auch die zahlreichen weiteren Mitarbeiter, die nicht namentlich erwähnt sind, garantieren aufgrund ihrer umfassenden Kompetenz im Fachbereich eine hervorragende Qualität und Aktualität dieses Buches.

Dem Autor und Herausgeber dieses Buches, meinem Freund Florian Kramer, gratuliere ich besonders dafür, dass er mit diesem hervorragenden Buch einen komplexen und umfangreichen Stoff umfassend aufbereitet hat. Er hat sein hervorragend gegliedertes Fachbuch überarbeitet und neu aufgelegt, wobei vor allem auch die sich rasch ändernden Aspekte der Integralen Fahrzeugsicherheit umfassend und aktuell adressiert werden. Es kann für jeden als echtes Pflichtwerk bezeichnet werden, der sich mit verschiedenen Aspekten der Fahrzeugsicherheit beschäftigt.

Ich wünsche den Autoren, dass auch die 4. Auflage rasch verkauft wird und empfehle das Buch vor allem meinen Studenten als aktuelles Lehrbuch und Nachschlagewerk. Da das Buch umfassend überarbeitet wurde und die neuesten Aspekte der Fahrzeugsicherheit behandelt, scheint es unumgänglich, die neue Auflage auch dann zu beschaffen, wenn man bereits die letzte Auflage besitzt.

Graz, 1. Jänner 2013

Hermann Steffan  
Uni.-Prof. Dr. techn. Dipl.-Ing.  
Technische Universität Graz  
VSI – Vehicle Safety Institute

---

## Danksagung

Für Ihr Interesse und Ihre Entscheidung, sich das vorliegende Buch „Integrale Sicherheit von Kraftfahrzeugen“ vorzunehmen, bedanke ich mich bei Ihnen, dem geneigten Leser. Ihnen liegt die vierte Auflage des Buches vor, das sich von der dritten zunächst dadurch unterscheidet, dass ich den Titel erweitert habe, da nicht mehr nur die passive, sondern die umfassendere integrale Sicherheit, die die Wechselwirkung zwischen der aktiven und der passiven Sicherheit darstellt, betrachtet wird. Selbstverständlich bin ich auch den Hinweisen der bisherigen Leserschaft nachgegangen und habe die festgestellten Unzulänglichkeiten berichtigt. Den Tippgebern statue ich an dieser Stelle meinen aufrichtigen Dank ab.

Zudem ist es mir eine ganz besondere Ehre und ein überaus freudiger Anlass, meinen Dank an dieser Stelle voranzustellen und gegenüber den Kollegen zu wiederholen, die ich für das vorliegende Werk gewinnen konnte, die hier nun als Mitauteuren tätig waren und neben ihrer täglichen Arbeitsbelastung ihre kompetente Unterstützung eingebracht haben. Es sind dies die Herren (in der Reihenfolge der Kapitel):

**Univ.-Prof. Dr. tech. Dipl.-Ing. Hermann Steffan** vom Institut für Fahrzeugsicherheit der Technische Universität Graz. Er schrieb freundlicherweise das Vorwort zu dieser Auflage und gab mir in kollegialer Hilfsbereitschaft wertvolle Hinweise auf aktuelle Erkenntnisse innerhalb der Fahrzeugsicherheit.

**Dipl.-Ing. James Remfrey**, Direktor für Technology Intelligence bei der Continental Teves AG & Co. oHG in Frankfurt/Main. Er erweiterte maßgeblich das (zugegebenermaßen für Fahrzeugingenieure recht schwierige) Kapitel „Sensorik zur Unfalldetektierung“, das bereits mit der zweiten Auflage durch Thomas Görning von Continental in Ingolstadt eingesteuert wurde. Ohne die aufgezeigten Erweiterungen hinsichtlich Erwartungshorizont und künftiger Entwicklungen kommt ein Buch zur integralen Sicherheit nicht mehr aus.

**Dipl.-Ing. Bernd Lorenz**, Leiter des Referats „Passive Sicherheit, Biomechanik“ bei der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) in Bergisch Gladbach. Er las das Kapitel „Überprüfung und Bewertung der Sicherheit“ und überarbeitete es umfassend. Dabei aktualisierte er insbesondere die Abschnitte zu heutigen und künftigen Anforderungen und zur Sicherheitsbewertung auf Basis experimenteller Untersuchungen.

**Dipl.-Math. Dipl.-Ing. (BA) Ulrich Franz**, Geschäftsführer der DYNAmore GmbH in Langlingen. Er überarbeitete das Kapitel „Rechnerische Simulation“ und brachte es so auf einen, seit der dritten Auflage vor mehr als vier Jahren erforderlichen, aktuellen Stand.

**Prof. Dr.-Ing. Rodolfo Schöneburg**, Leiter Sicherheit/Fahrzeugfunktionen der Mercedes Car Group in Sindelfingen, der seinerseits unterstützt wurde durch die Herren Baumann, Binder, Bürkle, Fehring, Dr. Kolling, Liefeth, Pfeiffer, Völlnagel, Prof. Schaub und Scheunert. Sie erarbeiteten das gegenüber der ersten Auflage des Buches völlig neu eingearbeitete Kapitel „Passive Sicherheit im Fahrzeug-Entwicklungsprozess“.

Nicht unerwähnt bleiben darf der Beitrag an der Entstehung des Buches, den zahlreiche Studenten während ihrer Beschäftigung als Praktikanten bei SAFE geleistet haben. In unermüdlicher Weise waren sie damit beschäftigt, den Text Korrektur zu lesen und die in den einzelnen Kapiteln verwendete Nummerierung von Abbildungen, Tabellen und Gleichungen auf Richtigkeit zu überprüfen. Ihnen allen gilt mein besonderer Dank verbunden mit den besten Wünschen für ihren beruflichen und privaten Lebensabschnitt nach dem erfolgreichem Abschluss ihres Studiums an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden.

Im Verlauf der Entstehung des Buches durfte ich mit großer Dankbarkeit die vielfältige Unterstützung durch freundschaftlich verbundene und interessierte Kollegen erfahren, die aufzuzählen den Rahmen dieser Danksagung bei Weitem sprengen würde.

Mein tief empfundener Dank aber gilt vor allem Frau Mariechen Kramer, meiner Ehefrau und zugleich Sekretärin bei SAFE, die besonders in den letzten Monaten nicht müde wurde, mir den Rücken frei zu halten, und mir Aufmunterung, viel Verständnis und schier unendliche Geduld entgegenbrachte.

Schließlich bedanke ich mich bei Herrn Ewald Schmitt, Programmleitung Technik und Cheflektor des Kfz-Bereiches beim Verlag Springer Vieweg in Wiesbaden, für die Abstimmungsgespräche, vor allem aber für seinen Gleichmut, mit dem er den Eingang des Buch-Manuskripts geduldig abgewartet hat. Ihm, seiner Mitarbeiterin Frau Elisabeth Lange, Lektorat Kraftfahrzeugtechnik, sowie Herrn Konrad von Brück und Frau Yvonne Schlatter, Verlagsherstellung, gilt zudem mein Dank für das Korrekturlesen, die Aufbereitung des Skripts, die Druckerstellung und die Vermarktung des Buches zur integralen Sicherheit von Kraftfahrzeugen.

Dresden, im Januar 2013

Florian Kramer  
Prof. Hon.-Prof. Dr.-Ing.  
SAFE, Dresden

---

# Inhaltsverzeichnis

Mitarbeiterverzeichnis . . . . .	XV
<b>1 Die integrale Sicherheit . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Sicherheitswissenschaftliche Grundbegriffe . . . . .	2
1.2 Die Fahrzeug-Sicherheit als Teilgebiet der Straßenverkehrssicherheit . . . . .	4
Literatur . . . . .	9
<b>2 Unfallforschung . . . . .</b>	<b>11</b>
2.1 Unfalldatenerhebung und -statistik . . . . .	14
2.1.1 Zielsetzung der Unfallstatistik . . . . .	14
2.1.2 Polizeilich erhobene Unfalldaten . . . . .	14
2.1.3 In-depth-Untersuchungen . . . . .	16
2.2 Unfallmechanik und -rekonstruktion . . . . .	18
2.2.1 Rekonstruktion von Unfällen . . . . .	19
2.2.2 Unfallschwere . . . . .	21
2.3 Unfallanalyse . . . . .	22
2.3.1 Aufklärung der Unfallursachen . . . . .	23
2.3.2 Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen . . . . .	24
2.4 Strukturierung des Unfallgeschehens . . . . .	27
2.4.1 Unfallart . . . . .	28
2.4.2 Unfalltyp . . . . .	29
2.4.3 Kollisionsart . . . . .	32
2.4.4 Kollisionstyp . . . . .	37
2.4.5 Aufprallart . . . . .	40
2.4.6 Aufpralltyp . . . . .	43
2.4.7 Belastungsart und Belastungstyp . . . . .	45
2.4.8 Verletzungsart und Verletzungstyp . . . . .	48
Literatur . . . . .	50

<b>3</b>	<b>Biomechanik</b>	53
3.1	Anatomie des menschlichen Körpers und Verletzungsmechanismen	54
3.1.1	Der Kopf	55
3.1.2	Die Wirbelsäule	60
3.1.3	Der Thorax	74
3.1.4	Das Abdomen und das Becken	85
3.1.5	Die Extremitäten	96
3.2	Verletzungsschwere und deren Monetarisierung	106
3.2.1	Verletzungsschweregrad	107
3.2.2	Verletzungsskalierung nach AIS	108
3.2.3	Andere Verletzungsskalierungen	110
3.2.4	Monetäre Bewertung der Verletzungsschwere	111
3.3	Verletzungs- und Schutzkriterien	113
3.3.1	Definitionen	114
3.3.2	Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von Schutzkriterien	118
3.3.3	Gesetzlich festgelegte Schutzkriterien	124
3.3.4	Schutzkriterien in der Diskussion	136
	Literatur	149
<b>4</b>	<b>Sicherheitsmaßnahmen</b>	157
4.1	Zielsetzung und Definitionen	158
4.1.1	Selbst- und Kontrahentenschutz	158
4.1.2	Wirkrichtung der Schutzmaßnahmen	159
4.2	Schutzprinzipien	160
4.2.1	Energetische Betrachtung	160
4.2.2	Wechselwirkung zwischen Frontal- und Seitenkollision	162
4.2.3	Kompatibilität	163
4.2.4	Prinzip des Geschwindigkeitsangleichs	172
4.2.5	Ride-Down-Effekt	174
4.2.6	Out-of-Position-Situationen	176
4.3	Maßnahmen zum Selbstschutz	178
4.3.1	Karosserie und Deformationsstruktur	179
4.3.2	Gurtsysteme und -komponenten	183
4.3.3	Airbag-Systeme und -Komponenten	199
4.3.4	Insassenschutz-Systeme	214
4.3.5	Selbstschutzmaßnahmen für Zweirad-Fahrer	226
4.3.6	Selbstschutzmaßnahmen für Nutzfahrzeuge	232

4.4	Maßnahmen zum Kontrahentenschutz . . . . .	237
4.4.1	Maßnahmen am PKW zum Schutz äußerer Verkehrsteilnehmer . . . . .	238
4.4.2	Maßnahmen am NFZ zum Schutz von PKW-Insassen und äußeren Verkehrsteilnehmern . . . . .	242
4.5	Nachkollisionäre und sonstige Sicherheitsmaßnahmen . . . . .	246
	Literatur . . . . .	253
<b>5</b>	<b>Sensorik zur Unfalldetektierung . . . . .</b>	<b>257</b>
5.1	Entwicklung der Sensorik . . . . .	258
5.1.1	Mechanische Sensoren . . . . .	258
5.1.2	Elektromechanische Sensoren . . . . .	259
5.1.3	Elektronische Sensoren . . . . .	264
5.2	Sensor-Anwendungen . . . . .	271
5.2.1	Up-Front-Sensoren . . . . .	273
5.2.2	Seiten-Sensoren . . . . .	273
5.2.3	Systeme zur Insassen-Erkennung . . . . .	275
5.2.4	PreCrash-Sensorik . . . . .	280
5.2.5	Assistenz-Systeme . . . . .	283
5.3	Randbedingungen . . . . .	287
5.3.1	Airbag-Elektronik . . . . .	287
5.3.2	Spannungsversorgung und Energiereserve . . . . .	289
5.3.3	Sensoren sowie Steuerungs- und Überwachungseinheiten . . . . .	290
5.3.4	Zündungseinrichtung . . . . .	290
5.3.5	Speicherung von Ereignisdaten . . . . .	291
5.3.6	Sicherheitsanforderungen an die Airbag-Elektronik . . . . .	291
5.3.7	Datenübertragung . . . . .	298
5.4	Systemintegration hinsichtlich aktiver und passiver Sicherheit . . . . .	303
5.5	Künftige Entwicklungen und Erwartungshorizont . . . . .	307
	Literatur . . . . .	310
<b>6</b>	<b>Überprüfung und Bewertung der Sicherheit . . . . .</b>	<b>311</b>
6.1	Quantifizierung der Straßenverkehrssicherheit . . . . .	311
6.2	Gesetzgebung . . . . .	315
6.2.1	Vorschriften in Deutschland und in Europa . . . . .	316
6.2.2	Vorschriften in den USA und anderen Staaten . . . . .	318
6.2.3	Zusammenfassung der Vorschriften in verschiedenen Ländern . . . . .	319
6.2.4	Künftige Vorschriften zur passiven Sicherheit . . . . .	330

6.3	Bewertung auf der Basis der Unfallstatistik . . . . .	333
6.3.1	Highway Loss Data Institute Report . . . . .	333
6.3.2	FOLKSAM-Report . . . . .	333
6.3.3	Secondary Safety Rating System for Cars . . . . .	334
6.4	Bewertung auf der Basis von experimentellen Untersuchungen . . . . .	334
6.4.1	ADAC-Testverfahren zur passiven Sicherheit von PKW . . . . .	337
6.4.2	Bewertung nach „auto motor und sport“ (ams-Test) . . . . .	337
6.4.3	Crash Worthiness Rating System for Cars (CWRSC) . . . . .	338
6.4.4	New Car Assessment Program (NCAP) . . . . .	339
6.4.5	Die Quantifizierung der passiven Sicherheit für PKW-Insassen und das Sicherheitskriterien-System SiKriS . . . . .	347
6.5	Verletzungsfolgekosten und Sachschäden . . . . .	351
Literatur	.....	355
<b>7</b>	<b>Experimentelle Simulation</b> . . . . .	357
7.1	Versuchsarten . . . . .	358
7.1.1	Fahrzeugversuche . . . . .	358
7.1.2	Schlittenversuche . . . . .	364
7.1.3	Komponentenversuche . . . . .	368
7.2	Versuchseinrichtungen und -anlagen . . . . .	371
7.3	Anthropometrische Testpuppen (Dummys) . . . . .	372
7.3.1	Anforderungen . . . . .	373
7.3.2	Instrumentierung . . . . .	374
7.3.3	Verwendete Dummys und ihr Einsatz . . . . .	376
7.4	Messtechnik . . . . .	381
7.4.1	Messkette . . . . .	382
7.4.2	Messwert-Geber . . . . .	382
7.4.3	Messdaten-Erfassung und -Verarbeitung . . . . .	384
7.5	Film- und Beleuchtungstechnik . . . . .	388
Literatur	.....	390
<b>8</b>	<b>Rechnerische Simulation</b> . . . . .	393
8.1	Die Geschichte der rechnerischen Simulation . . . . .	394
8.2	Berechnungsverfahren . . . . .	395
8.2.1	Mehrkörper-Systeme mit dem Fokus „Insassensicherheit“ . . . . .	395
8.2.2	Mehrkörper-Systeme mit dem Fokus „Unfallrekonstruktion“ . . . . .	397
8.2.3	Finite-Elemente-Methode . . . . .	398
8.2.4	Kontrollvolumen und Strömungssimulation . . . . .	401
8.2.5	Gekoppelte Löser . . . . .	403

8.2.6	Hardware-Architekturen . . . . .	406
8.2.7	Kommerzielle Programmsysteme . . . . .	406
8.3	Berechnungsmodelle . . . . .	407
8.3.1	Unfallrekonstruktion . . . . .	407
8.3.2	Strukturberechnung . . . . .	408
8.3.3	Insassensimulation mit Dummy-Modellen . . . . .	413
8.3.4	Simulation von Fußgänger- und Zweirad-Kollisionen . . . . .	417
8.3.5	Simulationen mit Modellen des menschlichen Körpers . . . . .	422
8.4	Aspekte der Crash-Simulation . . . . .	425
8.4.1	Berechnungsbewertung . . . . .	425
8.4.2	Rechnerische Optimierung im Bereich der passiven Sicherheit . . . . .	426
8.4.3	Simulationsdaten-Management . . . . .	428
	Literatur . . . . .	429
<b>9</b>	<b>Passive Sicherheit im Fahrzeugentwicklungsprozess . . . . .</b>	<b>433</b>
9.1	Prozessziele und Entwicklungsorganisation . . . . .	434
9.2	Entwicklungsprozess und Entwicklungsphasen . . . . .	435
9.3	Anforderungen an die passive Fahrzeugsicherheit . . . . .	436
9.3.1	Gesetzliche Anforderungen . . . . .	437
9.3.2	Rating-Anforderungen . . . . .	439
9.3.3	Produkthaftungsanforderungen . . . . .	439
9.3.4	Herstellerspezifische Anforderungen . . . . .	440
9.4	Entwicklungsqualität und deren Absicherung . . . . .	440
9.5	Rechnerische Simulation und experimentelle Absicherung im Entwicklungsablauf . . . . .	442
9.5.1	Einsatz der Entwicklungswerkzeuge . . . . .	444
9.5.2	Absicherung neuer Technologien und Werkstoffe . . . . .	449
9.5.3	Möglichkeiten und Grenzen . . . . .	450
9.6	Herausforderungen innerhalb der Projektarbeit . . . . .	452
9.7	Sicherheitsinnovationen im Entwicklungsprozess . . . . .	454
9.8	Integration der Unfallforschung in den Entwicklungsablauf am Beispiel Mercedes-Benz . . . . .	456
	Literatur . . . . .	459
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>461</b>

---

# Mitarbeiterverzeichnis

## **1 Die integrale Sicherheit**

Prof. Dr.-Ing. Florian Kramer, SAFE, Dresden

## **2 Unfallforschung**

Prof. Dr.-Ing. Florian Kramer, SAFE, Dresden

## **3 Biomechanik**

Prof. Dr.-Ing. Florian Kramer, SAFE, Dresden

## **4 Sicherheitsmaßnahmen**

Prof. Dr.-Ing. Florian Kramer, SAFE, Dresden

## **5 Sensorik zur Unfalldetektierung**

Prof. Dr.-Ing. Florian Kramer, SAFE, Dresden

Dipl.-Ing. James Remfrey, Continental Teves AG & oHG, Frankfurt

## **6 Überprüfung und Bewertung der Sicherheit**

Prof. Dr.-Ing. Florian Kramer, SAFE, Dresden

Dipl.-Ing. Bernd Lorenz, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

## **7 Experimentelle Simulation**

Prof. Dr.-Ing. Florian Kramer, SAFE, Dresden

## **8 Rechnerische Simulation**

Dipl.-Math. Dipl.-Ing. (BA) Ulrich Franz, DYNAmore GmbH, Langlingen

Prof. Dr.-Ing. Florian Kramer, SAFE, Dresden

## **9 Passive Sicherheit im Fahrzeugentwicklungsprozess**

Prof. Dr.-Ing. Rodolfo Schöneburg, Daimler AG, Sindelfingen

Kraftfahrzeuge weisen bereits heute ein hohes Maß an Sicherheit für Insassen und für äußere Verkehrsteilnehmer (z. B. Fußgänger und Radfahrer) auf; eine weitere Verbesserung stellt die Automobilindustrie vor große Herausforderungen, die nur durch eine Ausweitung der Zielsetzung und eine enge Zusammenarbeit zwischen Herstellern, Zulieferern und Entwicklungsdienstleister einer gemeinsamen Lösung zugeführt werden können.

Während sich die passive Sicherheit mit unfallfolgenmindernden Maßnahmen zur Begrenzung der Unfallfolgen befasst, bezieht sich die aktive Sicherheit auf die Vermeidung der Unfälle und die Herabsetzung deren Häufigkeit. Die integrale Sicherheit verknüpft nun beide Bereiche mit dem Ziel, das Schutspotenzial aller Verkehrsteilnehmer weiterhin zu steigern. Dabei werden der gesamte Unfallablauf von der Unfallentstehung über die Kollision bis zum Rettungswesen ganzheitlich betrachtet und Schutzmaßnahmen entwickelt, erprobt und in den Fahrzeugen serienmäßig eingesetzt. Dabei zielen die Bestrebungen der Sicherheitsingenieure darauf ab, Gefahrensituationen während des normalen Fahrzustandes frühzeitig zu erkennen, zu interpretieren und folgerichtig Maßnahmen zur Unfallvermeidung und zur Minimierung der Unfallfolgen einzuleiten.

Assistenzsysteme, konditionierbare und reversible Insassenschutz-Systeme oder automatische Notruf-Systeme, auf die im Folgenden näher einzugehen sein wird, sind bei vielen Automobilherstellern bereits Stand der Technik und stehen dem Benutzer neuerer Fahrzeuge zur Verfügung. Einzeln betrachtet verbessern diese Systeme zweifellos das Unfallvermeidungspotenzial. Durch die Nutzung der mit Hilfe der Assistenzsysteme gewonnenen Informationen und Daten aber lassen sich, sofern eine Kollision unvermeidbar erscheint, Insassenschutz-Systeme frühzeitig ansteuern, sodass sich die Unfallfolgen reduzieren lassen, zumindest aber die Unfallschwere herabgesetzt werden kann und damit zu einer Verbesserung der Fahrzeugsicherheit führen. Diese Verknüpfung von aktiver und passiver Sicherheit charakterisiert die „integrale Sicherheit“.

## 1.1 Sicherheitswissenschaftliche Grundbegriffe

Bei der Verwendung des Begriffes „Sicherheit“ sieht man sich unmittelbar der Frage ausgesetzt, ob es für den Straßenverkehr überhaupt eine absolute Sicherheit, also das „Freisein von Gefahr“ [1] geben kann. Angesichts der alljährlich zu beklagenden Unfallfolgen muss diese Frage wohl eher verneint werden. Was bedeutet also „Sicherheit“?

Zunächst resultiert die Unsicherheit des Straßenverkehrs zweifellos aus dem – aus probabilistischer (wahrscheinlichkeitstheoretischer) Sicht vorhandenen – Risiko, einen Schaden in bestimmtem Umfange von Personen und/oder Sachen zu erleiden. Der Un-Fall (als Synonym für den Nicht-Normalfall, den Störfall also) lässt sich demnach wie folgt definieren:

**Unfall** ist ein Ereignis, bei dem die Abweichung zwischen vorgegebener Fahraufgabe und deren Erfüllung ein zulässiges Maß überschreitet (nicht bewältigte Regelaufgabe) und in dessen unmittelbarer Folge ein Schaden bestimmter Art und Schwere eintritt.

Dabei ist nach [2] ein

**Schaden** (bzw. eine Schädigung) ein Nachteil durch Verletzung von Rechtsgütern aufgrund eines bestimmten technischen Vorganges oder Zustandes.

Das Schadensausmaß kann am beteiligten Kraftfahrzeug durch Sachschäden (z. B. Reparaturkosten, Wiederbeschaffungswert, Wertverlust aufgrund der Beschädigung) und am beteiligten Menschen durch Personenschäden (z. B. Verletzungsschweregrade, Verletzungsfolgekosten) angegeben werden.

Folgt man der ebenfalls in [2] festgelegten Begriffsbestimmung, so ist

**Risiko**, das mit einem bestimmten technischen Vorgang oder Zustand verbunden ist und zusammenfassend durch eine Wahrscheinlichkeitsaussage beschrieben wird,

- die zu erwartende Häufigkeit des Eintrittes eines zum Schaden führenden Ereignisses und
- das beim Ereigniseintritt zu erwartende Schadensausmaß.

Diese Risiko-Definition verwendet beispielsweise Schmid, indem das Produkt  $R = W \cdot S$  aus Wahrscheinlichkeit  $W$  und Schadenshöhe  $S$  zur vergleichenden Gegenüberstellung verschiedener Unfallkonstellationen verwendet wird. Das Produkt wird dabei als „Kompatibilitätskenngröße“ bezeichnet, da es sich „zur Beschreibung des Nutzens von Sicherheitsmaßnahmen“ [3] eignet. Von der Übernahme dieses Risiko-Begriffes wird im Folgenden jedoch Abstand genommen, weil hierfür treffender der Begriff der „Unfallfolgen“ oder, als monetarisierte Kennwert beispielsweise für das Produkt aus Häufigkeit und Verletzungsschwere, der Begriff der „Verletzungsfolgekosten“ eingeführt ist [4]. Darüber hinaus

widerspricht die Produktbildung der im Späteren zu zeigenden Risiko-Funktion, mit der die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Verletzungsschweregrades in Abhängigkeit vom Schutzkriterium dargestellt werden soll. Nachfolgend wird daher Risiko in seiner weitergefassten Definition als Wahrscheinlichkeitsaussage verstanden, die den Erwartungswert einer Häufigkeit für ein bestimmtes Schadensausmaß bei Ereigniseintritt beschreibt.

Mit der Einführung und Erläuterung der Risiko-Definition lässt sich die Gefahr nach [2] in folgender Weise formulieren:

**Gefahr** ist eine Sachlage, bei der das Risiko größer ist als das größte noch vertretbare Risiko (Grenzrisiko) eines bestimmten technischen Vorganges oder Zustandes,

und nach [5] ist

**Gefährdung** eine räumlich und zeitlich sowie nach Art, Größe und Richtung bestimmte Gefahr für eine Person, Sache oder Funktion.

Damit setzt der Unfall, aus dem unmittelbar ein Schaden resultiert, eine Gefährdung voraus. Zur Abgrenzung zwischen unfallrelevanten Fahrmanövern mit und ohne Schaden werden diejenigen Abläufe ohne Schadenseintritt als Beinah-Unfälle bezeichnet. Sie weisen zwar ein gleich hohes Gefährdungspotential wie Unfälle auf, führen aber nur deshalb nicht zu Schädigungen, weil kein schadenauslösender Umstand (beispielsweise ein Kollisionskontrahent) vorhanden ist. Die Gefahr kann daher mit Unsicherheit gleichgesetzt werden. Infolge dessen ist unter Sicherheit die Wahrscheinlichkeit zu verstehen, mit der von einer Betrachtungseinheit während einer bestimmten Zeit keine Gefahr ausgeht. Dieser von Meyna in [1] vorgeschlagene Sicherheitsbegriff, der aus sicherheitswissenschaftlicher Sicht einen interdisziplinären Charakter aufweist, kann unabhängig vom jeweiligen Fachgebiet angewandt werden. Er bedarf aber zur Anwendung im Bereich der Kraftfahrzeug-Sicherheit einer gewissen Präzisierung: Unsicherheit und Sicherheit sind komplementäre Begriffe, sodass sich mit der oben vorgenommenen Gleichsetzung von Gefahr und Unsicherheit die normierten Größen „Sicherheit“ und „Gefahr“ zu Eins ergänzen lassen. Die Sicherheit kann damit als

$$\text{Sicherheit} = 1 - \text{Gefahr}$$

formuliert werden. In Umkehrung der Definition für Gefahr lässt sich unter Einbeziehung des Risiko-Begriffes die Sicherheit (in Anlehnung an [2]) ausdrücken durch

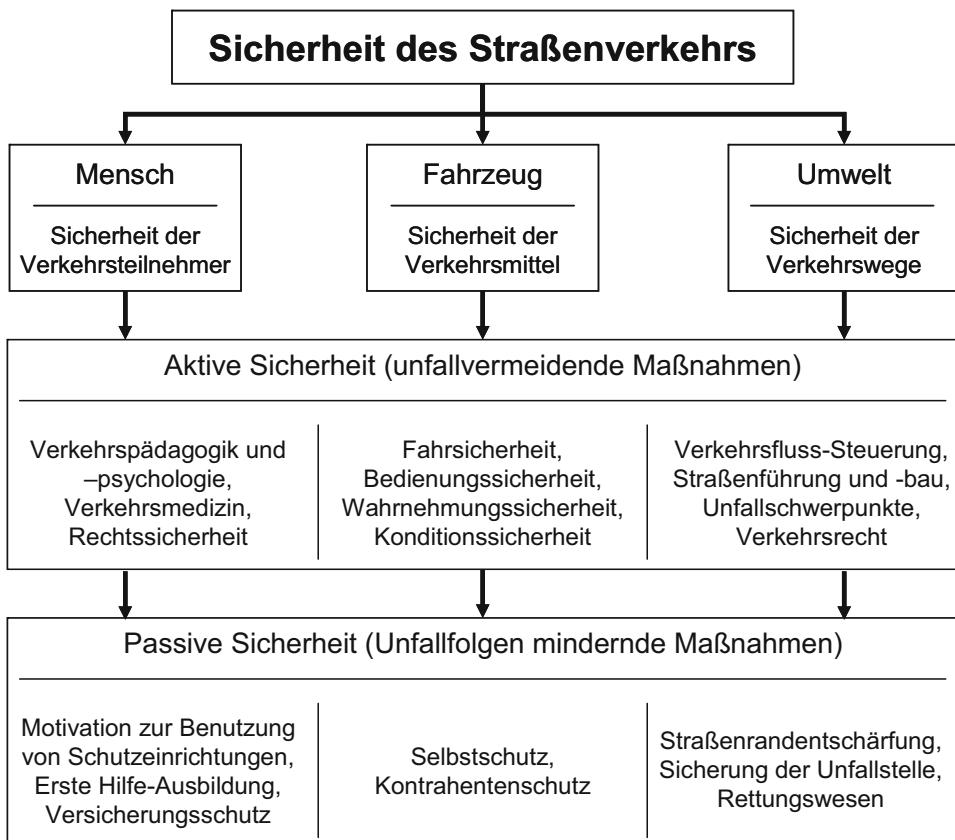
**Sicherheit** ist eine Sachlage, bei der das Risiko kleiner ist als das größte noch vertretbare Risiko (Grenzrisiko) eines bestimmten technischen Vorganges oder Zustandes.

Da sich das „vertretbare Risiko“ nur in den seltensten Fällen quantifizieren lässt, kann beispielsweise zur Zeitreihen-Darstellung die Sicherheit mit Hilfe von nicht-normierten Kenngrößen als ausreichend angesehen werden. Die Erhöhung der Sicherheit erfolgt im

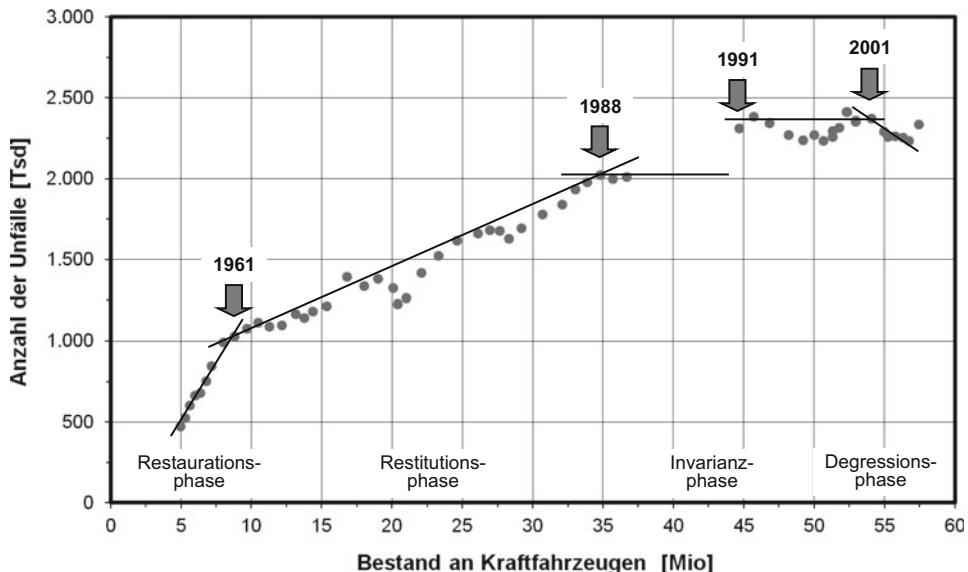
Wesentlichen durch die Herabsetzung des Risikos, indem entweder die Eintrittswahrscheinlichkeit eines zum Schaden führenden Ereignisses herabgesetzt (Unfallvermeidung) oder das Schadensausmaß reduziert wird (Unfallfolgenminderung).

## 1.2 Die Fahrzeug-Sicherheit als Teilgebiet der Straßenverkehrssicherheit

Der Verkehr umfasst gleichermaßen die am Verkehr teilnehmenden Menschen – unabhängig davon, in welcher Eigenschaft (Fahrer, Passagier, Fußgänger) sie dabei in Erscheinung treten – sowie die Fahrzeuge und den Verkehrsraum. Die Verkehrssicherheit ist dementsprechend ausgerichtet auf die Verkehrsteilnehmer, die Verkehrsmittel und die Verkehrswege. Die Sicherheit des Straßenverkehrs zielt dabei auf den Menschen, das Fahrzeug und die Umwelt ab (Abb. 1.1).



**Abb. 1.1** Teilbereiche der Straßenverkehrssicherheit und Beispiele für Sicherheitsmaßnahmen



**Abb. 1.2** Entwicklung der Unfälle in Abhängigkeit von den Zulassungszahlen im Zeitraum 1953 bis 2011

Maßnahmen zur Verbesserung der Straßenverkehrssicherheit werden unterschieden in

- unfallvermeidende Maßnahmen zur Herabsetzung der Unfallhäufigkeit und
- unfallfolgenmindernde Maßnahmen zur Begrenzung des zu erwartenden Schadens.

Die unfallvermeidenden Maßnahmen werden dem Bereich der aktiven Sicherheit und die Unfallfolgen mindernden Maßnahmen dem Bereich der passiven Sicherheit zugeordnet. Sie lassen sich, wie in Abb. 1.1 anhand einiger Beispiele dargestellt ist, in Maßnahmen unterteilen, die den Menschen, das Fahrzeug und die Umwelt hinsichtlich der Unfallprophylaxe bzw. der Unfallfolgenminderung beeinflussen. Obwohl die im englischen Sprachgebrauch übliche Bezeichnung primäre (primary) bzw. sekundäre (secondary) Sicherheit dem Sinn nach eine treffendere Bedeutung aufweist – da es gilt, zunächst Unfälle zu vermeiden und, sollten sie dennoch eintreten, erst in zweiter Linie die Folgen zu mindern –, werden diese, aufgrund der Eingeführtheit der Begriffe „aktive“ und „passive“ Sicherheit, auch im Folgenden weiterverwendet.

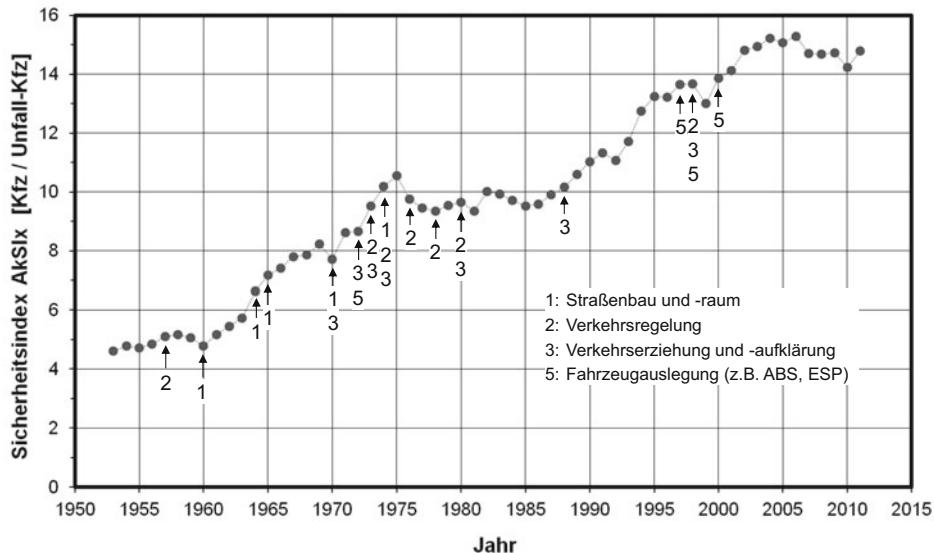
Zur Klärung der Frage, wie sich die zeitliche Entwicklung der beiden Sicherheitsbereiche (aktive und passive Sicherheit) in der Vergangenheit gestaltet hat, sind die üblichen Sicherheitskennzahlen, wie Getötete oder Verletzte pro zugelassenem oder verunfalltem Fahrzeug oder pro Kilometer-Anzahl, wenig aussagefähig. So ist zum einen der Zusammenhang zwischen Unfallzahlen und Fahrzeugbestand (Abb. 1.2) hochgradig nicht-linear

und zeigt von der wirtschaftlichen Entwicklung in Deutschland abhängige Phasen: Die Restaurationsphase (etwa bis 1961) ist gekennzeichnet durch einen rasanten Anstieg der Unfallentwicklung in Abhängigkeit von der Anzahl zugelassener Kraftfahrzeuge, während der Anstieg in der Restitutionsphase (bis 1988) deutlich flacher verläuft. Ab Ende der 1980er Jahre stellt sich eine Stagnation ein, d. h. die Anzahl der Unfälle bleibt trotz zunehmendem Fahrzeugbestand weitgehend konstant. Diese Invarianzphase setzt sich nach der Vereinigung der beiden Teile Deutschlands auf einem deutlich höheren Niveau fort und wird zur Jahrtausend-Wende abgelöst durch die Degressionsphase. Sie ist charakterisiert durch abnehmende Unfallzahlen bei weiterhin steigendem Fahrzeugbestand; wobei zu berücksichtigen ist, dass seit 2008 im Fahrzeugbestand die vorübergehend stillgelegten Kraftfahrzeuge nicht mehr enthalten sind.

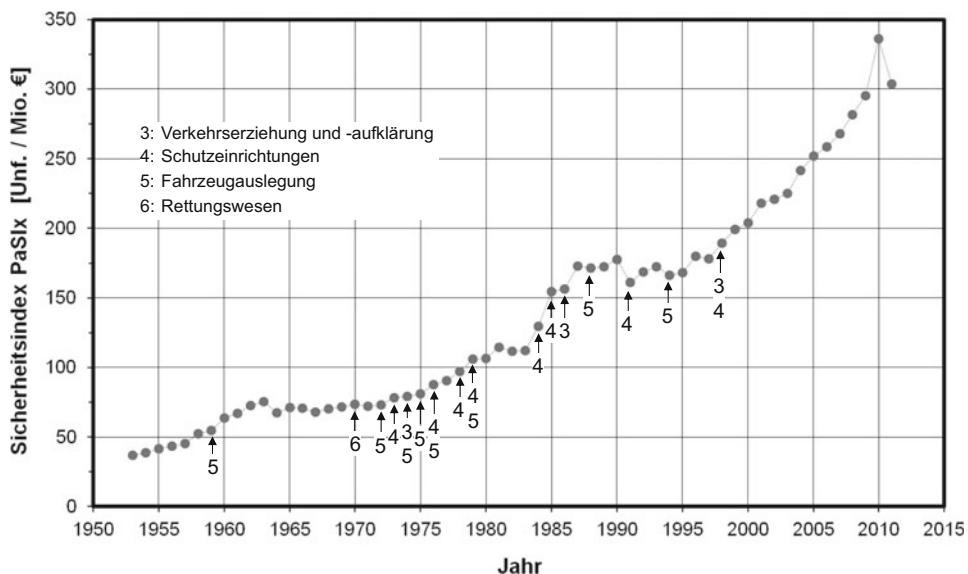
In derartigen Darstellungen lassen sich allerdings die durchaus unterschiedlichen Sicherheitsfortschritte in den einzelnen Bereichen nicht voneinander trennen. Zum Anderen fehlen bei der Quotientenbildung von Verletzten und Verkehrs- oder Unfallzahlen Hinweise auf absolute Zahlen. Und schließlich sind die Aussagen allein auf getötete Verkehrsteilnehmer ausgerichtet zu unscharf, da sie nicht die Verletzungsfolgen in ihrer Gesamtheit berücksichtigen. Letzteres gilt insbesondere unter Berücksichtigung des Umstandes, dass sich in einem Beobachtungszeitraum von etwa 60 Jahren der Anteil an den volkswirtschaftlichen Verletzungskosten für tödlich Verletzte bei ungefähr 18 %, hingegen für Schwerverletzte bei ca. 52 % und für Leichtverletzte bei 30 % eingependelt hat [6].

Zur getrennten Darstellung werden zunächst, als Indikator für die aktive Sicherheit, die zugelassenen auf die in Unfälle verwickelten Kraftfahrzeuge bezogen. Damit steigt das Maß der aktiven Sicherheit, ausgedrückt durch den Quotient aus Kraftfahrzeug-Bestand und Anzahl der Unfall-Fahrzeuge, mit sinkender Anzahl der Unfall-Fahrzeuge bei gleichem Bestand. Die aktive Sicherheit erhöht sich aber auch mit dem Bestand zugelassener Fahrzeuge bei gleicher Anzahl verunfallter Fahrzeuge. Das Kriterium für die passive Sicherheit ist durch den Quotient aus der Anzahl aller polizeilich gemeldeten Unfälle und den Verletzungskosten (aus Maßstabsgründen in Mio. €) definiert. Danach erhöht sich die passive Sicherheit mit abnehmenden Folgekosten für Getötete und Verletzte bzw. mit der Zunahme der Unfälle ohne gleichzeitigen Kostenzuwachs.

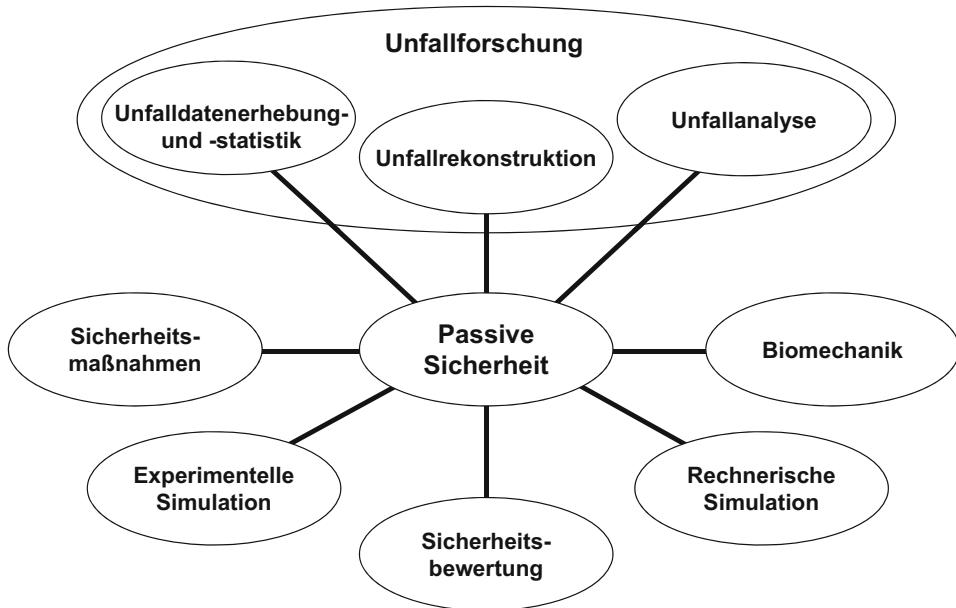
Die Herleitung der Maßzahlen für die aktive und die passive Sicherheit ist ausführlich in [7] dargelegt, sodass hier lediglich das Ergebnis in Form der zeitlichen Entwicklung über einen Zeitraum von etwa 60 Jahren gezeigt werden soll (Abb. 1.3 und 1.4). Für die aktive Sicherheit kann für den Zeitraum von 1953 bis 2011 eine Verdreifachung und für die passive Sicherheit sogar eine Verachtfachung konstatiert werden. Den beiden Verläufen sind jeweils gesetzlich festgelegte Vorschriften im Bereich der aktiven und der passiven Sicherheit zeitlich zugeordnet. Wenn auch die einzelnen gesetzlichen Vorschriften und Regelungen – mit Ausnahme der Bußgeldbewehrung für das Nicht-Anlegen von Sicherheitsgurten im August 1984 (vergl. Anstieg von 1983 bis 1985 in Abb. 1.4) – keine unmittelbaren, zeitlich eindeutig zuordenbaren Wirkungen zeigen, ist der Anstieg der beiden Kurven zweifellos



**Abb. 1.3** Zeitliche Entwicklung der aktiven Sicherheit im Zeitraum 1953 bis 2011 und Einführung von Maßnahmen zu deren Verbesserung



**Abb. 1.4** Zeitliche Entwicklung der passiven Sicherheit im Zeitraum 1953 bis 2011 und Einführung von Maßnahmen zu deren Verbesserung



**Abb. 1.5** Die passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen und ihre Wirkungsbereiche

auf die Gesamtwirkung ineinander greifender Einzelmaßnahmen zurückzuführen [8]. Dabei handelte es sich um Maßnahmen

- im Straßenbau und durch der Gestaltung des Straßenraums (1),
- in der Verkehrsregelung (2),
- in der Verkehrserziehung und -aufklärung (3),
- in Form von Schutzeinrichtungen (4),
- in der Auslegung der Fahrzeuge (5) und
- im Rettungswesen (6).

Im Bereich der passiven Fahrzeugsicherheit werden die Handlungsprioritäten in erster Linie aus der Unfallforschung abgeleitet; sie setzt sich aus der Unfalldatenerhebung und -statistik, der Unfallrekonstruktion und der Unfallanalyse zusammen. Mit Hilfe der Kenntnisse der Verletzungsentstehung aus dem Bereich der Biomechanik werden Sicherheitsmaßnahmen für Fahrzeuge entwickelt, ausgelegt und im Versuch erprobt. Tendenzielle Aussagen über die Wirkungsweise dieser Maßnahmen (z. B. Gurtsysteme, Airbags u. a.) lassen sich auch mit Hilfe der rechnerischen Simulation treffen, sodass beispielsweise durch einen Kostenverminderungsansatz anhand eines Verletzungsvorhersagemodells die jeweilige Sicherheitsmaßnahme bewertet werden kann. Die passive Fahrzeugsicherheit und die damit zusammenhängenden Wirkungsbereiche sind in Abb. 1.5 dargestellt.

## Literatur

1. Meyna, A.: Beitrag zur Entwicklung einer allgemeinen probabilistischen Sicherheitstheorie. Habilitationsschrift, Fachbereich 14 (Sicherheitstechnik). Gesamthochschule Wuppertal (1980).
2. DIN-VDE 31000: Allgemeine Leitsätze für das sicherheitsgerechte Gestalten technischer Erzeugnisse – Begriffe der Sicherheitstechnik, Grundbegriffe. (1987).
3. Schmid, W.: Vermindertes Verletzungsrisiko bei Verkehrsunfällen durch Fahrzeug-Kompatibilität. XVIII. FISITA Congress. Hamburg (1980).
4. Kramer, F.: Schutzkriterien für den Fahrzeug-Insassen im Falle sagittaler Belastung. Dissertation an der Technischen Universität Berlin. Fortschritt-Berichte, VDI-Reihe 12. Bd 137. (1989).
5. DIN 31004 (Vornorm): Sicherheit und Schutz im Arbeitssystem – Begriffe, Wertzusammensetzungen. (1982).
6. Kramer, F.: Passive Sicherheit/Biomechanik I und II. Vorlesungsskript zur gleichnamigen Lehrveranstaltung an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden (2011).
7. Kramer, F.: Zur Quantifizierung der Straßenverkehrssicherheit. Forschungsbericht Nr. 323/88. Technische Universität Berlin (1988).
8. Brühning, E. et al.: Zum Rückgang der Getötetenzahlen im Straßenverkehr der Bundesrepublik Deutschland von 1970 bis 1984. Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Nr. 3 (1986).

Im vorliegenden Kapitel wird der Frage nachgegangen, in welchem Umfang und auf welche Art und Weise Straßenverkehrsunfälle stattfinden und unter welchen Umständen Verkehrsteilnehmer dabei zu Schaden kommen. Vorher jedoch soll die Bedeutung der Verkehrsunfallopfer in der Todesursachen-Statistik aufgezeigt werden.

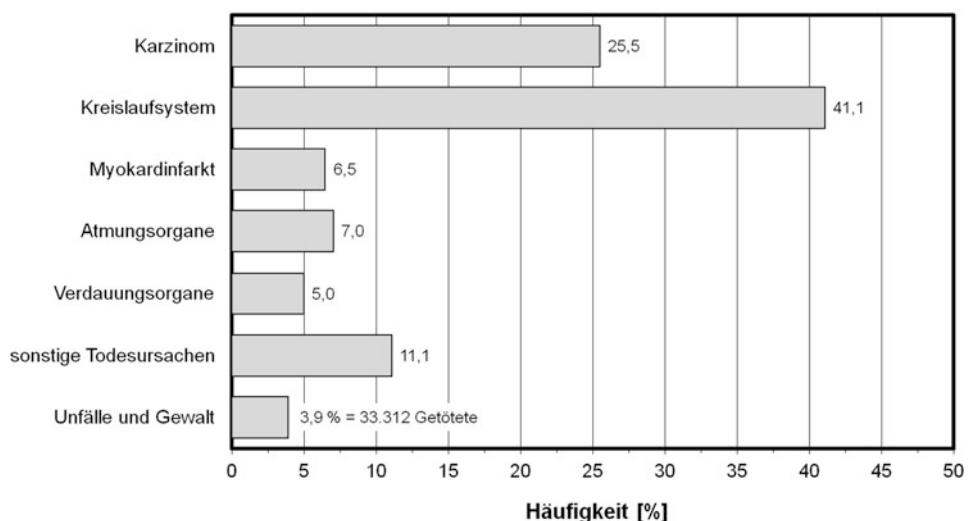
Nach der Bundesstatistik [1] lassen sich die Todesursachen der im Jahre 2010 in Deutschland verstorbenen 858.768 Personen unterteilen in Karzinomerkrankungen (25,5 %), Erkrankungen des Kreislaufsystems (41,1 %), Herzmuskelkrankungen, z. B. Myokardinfarkte (6,5 %), der Atmungsorgane (7,0 %), der Verdauungsorgane (5,0 %) und sonstige natürliche Todesursachen, z. B. Infektionen, Tuberkulose, Diabetes u. a., (11,1 %) sowie Todesfälle aufgrund von Unfällen und Gewalt (3,9 %). Diese Hauptgruppen sind in Abb. 2.1 dargestellt.

Bei der letztgenannten Hauptgruppe handelt es sich um insgesamt 33.312 Fälle mit unnatürlicher Todesursache, also Verletzungen und Vergiftungen. Diese lassen sich in zwei Gruppen, in Unfälle und Gewalt, unterscheiden, und zwar einerseits in Verkehrsunfälle (11,0 %), Heim- und Freizeit-Unfälle (32,5 %), Arbeitsunfälle (1,0 %) und sonstige Unfälle, wie Todesfälle durch Stürze, Feuer, Waffen, chemischen und biologischen Substanzen sowie Unfallspätfolgen (17,0 %). Die andere Gruppe umfasst Selbstmord und Selbstbeschädigung (30,1 %) sowie sonstige Gewalt (8,4 %), darunter Mord und Totschlag. Die jeweiligen Anteile sind in Abb. 2.2 gezeigt.

Von den im Jahre 2010 Verstorbenen (858.768 Todesfälle) verunglückten bei Straßenverkehrsunfällen insgesamt 3.648 Personen tödlich, das sind 0,42 %. Es waren dies erheblich weniger als Selbstmord-Opfer, aber deutlich mehr als gewaltsam getötete Personen.

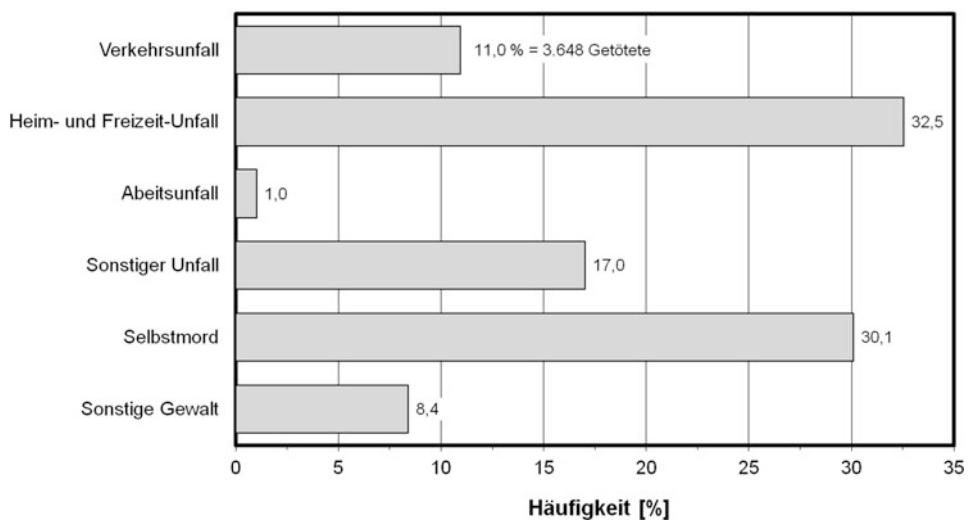
Die Unfallforschung umfasst die drei Teilbereiche Unfallerhebung und -statistik, Unfallrekonstruktion und Unfallanalyse (Abb. 2.3). Die Aufgabe der Unfallforschung besteht nun darin, die Ursachen, die zu einem Unfall führen, aufzuklären. Aus dieser Erklärung können Erkenntnisse abgeleitet werden, deren Umsetzung in der Technik, in der Medizin und in der Psychologie zu einer Verbesserung der Sicherheit des Straßenverkehrs beiträgt [2].

### Todesursachen



**Abb. 2.1** Hauptgruppen der Todesursachen (n = 858.768) im Jahr 2010

### Todesursachen



**Abb. 2.2** Unfälle und Gewalt als Todesursachen (n = 33.312) im Jahr 2010



**Abb. 2.3** Unfallforschung und Umsetzung der Erkenntnisse in verschiedenen Disziplinen

Im technischen Bereich der Unfallforschung wird versucht, mit Hilfe von Simulationen experimentell mit Freiwilligen, Leichen und Dummys oder rechnerisch mit mathematisch beschriebenen Modellen der jeweiligen Verkehrsteilnehmer (Insassen, Fußgänger u. a.) charakteristische Größen zu erhalten, die das Verhalten von Mensch, Fahrzeug und Umwelt während des Unfalls beschreiben. Diese Größen kennzeichnen ein Äquivalent zu den Verletzungen am Menschen und den Beschädigungen am bzw. im Fahrzeug sowie den Einfluss der Umwelt. Aus ihnen lässt sich eine Sicherheitsauslegung zur Verbesserung der Straßenverkehrssicherheit formulieren.

Im medizinischen Bereich der Unfallforschung werden Krankenhausberichte, ärztliche Diagnosen und pathologische Befunde von Unfallopfern im Hinblick auf Verletzungsmuster, -häufigkeit und -schwere ausgewertet, um Aufklärung über Ursachen und Umstände der Verletzungen zu erhalten [3].

Im psychologischen Bereich der Unfallforschung schließlich werden durch die Befragung der Unfallbeteiligten und der Unfallzeugen die Ursachen, die zu einem Unfall führten, in den drei Richtungen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt ermittelt und analysiert. Die Unfallgefährdung im Straßenverkehr wird heute in der Regel operationalisiert durch die Bestimmung der Unfallraten [4] oder mittels relativierter Unfallhäufigkeiten, wie in Abb. 1.3 anhand der Maßzahl zur Quantifizierung der aktiven Sicherheit [5] gezeigt werden konnte. Sicherheitsmaßnahmen zielen hierbei ab auf den verkehrspädagogischen Aspekt, nämlich

auf die Verkehrserziehung und die -aufklärung. Mit der Entwicklung und Einführung von Assistenzsystemen wird zudem das Ziel verfolgt, den Fahrer in kritischen Fahrsituationen zu informieren und zu warnen, damit er sein Verhalten auf derartige Situationen anpassen kann.

---

## 2.1 Unfalldatenerhebung und -statistik

Einen nicht unerheblichen Beitrag an unnatürlichen Todesursachen liefern die Verkehrsunfälle (vgl. Abb. 2.2). Informationen über diese Art der Unfälle zu sammeln und auszuwerten bietet den Unfallforschern eine Möglichkeit zum Verständnis der Unfall- und Verletzungsmechanik und vermag Lösungswege zur Unfallvermeidung und Verletzungsreduzierung aufzuzeigen. Im Gegensatz zur Simulation im Labor oder im Rechner, bei der alle Variablen gemessen, errechnet, konstant gehalten oder überprüft werden können, lassen sich die meisten physikalischen Größen bei Fahrzeugunfällen nicht messen und ändern sich zudem innerhalb kürzester Zeit.

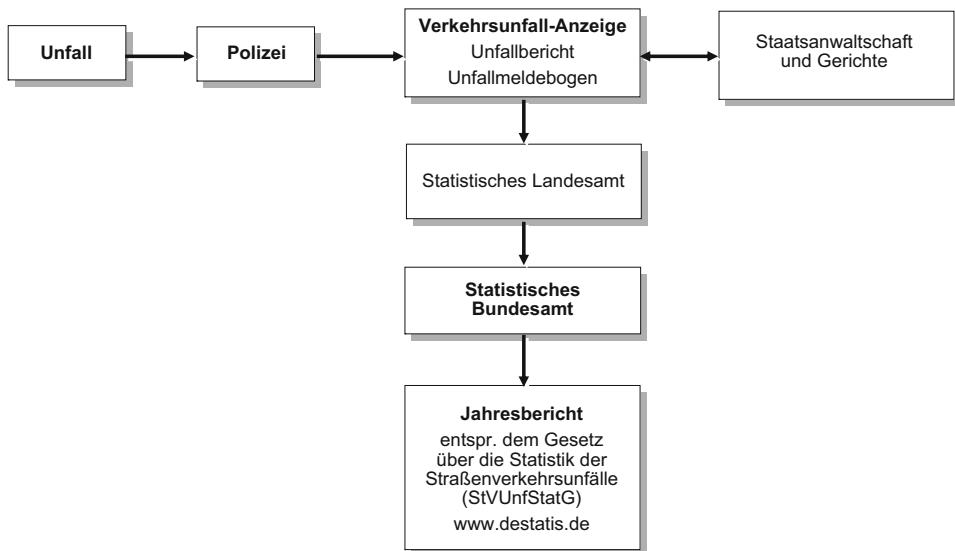
Das Problem der Unfallforscher ist darin zu sehen, ausreichende Informationen zu erhalten, um die Mechanismen der Verletzungsverursachung zu verstehen. Fahrzeugunfälle bilden zum einen den größten Anteil an Verletzungen und sind zum anderen am schwierigsten zu dokumentieren. Derzeit existieren zwei Arten öffentlich zugänglicher Unfallmaterialien, die sich im Wesentlichen durch ihren Detaillierungsgrad einerseits und ihre Fallzahl andererseits unterscheiden: Polizeilich erhobene Unfalldaten (zusammengefasst in der Bundesstatistik) und durch professionelle Unfall-Teams durchgeführte so genannte „In depth“-Untersuchungen.

### 2.1.1 Zielsetzung der Unfallstatistik

Die Unfallstatistik hat die Verarbeitung der bei der Unfalldatenerhebung anfallenden Informationen zum Ziel. Dies erfolgt mit Hilfe der Methoden der Statistik, indem deskriptive oder analytische Verfahren zur Anwendung kommen. Bei der deskriptiven, der beschreibenden Statistik werden in der Regel Häufigkeitsverteilungen und deren Summenbildungen, die Verteilungsfunktionen, aufgetragen, um bestimmte Ausprägungen kenntlich zu machen oder Wahrscheinlichkeiten darzustellen. Mit Hilfe der analytischen Statistik werden vorab formulierte Vorhersagemodelle oder Zusammenhangshypothesen überprüft und ggf. bestätigt. Beispiele zu beiden statistischen Verfahren sind Inhalt der nachfolgenden Kapitel.

### 2.1.2 Polizeilich erhobene Unfalldaten

Die Unfalldaten des **Statistischen Bundesamtes** (Bundesstatistik) beziehen sich auf polizeiliche Unfall-Meldebogen, die hauptsächlich zur Klärung der Schuldfrage herangezogen



**Abb. 2.4** Datenerhebung zur Bereitstellung des Unfalldatenmaterials der Bundesstatistik

werden (Abb. 2.4). Es sind alle gemeldeten Unfälle erfasst, die jedoch nur wenig spezifische Informationen über Verletzungen aufweisen. Die Bewertung unterliegt der Beurteilung der jeweiligen Polizeibeamten, die zwar oftmals über ausreichende Erfahrung bezüglich Ursachen und Entstehung der Verletzungen verfügen, doch erlauben die Unfalldatenformulare keine Eintragung derartiger Informationen (vgl. z. B. [6]). Da alle polizeilich aufgenommenen Unfälle erfasst sind, bietet dieses Unfall-Datenmaterial einen repräsentativen Überblick über das Unfallgeschehen in Deutschland. Es erlaubt allerdings weder Aussagen zu den Unfallkonstellationen (Aufprallstellen, Beschädigungsflächen u. a.) noch zu den äußeren Unfallschwere-Parametern (Geschwindigkeit, Masse, Steifigkeit, Bauform u. a.). Zum anderen enthält das Datenmaterial keinerlei Angaben zur Sitzposition der Insassen; zu Verletzungen der einzelnen Körperregionen sind nur grobe Einschätzungen der gesamtheitlichen Verletzungen im Sinne von leicht, schwer und tödlich Verletzten möglich [7].

Aufgrund des Umstandes, dass in der Bundesstatistik nur polizeilich gemeldete Unfälle enthalten sind, existiert gegenüber dem realen Unfallgeschehen eine gewisse Dunkelziffer. Darunter sind beispielsweise auch die vielzitierten „Disco-Unfälle“ zu verstehen, die oftmals unter Alkoholeinwirkung nachts nach einem Lokalaufenthalt der Insassen stattfinden und bei denen keine schwer Verletzten zu beklagen sind. Zu derartigen Unfällen wird aus naheliegenden Gründen keine Polizei herbeigerufen, um den Unfall aufzunehmen.

Das seit dem Jahr 1975 in den USA bestehende **Fatal Accident Reporting System (FARS)** wurde von der US-amerikanischen Verkehrssicherheitsbehörde, der National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), gegründet. Die am gründlichsten un-

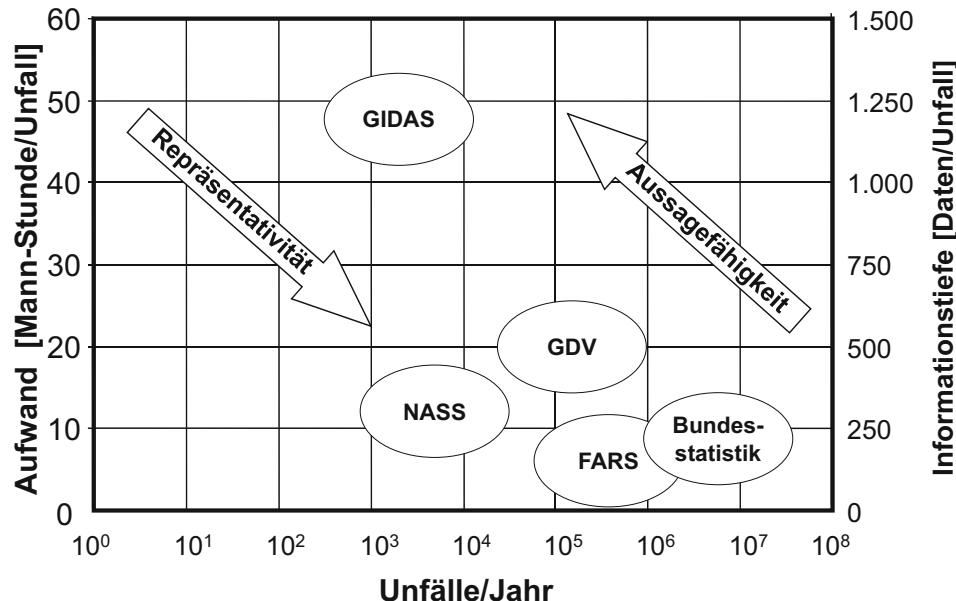
tersuchten Unfälle sind solche mit tödlichem Ausgang für einen oder mehrere Beteiligte, daher sind die bei derartigen Unfällen gesammelten Informationen vollständiger als bei leichteren Unfällen. Die US-Verkehrssicherheitsbehörde finanziert die zentrale Bereitstellung von tödlichen Unfalldaten in der FARS-Datenbank. Von der NHTSA ausgebildete Unfallspezialisten in allen Bundesstaaten erstellen von allen Unfällen mit tödlichem Ausgang, die in ihren Staaten auftreten, einen gemeinsamen, vollständigen Bericht, der in Washington datentechnisch abgespeichert wird und öffentlich über die NHTSA zugänglich ist [8]. Die FARS-Datenbank enthält Daten aus den Polizei-Unfallberichten, von der Zulassungsbehörde und aus den Arztberichten (einschließlich pathologischen Befunden); sie stellt somit das umfassendste und detaillierteste Unfall-Datenmaterial über schwere Verkehrsunfälle in den USA dar.

### 2.1.3 In-depth-Untersuchungen

Für In-depth-Untersuchungen erheben Unfallforschungsteams einen großen Umfang an Informationen über die Umweltbedingungen, den Fahrzeugzustand und Verletzungen der Beteiligten sowie deren Entstehung üblicherweise unmittelbar nach einem Unfall. Dies geschieht durch Einsicht in Polizei- und Arztberichte, Überprüfung der Fahrzeuge und Befragung von Unfallbeteiligten. Aufgrund der hohen Kosten dieser zeitaufwendigen Unfalldaten-Erhebung ist die Fallzahl derartiger Untersuchungen sehr begrenzt (vgl. Abb. 2.5).

Das Unfall-Datenmaterial des **Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV)** umfasst in seiner neueren Studie 140.000 Versicherungsfälle mit Personenschäden. Derartige Unfalldatenerhebungen wurden in periodischen Abständen seit 1969 durchgeführt. Die Unfalldaten eignen sich zur Analyse des Unfallgeschehens. Für die retrospektive Auswertung durch Ingenieure und Mediziner standen die gesamten Versicherungsschadensakten mit allen Unterlagen über Unfallursache, Unfallablauf, Fahrzeugbeschädigungen und Verletzungsfolgen zur Verfügung [9].

Das Datenmaterial aus der **German In depth Accident Study (GIDAS)**, das an der Medizinischen Hochschule Hannover (MHH) und Technischen Universität Dresden (TUDD) durchgeführt wird, enthält Daten aus den Erhebungen direkt am Unfallort mit einer Vielzahl an Informationen zu jedem Unfall, die eine tiefergehende Analyse bezüglich der aktiven und der passiven Sicherheit ermöglichen. Es handelt sich um Unfälle mit Personenschäden, weil der Schwerpunkt des von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. (FAT) finanzierten Forschungsprojekts auf dem medizinischen Sektor liegt. Im Rahmen der Datenerhebung zur aktiven Sicherheit werden Befragungen der Beteiligten und Zeugen am Unfallort, teilweise auch später im Krankenhaus, durchgeführt. Diese sollen Aufschluss geben über die Persönlichkeit des Befragten, die Unfallentstehung und -ursache, den Ablauf der Fahrt, den Fahrtzweck sowie über Reaktionen auf das Unfallgeschehen und dessen Vorgeschichte [10]. Um die statistische Zuverlässigkeit der örtlichen Unfallerhebung nachhaltig zu verbessern, erfolgt die



**Abb. 2.5** Aufwand, Detaillierung und Anzahl der Fälle bei der Unfalldatenerhebung

Unfalldatenaufnahme seit Beginn des Jahres 1985 nach einem Stichprobenverfahren mit dem Ziel, eine bessere Übereinstimmung mit der Bundesstatistik zu erreichen und damit zu einer Allgemeingültigkeit der Aussagen für das Unfallgeschehen innerhalb Deutschlands zu gelangen [7].

In den Unfalldatenerhebungen verschiedener **Automobilhersteller** (z. B. Audi, BMW, Daimler oder VW) werden gezielt die Unfälle untersucht, in denen eigene Fahrzeuge als Kollisionsobjekte verwickelt waren. Die Zielsetzung dabei besteht in der Verbesserung der Sicherheit der eigenen Produkte. Allerdings stellt hierbei die Verfügbarkeit der Daten und Informationen ein Problem für den nicht betriebsinternen Unfallforscher dar.

Das in den USA von der NHTSA seit 1979 durchgeführte In-depth-Untersuchungsprogramm, das **National Automotive Sampling System (NASS)** Crashworthiness Data System (CDS), das ähnlich wie GIDAS Studien über Verkehrsunfälle erstellt, enthält im 1989er Datenmaterial gerade 4.648 Unfälle (vgl. Abb. 2.5). Bei früheren Datenerhebungen wurde Wert auf spezielle Unfallkonstellationen gelegt, so z. B. Überschläge, Brände und tödliche Unfälle, um Ursachen und Gegebenheiten zu ergründen, charakteristische Größen zu identifizieren und Maßnahmen zur Unfallvermeidung, also zur Verbesserung der aktiven Sicherheit, zu veranlassen. Das NASS-System wählt nach dem Zufallsprinzip Unfälle in zufällig ausgewählten Gebieten einzelner Staaten aus in der Hoffnung, dass die relativ kleine Fallzahl statistisch repräsentativ für das Unfallgeschehen in den USA ist. Die im NASS-Datenmaterial enthaltenen Informationen sind daher abhängig vom Erhebungsstandort. Das 1988 aufgelegte CDS-Programm konzentrierte sich auf die pas-

sive Fahrzeugsicherheit; das parallele Datenerhebungsprogramm, das General Estimates System (GES), arbeitet zur Vervollständigung der CDS-Daten Informationen aus Polizeiberichten ein, sodass Erkenntnisse zur Fahrzeugidentifikation, Beschädigung, Zerstörung der Scheiben, zu Intrusionen und zur Unfallschwere in Form der Geschwindigkeitsänderung zur Verfügung stehen. Daneben enthält das Datenmaterial Informationen über Größe und Gewicht der Insassen, die Sitzposition, die Benutzung von Insassenschutz-Systemen u. a.m. [8].

Schließlich gibt es noch das **Highway Loss Data Institute (HLDI)**, eine Institution der Versicherer, deren Unfallforschungsergebnisse in Zusammenarbeit mit der NHTSA über die entsprechenden Behörden in die US-amerikanische Sicherheitsgesetzgebung eingehen.

In Abb. 2.5 ist der Zusammenhang zwischen Erhebungs- und Analyse-Aufwand und Anzahl der Daten für jeden Unfall einerseits und die erreichte Fallzahl pro Jahr schematisch dargestellt (nach [2]).

---

## 2.2 Unfallmechanik und -rekonstruktion

Die Rekonstruktion von Unfällen hat prinzipiell zum Ziel, den Ablauf eines Unfalles in seinen Einzelheiten zu erfassen, d. h. Unfallhergänge zu klären sowie Unfall- und Schadensursachen festzustellen und zu bewerten. Damit lassen sich die einzelnen Phasen des Unfallablaufes in ihrer räumlichen und zeitlichen Zuordnung ermitteln und beurteilen. Für die Ausrichtung der Straßenverkehrssicherheit auf den Menschen, das Fahrzeug und die Umwelt (vgl. Abb. 1.1) ist aus der Sicht der beteiligten Disziplinen Technik, Medizin und Psychologie (vgl. Abb. 2.3) in den einzelnen Unfallphasen Einleitung (PreCrash), Kollision (InCrash) und Folgen (PostCrash) die gesamte Kausal- und Wirkkette eines Unfalls nachzuvollziehen; gegenseitige Abhängigkeiten und Beeinflussungen sind aufzuzeigen [11]. Unabhängig von der spezifischen Fragestellung muss zunächst der kinematische Ablauf des Unfalls ganz oder teilweise ermittelt werden. Dazu gehören Angaben über

- Zeiten (z. B. Reaktionszeit),
- Geschwindigkeiten (z. B. Annäherungs-, Kollisions- und Auslaufgeschwindigkeit) und
- örtliche Gegebenheiten (z. B. Annäherungsrichtungen, Reaktionspunkt, Kollisionsstelle und Auslaufrichtung).

Diese Angaben interessieren entweder für sich allein oder in Verknüpfung, z. B. mit Hilfe des Weg/Zeit-Diagramms [12]. Im forensischen Bereich sind darüber hinaus Fragestellungen von Bedeutung, wie

- die Höhe der Fahrgeschwindigkeit vor dem Unfall,
- die räumliche und zeitliche Vermeidbarkeit des Unfalls,
- die Auswirkung einer reduzierten (z. B. vorgeschriebenen) Geschwindigkeit hinsichtlich der Vermeidbarkeit des Unfalls und damit von Verletzungen und Beschädigungen,

- die mögliche Verletzungsreduzierung durch die Nutzung von Sicherheitseinrichtungen wie Anlegen des Gurtes oder durch Tragen von Schutzhelmen bei Motorradfahrern sowie
- die Sitzposition von Insassen zur Klärung der Frage, wer das Fahrzeug gefahren hat [13].

Und im sicherheitsspezifischen Bereich stellen sich Fragen nach

- der Unfallvermeidbarkeit,
- den Unfallursachen unter psychologischen und physiologischen Aspekten,
- den Bewegungen der Fahrzeuge und den Bewegungen der Insassen relativ zum Fahrzeug (Unfallmechanik),
- den Verletzungsursachen bzw. den verletzungsinduzierenden Fahrzeugteilen,
- dem Verhalten von Insassenschutz-System und deren Komponenten und schließlich
- der Verletzungsmechanik und dem Verletzungsmuster [13].

Die Fragestellungen im forensischen und im sicherheitstechnischen Bereich mögen durchaus unterschiedlich sein, für beide Bereiche laufen allerdings die Methoden und Verfahren zunächst parallel [11]. Sie sollen nachfolgend in der gebotenen Kürze dargestellt werden.

### 2.2.1 Rekonstruktion von Unfällen

Die Qualität der Unfallrekonstruktion und damit die Rechtssicherheit sowie die Aussagekraft von abgeleiteten Größen zum Unfallgeschehen hängen ganz entscheidend von der Qualität und vom Umfang der aufgenommenen Unfalldaten ab. Unmittelbar nach dem Unfall lassen sich Daten ermitteln, die retrospektiv entweder gar nicht oder nur unzureichend beschafft werden können.

Im Rahmen der Unfallrekonstruktion kann man unterscheiden zwischen [13]

- **messbaren Daten:**

Endlage der Beteiligten (Fahrzeug und Personen), Wurfweite von Fußgängern und Zweiradfahrern, Kollisionsstellen-Fixierung durch Spurenzeichnung (Bremsspuren) und Ablagerungen auf der Fahrbahn, Reifenabriebspuren nach Art, Länge und Richtung, Bereifung (Zustand, Profiltiefe), Radstand und Spurweiten, statische Lastverhältnisse und außergewöhnliche Beladungen (z. B. Dachgepäckträger), Schwerpunktshöhe, Sichtbehinderungen durch parkende Fahrzeuge oder Straßenrandbewachsung, Verkehrsregelungen (Ampelschaltung, -zeiten), Helligkeit (Tageszeit, Straßenbeleuchtung), Fahrbahnbeschaffenheit und -belag;

- **beschreibbaren Daten:**

Witterung, Zustand der Fahrbahn (trocken oder nass), Sichtverhältnisse (beschlagene oder verschmutzte Scheiben), Beleuchtungszustand (Stand-, Abblend- oder Fernlicht

eingeschaltet), Fahrzeugaufkommen, fahrdynamisch beeinflussende Zustände (eingelegter Gang, blockierende Räder), Beeinträchtigung des Fahrers/Lenkers durch mangelnde Sehfähigkeit, Alkohol/Drogen, Krankheit oder andere Insassen, Anzahl der Insassen und deren Sitzposition, Insassenschutz-Systeme;

- **experimentell oder rechnerisch ermittelbaren Daten:**

Reaktionszeit der Beteiligten, Fahrgeschwindigkeit von Zweiradfahrern, Gehgeschwindigkeit von Fußgängern, Schwellzeit der Bremse, Bremskraftverteilung, Reifenkennfeld, Reibwerte, Beschleunigungs- und Verzögerungswerte, Massen und Massenträgheitsmomente, dynamische Lastverhältnisse bei Kollision und Auslauf, Kippverhalten, Sichtweite für den Fahrer/Lenker.

Die Anwendung der Unfallrekonstruktion bis hin zu quantitativen Ergebnissen erfordert neben der Verfügbarkeit der spezifischen Unfalldaten die Verfügbarkeit von Grundlagendaten, auf die zurückgegriffen werden kann und muss. Diese Grundlagendaten waren und sind auch heute noch Gegenstand der Forschung.

Bei der Unfallrekonstruktion lassen sich prinzipiell zwei Methoden unterscheiden: die experimentelle und die rechnerische Simulation. Bei der rechnerischen Rekonstruktion sind drei unterschiedliche Verfahren anwendbar, nämlich die kinematische Analyse, die Stoßrechnung und die Kraftrechnung.

Die **kinematischen Betrachtungen** (Anfahr- und Bremsvorgänge, Weg/Zeit-Diagramm) können in einfachen Fällen, bei denen es auf die eigentliche Stoßphase nicht ankommt, ausreichen [11].

Die **Stoßrechnung** basiert auf drei Erhaltungssätzen: dem Impuls-, dem Drehimpuls- und dem Energieerhaltungssatz. Dabei wird angenommen, dass der Impuls ebenso wie die Energie vor und nach der InCrash-Phase gleich ist und dass die Stoßdauer unendlich kurz sei. Anhand des Kollisionspunktes, der Auslaufbewegung (über Spurenzeichnung), der Endlagen sowie der Deformationen der Fahrzeuge werden Auslaufimpuls und Deformationsenergie bestimmt. Hieraus können dann unter bestimmten Annahmen die Einlaufimpulse und damit die Kollisionsgeschwindigkeiten der Beteiligten errechnet werden. Da von der Auslaufbewegung auf die Einlaufgeschwindigkeit geschlossen wird, nennt man diese Vorgehensweise die **Rückwärtsrechnung**.

Bei der **Kraftrechnung** wird die Einlaufgeschwindigkeit der Fahrzeuge im Bereich der wahrscheinlichen Lösung angenommen. Über Bewegungsgleichungen werden in kleinen zeitlichen Schritten alle auftretenden Kräfte und hieraus die Bewegung der Fahrzeuge errechnet. Notwendig hierzu ist vor allem die möglichst genaue Kenntnis des Deformationsverhaltens der beteiligten Fahrzeuge. Da hierbei von der Einlaufgeschwindigkeit ausgehend der Bewegungsablauf der Fahrzeuge errechnet wird, bezeichnet man diese Vorgehensweise als **Vorwärtsrechnung**. Dieses Verfahren gewann mit der Rechneranwendung erheblich an Bedeutung [14]. Die Rechnung lässt sich mit veränderten Anfangsbedingungen so lange wiederholen, bis die errechneten Ergebnisse mit den bei der Unfalldatenerhebung festgestellten Endlagen, Spurenverläufen sowie den Beschädigungsbildern an den Fahrzeugen ausreichend genau übereinstimmen.

## 2.2.2 Unfallschwere

Bei der Betrachtung der Unfallschwere, nicht zu verwechseln mit der Unfallfolgenschwere, wird von der Überlegung ausgegangen, dass der sich bewegende Unfallbeteiligte, das Kollisionsobjekt, einer äußeren Beanspruchung ausgesetzt ist und dadurch eine Veränderung seines Bewegungsverhaltens erfährt. Gleichzeitig bewirkt die äußere Beanspruchung durch eingeprägte Kräfte eine Deformation des Kollisionsobjekts. Die Deformation beispielsweise im Bereich der Frontstruktur während der Kollisionsphase ist durchaus erwünscht (außer bei Bagatell-Fällen), da durch die Deformationscharakteristik das eigene Bewegungsverhalten, aber auch das des Kollisionskontrahenten gezielt beeinflusst werden kann. Die äußere Deformation hat jedoch auch die Verlagerung von Strukturteilen in den Fahrzeug-Innenraum (Intrusion) zur Folge, sodass der Vorverlagerungsweg der Insassen eingeschränkt werden kann. Die äußere Beanspruchung des Kollisionsobjekts während der InCrash-Phase hat also drei entscheidende Effekte im Hinblick auf die Insassenbelastung zur Folge, und zwar

- die Veränderung des Bewegungsverhaltens,
- die Deformation von Fahrzeugstrukturen und als Folge davon
- die Intrusion.

Da sich aber die Intrusion bei der Unfalldatenerhebung im Wesentlichen nur qualitativ und nur in den wenigsten Fällen quantitativ ermitteln lässt, beschreibt die Unfallkenngroße zur Charakterisierung der Unfallschwere das Bewegungsverhalten des Kollisionsobjekts. Zu diesem Zweck sind die nachfolgend kurz beschriebenen Bewertungsgrößen zu unterscheiden:

### **EBS (Equivalent Barrier Speed)**

Aufprallgeschwindigkeit auf eine flache starre Barriere, bei der die gleiche Deformationsenergie umgesetzt und das gleiche Beschädigungsbild wie im realen Unfall beim betrachteten Fahrzeug hervorgerufen wird.

### **ETS (Equivalent Test Speed)**

Aufprallgeschwindigkeit auf ein geeignetes, festes oder bewegliches Hindernis, bei der die gleiche Deformationsenergie umgesetzt und das gleiche Beschädigungsbild wie im realen Unfall hervorgerufen wird.

### **EES (Energy Equivalent Speed)**

Aufprallgeschwindigkeit auf ein beliebiges, festes Hindernis, bei der die gleiche Verformungsarbeit wie im realen Unfall umgesetzt wird. Die Verformungsenergie errechnet sich dabei zu

$$W_{\text{def}} = \frac{m}{2} \cdot (EES)^2 \quad (2.1)$$

## Änderung der Bewegungsenergie $\Delta E$

Die Änderung der Bewegungsenergie ist der auf das Kollisionsobjekt bezogene Energieverlust während der InCrash-Phase; sie entspricht wertmäßig der Deformationsarbeit.

## Stoßantrieb $S = \Delta I$

Der Stoßantrieb kennzeichnet die Impulsdifferenz zu zwei ausgezeichneten Zeitpunkten, nämlich zu Beginn und am Ende der InCrash-Phase.

## Geschwindigkeitsänderung $\Delta v$

Die Geschwindigkeitsänderung ist die Differenz zwischen der Kollisions- und der Auslaufgeschwindigkeit; sie lässt sich auch als spezifischer Stoßantrieb formulieren, indem der am Kollisionsobjekt wirksame Stoßantrieb auf die Masse des Kollisionsobjekts bezogen wird [7]:

$$\Delta v_1 = v'_1 - v_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot (v_1 - v_2) \cdot (1 + \varepsilon) \quad (2.2)$$

Sie hängt damit von der Relativgeschwindigkeit  $v_{\text{rel}}$ , vom Massenverhältnis  $\mu = m_1/m_2$  und vom Energieabsorptionsvermögen ab. Der Restitutionskoeffizienten  $\varepsilon$  kennzeichnet die Energieabsorption, d. h.  $\varepsilon = 0$ : plastischer Stoß;  $\varepsilon = 1$ : elastischer Stoß.

## Spezifische Unfall-Leistung SPUL

Die spezifische Unfall-Leistung ist das Produkt aus der Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  und der mittleren Fahrzeugverzögerung  $\bar{a}$  und ist proportional der am Kollisionsobjekt wirksamen Änderung der Bewegungsenergie während des Stoßvorgänge [7]. Wird diese Energiedifferenz durch die Kollisionsdauer geteilt, so liegt eine Leistung, nämlich die Unfall-Leistung, vor. Wird diese wiederum auf die Masse des Kollisionsobjekts bezogen, so erhält man, bis auf einen Proportionalitätsfaktor, die spezifische Unfall-Leistung. Sie errechnet sich zu

$$\text{SPUL} = 2 \cdot \frac{v_1 - v'_1}{v_1 + v'_1} \cdot \frac{\Delta E_1}{\tau \cdot m_1} = c \cdot \frac{\Delta E_1}{\tau \cdot m_1} = \Delta v_1 \cdot \bar{a}_1 \quad (2.3)$$

Die energie-äquivalente Geschwindigkeit EES, die Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  und die spezifische Unfall-Leistung wurden in [7] und [15] im Hinblick auf eine Korrelation mit den Belastungen von PKW-Insassen untersucht. Dabei konnte eine eindeutige Vorzugs-würdigkeit einer der Unfallkenngroßen nicht gezeigt werden. Es bleibt jedoch festzustellen, dass die Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  und die energie-äquivalente Geschwindigkeit EES die derzeit am häufigsten verwendeten Kenngroßen zur Charakterisierung der Frontal-, aber auch der Seiten- und der Heckkollision darstellen.

---

## 2.3 Unfallanalyse

Das Ziel der Unfallanalyse besteht darin, die Sachverhalte, die zum Unfall führten, unter Berücksichtigung verschiedener Teilaspekte zu untersuchen und von den Wirkungen, d. h.

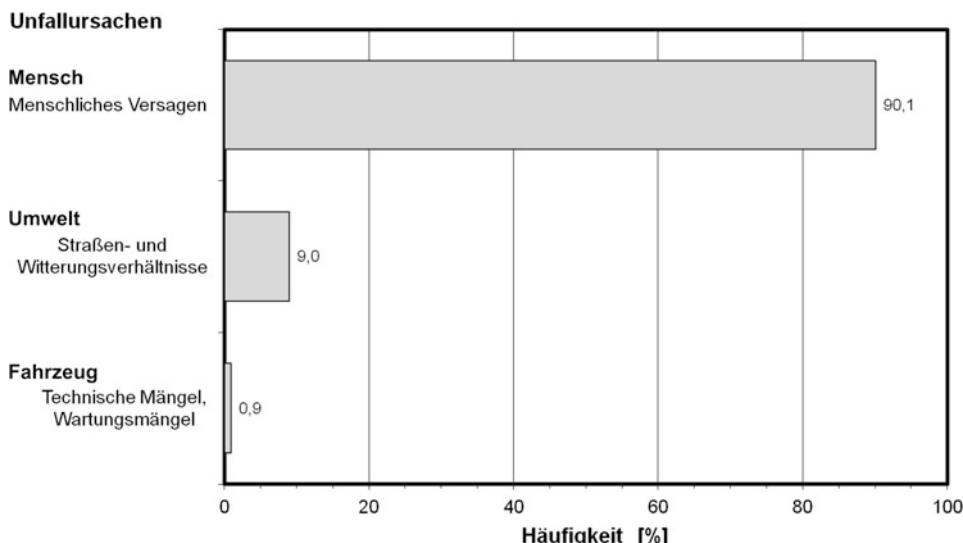
den Unfallfolgen (Verletzungen, Sachschäden), auf die Unfallursachen im technischen, medizinischen und/oder psychologischen Bereich zu schließen. Dabei beschränkt sich die Unfallanalyse im vorliegenden Fall auf die passive Sicherheit mit der Maßgabe, unfallfolgenmindernde Effekte zu ermitteln, um Maßnahmen zur Reduzierung des zu erwartenden Schadens einleiten zu können.

Die Unfallanalyse kann sich auf den Einzelfall, der durch eine umfassende Rekonstruktion hinreichend untersucht wurde, beziehen, es sind aber auch Aussagen auf der Basis von statistischen Untersuchungen einer ausreichend großen Fallzahl möglich.

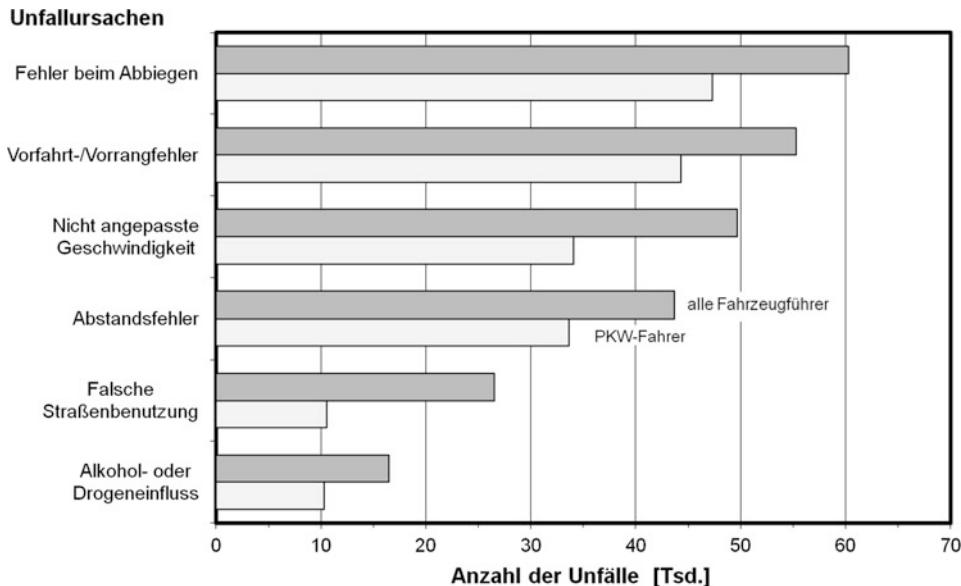
### 2.3.1 Aufklärung der Unfallursachen

Die Aufklärung der Unfallursache ist die Grundlage der Unfallanalyse, aus der ein Bedarf an Entwicklung und Verbesserung von Sicherheitsmaßnahmen abgeleitet werden kann.

Als Hauptunfallursache für Straßenverkehrsunfälle kann menschliches Fehlverhalten angesehen werden. Demgegenüber stellen umweltbezogene Ursachen wie Straßen- und Witterungsverhältnisse durch Regen, Schnee und Eis nur einen untergeordneten Teil dar, und technische Mängel treten nur in verschwindend geringem Umfang auf (Abb. 2.6). Es liegt nahe, dass dieser erfreulich niedrige Anteil technischer Mängel zurückgeführt werden kann auf angepasste Technik und kontinuierliche Kontrolle durch regelmäßige Hauptuntersuchungen. Die Rückführung der menschlichen Unzulänglichkeiten erfordert auch



**Abb. 2.6** Übersicht zu Ursachen von Straßenverkehrsunfällen mit Personenschäden im Jahr 2011 (n = 424.461 Unfälle [6])



**Abb. 2.7** Einteilung ausgewählter Beispiele menschlichen Versagens bei Unfällen mit Personenschaden im Jahr 2011 (alle Fahrzeugführer: 251.958, davon PKW-Fahrer: 180.202 Unfälle [6])

künftig eine verbesserte, langfristig stabile Aus- und Weiterbildung von Fahrzeugführern sowie fahrerunterstützende Maßnahmen durch Assistenz-Systeme.

Bei weiterer Detaillierung können bei Unfällen mit Personenschaden, bei denen menschliches Versagen zu beobachten war, als häufigste Unfallursache Fehler beim Abbiegen festgestellt werden (Abb. 2.7). Gefolgt wird diese Ursachengruppe durch Unfälle aufgrund von Vorfahrtfehlern, nicht angepasster Geschwindigkeit und Abstandsfehlern. Bei Unfällen, die durch falsche Straßenbenutzung verursacht werden, ist ein deutlicher Abstand in der Häufigkeitsausprägung zwischen allen Fahrzeugführern und PKW-Fahrern festzustellen. Dieser ist zurückzuführen auf das stärker vorhandene Fehlverhalten anderer Verkehrsbeteiligter wie Nutzfahrzeugen und motorisierte Zweiräder.

### 2.3.2 Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen

Von den Unfallursachen ausgehend, ergeben sich verschiedene Betrachtungsweisen für die Bereitstellung von verbesserten Sicherheitsmaßnahmen. Im Hinblick auf menschliches Versagen als Hauptunfallursache wird derzeit dieser Aspekt verstärkt vorangetrieben. Dabei wird abgezielt auf Assistenz-Systeme, die den Fahrer mit technischen Einrichtungen auf die Weise unterstützen, sodass er Gefahrensituationen hinsichtlich der Geschwindigkeit, des Abstandes zum Vorausfahrenden und des Überfahrens von Fahrbahnmarkierungen

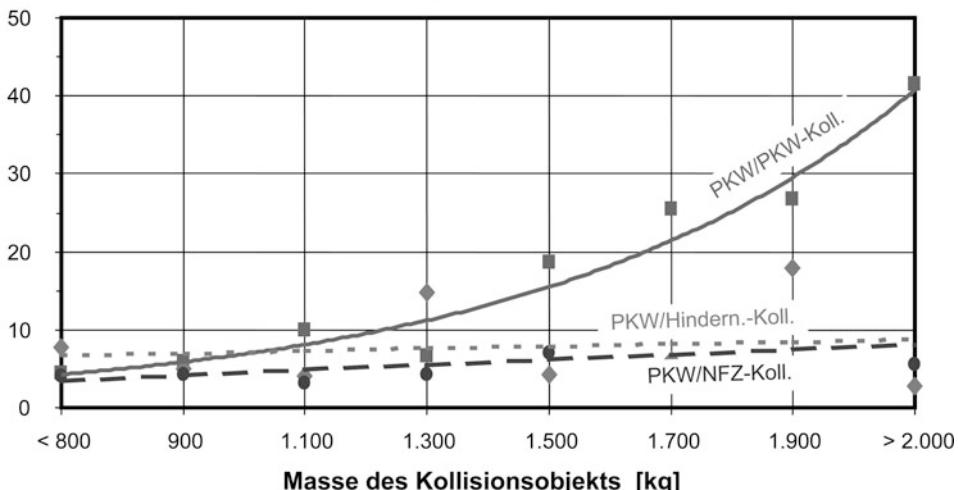
erkennen und frühzeitig reagieren kann; ein selbständiger Eingriff in das Motor- oder Bremsmanagement wird verstärkt vorangetrieben.

Zudem besteht das Ziel, neben der Unfallvermeidung vor allem die Schwere des Unfalls und deren Folgen zu minimieren. Als Beispiele für Maßnahmen, deren Erfordernisse aus dem Unfallgeschehen resultieren, sollen nachfolgend einige begründete Analyseergebnisse dargestellt werden:

### **Der Insassenschutz in Abhängigkeit von der Fahrzeugmasse**

Die Fahrzeugmasse spielt nachweislich beim Verletzungsrisiko von PKW-Insassen eine wesentliche Rolle. Anhand der Sicherheitszahl, bei der die Anzahl der untersuchten PKW-Insassen durch die monetarisierten Verletzungsfolgen geteilt wurden, zeigt sich, dass die Insassen bei PKW/PKW-Kollisionen in größeren PKW sicherer gegenüber Verletzungen sind als in kleineren. Dennoch ist das Verletzungsrisiko bei PKW/Hindernis-Kollisionen unabhängig von der Masse des Kollisionsobjekts, und zwar so hoch, bzw. die Sicherheit so niedrig, wie in leichteren PKW (Abb. 2.8). Daher müssen Klein- und Kleinstwagen mit einem Höchstmaß an technischen Sicherheitsmaßnahmen zur Verbesserung des Selbstschutzes ausgestattet sein. Daraus folgt, dass alle PKW, vor allem aber kleinere Fahrzeuge, serienmäßig mit verbesserten Gurtsystemen und mit Fahrer- und Beifahrer-Airbags ausgerüstet werden sollten. Die Kompatibilitätsfrage, d. h. die Frage nach dem Kontrahentenschutz, kann in der Weise gelöst werden, dass größere PKW zur Kompensation des  $\Delta v$ -Nachteils der kleineren PKW mit einer nachgiebigen Frontstruktur ausgestattet werden und dementsprechend kleinere PKW mit einer steiferen Deformationsstruktur [16].

**Sicherheitszahl [Insassen/Mio. Euro]**



**Abb. 2.8** Sicherheit von PKW-Insassen in Abhängigkeit von der Fahrzeugmasse bei verschiedenen Kollisionsarten

## Seitenschutz-Maßnahmen

Die Untersuchung der Aufprallarten (vgl. Abschn. 2.4.5) wird zeigen, dass Seitenkollisionen eine hohe Bedeutung haben, insbesondere wenn nicht nur die Häufigkeit, sondern auch die Verletzungsfolgekosten als Beurteilungskriterium herangezogen werden. Auch hierfür wurden in [9] zwei Test-Konfigurationen gefordert (und mittlerweile im Reglement ECE-R 95 gesetzlich vorgeschrieben):

- großflächiger Anstoß fahrerseitig gegen Fahrgastzelle mit nachgiebiger Barriere und einer Geschwindigkeit von mindestens 50 km/h und
- Anprall gegen ein starres Hindernis (Pfahl) unter einem Winkel von 90° und einer Geschwindigkeit von 35 km/h, um den häufig auftretenden Hinderniskollisionen gerecht zu werden.

## Fußgängerschutz-Maßnahmen

Ein weiterer wichtiger Punkt ist der Fußgängerschutz. Bei Unfällen mit Fußgängern sind diese am wenigsten geschützt und daher einem erheblich höheren Verletzungsrisiko ausgesetzt. Aus diesem Grund ist es wichtig, auch hier Vorkehrungen zu treffen, um die Verletzungsfolgen bei einem Unfall zu minimieren oder Verletzungen gar zu vermeiden. Dieses Thema wird im Weiteren vertieft und näher erläutert.

## Europäische Sicherheits-Standards

Anhand der Untersuchung der Aufpralltypen wird zu zeigen sein (vgl. Abschn. 2.4.6), dass die Sicherheitsanforderungen durch nur einen einzigen Crash-Test bei Frontalkollisionen nicht hinreichend beschrieben werden können. So wurden einerseits durch die EU-Kommission Vorschriften für Crash-Versuche erlassen (ECE-R 94 und 95). Andererseits werden von Automobilherstellern, Systementwicklern und Verbraucherschutzverbänden zusätzliche Tests nach Euro NCAP mit aus dem Unfallgeschehen abgeleiteten Geschwindigkeiten (frontal bis zu 64 km/h) und Hindernisformen (Offset, Pfahl) durchgeführt.

## Angepasste Insassenschutz-Systeme

Bei den meisten Unfällen befindet sich im Fahrzeug nur der Fahrer. Aus Gründen der Reparaturkosten ist die Zündung des Airbag und des Gurtstraffers auf den unbesetzten Sitzplätzen mit Hilfe von Sensoren zur Sitzplatzerkennung zu vermeiden. Zudem ist aus dem Unfallgeschehen ermittelt worden, dass ein gewisses Risiko von den Airbags ausgeht, insbesondere für kleinere Personen und Kinder [17]. Zur Minimierung des Risikopotentials wurde daher der Sicherheitsstandard FMVSS 208 (seit Mai 2000) modifiziert und zur Sicherstellung der Einhaltung der restriktiveren Kriterien intelligente Insassenschutz-Systeme und Komponenten entwickelt (so genannte Smart Restraint Systems).

Seit der Massenmotorisierung und den damit verbundenen Verletzungsrisiken wurden Schutzmaßnahmen entwickelt und verbessert. Diese Entwicklungen wurden meist getrie-

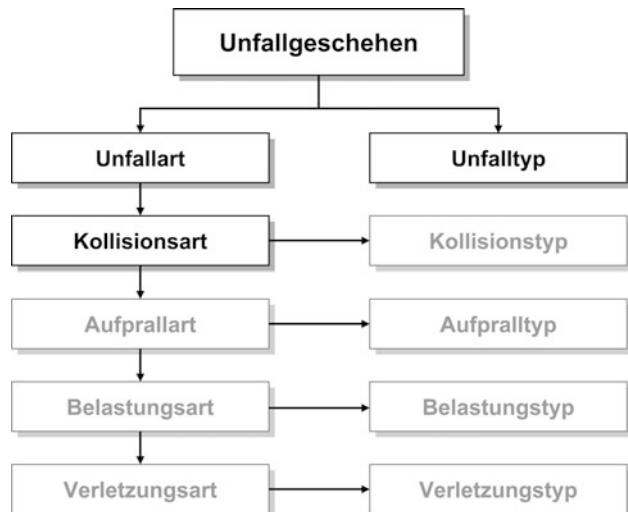
ben durch die Herausforderung, menschliches Versagen oder auch technische Unzulänglichkeiten zu kompensieren. Bei neueren Forschungs- und Entwicklungsprojekten besteht das Ziel darin, ein „**fehlertolerierendes Verkehrssystem**“ zu schaffen und zu gestalten. Neben den Verkehrsteilnehmern muss zudem auch der Planung von Infrastrukturmaßnahmen ein stärkeres Maß an Verantwortung abverlangt werden.

Die Liste mit Ergebnissen und Erkenntnissen ließe sich beliebig fortsetzen, hier sollte jedoch lediglich der Versuch unternommen werden, die Zielsetzung und Aufgabe der Unfallanalyse zu verdeutlichen.

## 2.4 Strukturierung des Unfallgeschehens

Die Einteilung des Unfallgeschehens ist keine natürliche Gegebenheit, nach der sich etwa die epidemiologische Erscheinungsform der Unfälle ausrichten würde. Vielmehr folgt die von Appel in [11] und [18] begonnene und in [19] konsequent weitergeführte Strukturierung einer mehr oder weniger sinnfälligen Unterscheidungsmöglichkeit aus Gründen einer einheitlichen Terminologie, aber auch aus Gründen der Vergleichbarkeit ähnlich auftretender Ereignisse. Wie wollte man beispielsweise die Unfall- und Verletzungsmechanik von PKW-Insassen und die von Radfahrern vergleichen? Im Folgenden soll die Einteilung des Unfallgeschehens aufgezeigt und mit Unfallzahlen aus der Bundesstatistik bzw. aus dem Datenmaterial der Unfallforschungsgruppe der MHH in Relation zueinander dargestellt werden; dabei handelt es sich um einen aktualisierten Auszug aus [19]. Eine Übersicht zu den nachfolgend erläuterten Strukturierungselementen zeigt Abb. 2.9.

**Abb. 2.9** Struktur des Unfallgeschehens; von besonderer Bedeutung sind die dunkler angelegten Strukturierungselemente



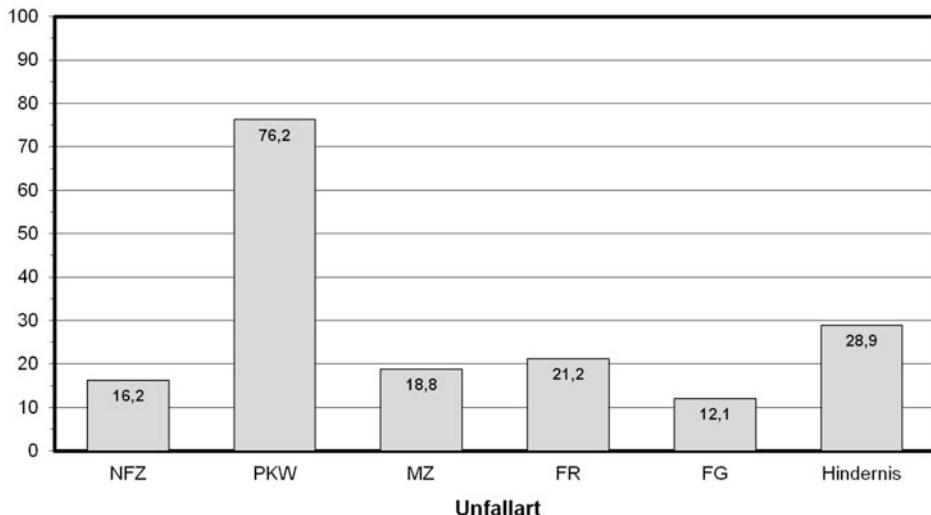
## 2.4.1 Unfallart

In der Bundesstatistik [6] sind Unfälle nach ihrer Beteiligung am Straßenverkehr unterteilt. Diese Unterteilung wird dort als erforderlich angesehen, um der Verschiedenartigkeit der einzelnen Verkehrsteilnehmer in Bezug auf ihre Kollisionseigenschaften gerecht zu werden. Da sich aber bei der Betrachtung einzelner Unfälle Ähnlichkeiten zeigen, soll diese historisch gewachsene, hier aber unzweckmäßige Unterteilung aus Gründen einer Vereinfachung in der Behandlung und mit dem Ziel einer besseren Übersichtlichkeit zugunsten einer ausreichend genauen Unfallarten-Unterteilung zusammengefasst und nachfolgend angewandt werden: Die Unfallarten, die der Unterscheidung der Unfallbeteiligten nach ihrer Teilnahme am Straßenverkehr dienen, umfassen somit

- Nutzfahrzeug-Unfälle (NFZ):  
Liefer- und Lastkraftwagen, Sattelschlepper, landwirtschaftliche und andere Zugmaschinen, LKW mit Spezialaufbauten, Kraftomnibusse und O-Busse sowie Straßenbahnen,
- Personenkraftwagen-Unfälle (PKW):  
Personenkraftwagen, Kombis und Cabriolets,
- Unfälle mit motorisierten Zweirädern (MZ):  
Motorräder, Mofas und Mopeds,
- Unfälle mit Fahrrädern (FR),
- Unfälle mit Fußgängern (FG) sowie
- Allein-Unfälle (Hindernis).

Damit lassen sich unter einer Unfallart all jene Unfälle zusammenfassen, bei denen zumindest ein Betroffener einer bestimmten Straßenverkehrsbeziehung zugeordnet werden kann. So setzt sich die Unfallart PKW aus Unfällen zusammen, die sich zwischen Personenkraftwagen ereignen, und zwischen Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen, motorisierten Zweirädern, Fahrrädern, Fußgängern und Hindernissen stattfinden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei der Unfallart NFZ die Kollisionen zwischen Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen mit der gleichen Ausprägung an Häufigkeiten und der Unfallfolgen auftreten wie bei der Unfallart PKW; das gleiche gilt für die PKW/MZ-Unfälle, die sowohl bei der Unfallart PKW als auch bei MZ vertreten sind, sodass bei der Betrachtung der Unfallarten Mehrfachzählungen auftreten.

Durch die Summation der zu beklagenden verletzten Personen und der Zuordnung der jeweiligen Verletzungsfolgekosten (vgl. Abschn. 3.2.4) lassen sich jeder Unfallart Kosten zuweisen. Trotz der dabei auftretenden Mehrfachzählungen gestatten die prozentualen Anteile Aussagen zur Signifikanz der einzelnen Unfallarten (Abb. 2.10): Den mit Abstand größten Anteil nimmt, aufgrund der hohen Verkehrsbeziehung und der damit verbundenen hohen Kollisionswahrscheinlichkeit, die Unfallart PKW mit etwa 76 % ein, gefolgt von den Unfällen, die an Hindernissen stattfinden; diese sind mit knapp 29 % an den entstehenden Verletzungsfolgekosten beteiligt. Etwa gleiche Anteile mit etwa 20 % weisen

**Häufigkeit [%]****Abb. 2.10** Unfallarten und prozentuale Anteile an Verletzungsfolgekosten, 2011 (nach [6])

die Unfallarten auf, die auf motorisierte Zweiräder und Fahrräder ausgerichtet sind. Die Unfallart NFZ ist immerhin noch mit ungefähr 16 % der Verletzungsfolgekosten vertreten. Den letzten Platz in der Rangreihe nehmen mit etwa 12 % die Unfälle mit Fußgänger ein. Die Gesamtsumme der Prozentangaben ergibt wegen der Mehrfachzählung mehr als 100 %.

#### 2.4.2 Unfalltyp

In der ersten Strukturierungsebene (Abb. 2.9) beschreibt der Unfalltyp die Konfliktsituation, die dem Unfall vorausgeht, d. h. die Unfallentstehung. Insgesamt werden, entsprechend der Festlegung in [6], sieben Unfalltypen unterschieden:

**Fahrunfall:** Ein Fahrunfall liegt in all jenen Fällen vor, bei denen der Fahrer die Kontrolle über das Fahrzeug verliert, beispielsweise aufgrund einer Fehleinschätzung der Geschwindigkeit hinsichtlich des Straßenverlaufs oder des Straßenzustandes, nicht aber „infolge eines Konflikts mit einem anderen Verkehrsteilnehmer, einem Tier oder einem Hindernis auf der Fahrbahn oder infolge plötzlichen Unvermögens oder plötzlichen Schadens am Fahrzeug“ [6]. Das konfliktauslösende Moment resultiert somit aus dem Missverhältnis zwischen dem Bedarf und dem Angebot an Verkehrsraum. Im Verlauf des Fahrunfalls kann es zu einem Aufprall auf ein Hindernis, aber auch zur Kollision mit anderen Verkehrsteilnehmern kommen.

**Abbiegeunfall:** Ein Abbiegeunfall liegt dann vor, wenn der „Unfall durch einen Konflikt zwischen einem Abbieger und einem aus gleicher oder entgegengesetzter Richtung kommenden Verkehrsteilnehmer ausgelöst wurde“ [6].

**Einbiegen-/Kreuzen-Unfall:** Ein derartiger Unfall liegt vor, wenn der auslösende Konflikt auf eine kritische Situation „zwischen einem einbiegenden oder kreuzenden Wartepflichtigen und einem Vorfahrtberechtigten“ [6] zurückgeführt werden kann.

**Überschreitenunfall:** Im Gegensatz zu den sonst genannten Unfalltypen sind beim Überschreitenunfall die Kollisionskontrahenten konkreter gefasst: Ein derartiger Unfalltyp liegt nämlich dann vor, wenn ein „Konflikt zwischen einem die Fahrbahn überquerenden Fußgänger und einem Fahrzeug“ [6] auftritt; der Unfall wird allerdings auch diesem Unfalltyp zugeordnet, wenn es zu keiner Kollision zwischen unfallauslösendem Fußgänger und Fahrzeug kommt.

**Unfall durch ruhenden Verkehr:** Diesem Unfalltyp werden all jene Unfälle zugerechnet, bei denen der Konflikt zwischen einem „Fahrzeug des fließenden Verkehrs und einem auf der Fahrbahn haltenden oder parkenden Fahrzeug“ [6], allerdings ohne verkehrsbedingtes Warten, aufgetreten ist.

**Unfall im Längsverkehr:** Ein Unfall im Längsverkehr liegt dann vor, „wenn der Unfall durch einen Konflikt zwischen Verkehrsteilnehmern ausgelöst wurde, die sich in gleicher oder entgegengesetzter Richtung bewegten“ [6]. Hierzu zählen also auch Unfälle, bei denen sich ein Fußgänger in Längsrichtung der Fahrbahn bewegt; sie werden nicht den Überschreitenunfällen zugerechnet.

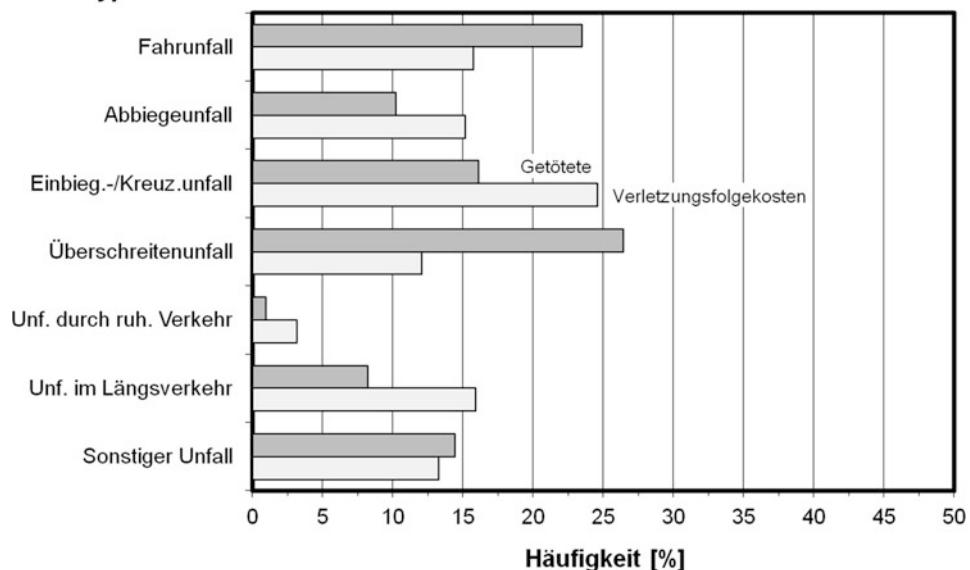
**Sonstiger Unfall:** „Hierzu zählen alle Unfälle, die keinem anderen Unfalltyp zuzuordnen sind“ [6].

Die Relevanz dieser insgesamt sieben Unfalltypen ist aufgrund ihrer unterschiedlichen Ausprägung in Abb. 2.11 für aufgetretene Unfälle innerhalb und in Abb. 2.12 für Unfälle außerhalb geschlossener Ortschaften für das Jahr 2011 dargestellt.

Bei den innerorts stattfindenden Unfällen zeigen hinsichtlich der Verletzungsfolgekosten erwartungsgemäß die Einbiegen-/Kreuzen-Unfälle eine ausgeprägte Dominanz (Abb. 2.11), während bei Unfällen außerorts die Fahrunfälle und die Unfälle im Längsverkehr vorherrschen (Abb. 2.12).

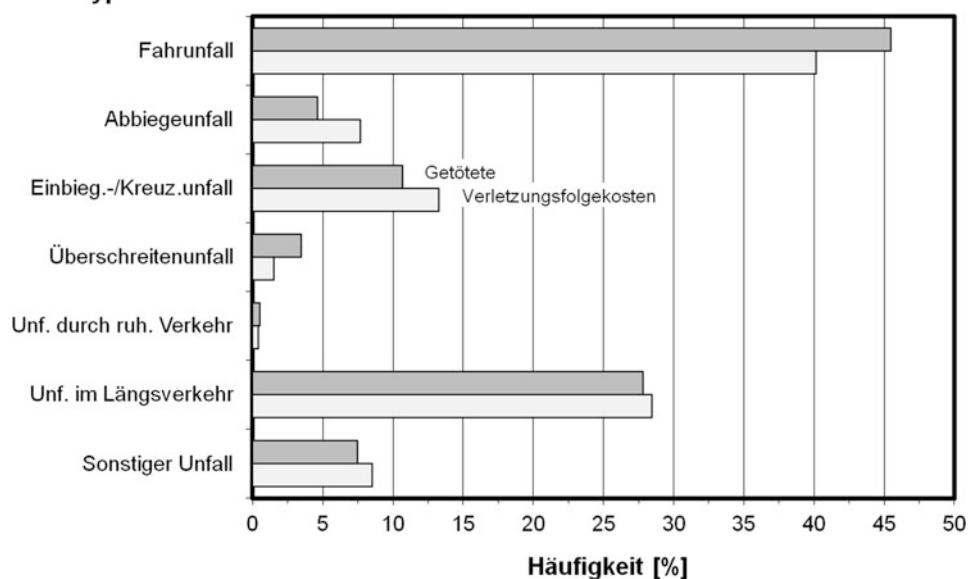
Anhand der Unfalltypen-Verteilungen kann außerdem verdeutlicht werden, dass es für eine Relevanzaussage nicht ausreicht, als Unterscheidungsmerkmal die Anzahl der Getöteten vergleichend darzustellen. Vielmehr müssen auch Schwer- und Leichtverletzte einbezogen und aus Nivellierungsgründen mit den jeweiligen Verletzungsfolgekosten beaufschlagt werden, um zu einer objektiven Risikoaussage zu gelangen. Allein schon der Vergleich der Teilsummen zeigt mit 1.115 getöteten Verkehrsteilnehmern innerorts und 2.894 Getöteten außerorts, aber annähernd gleichen Verletzungsfolgekosten (13,05 innerorts gegenüber 11,53 Mrd. € außerorts), eine Überbewertung der Unfälle, die im Außerortsbereich stattfinden, wenn lediglich die Anzahl der tödlich Verletzten zugrunde gelegt wird. Aber auch bei der Verteilung der Unfalltypen – in Abb. 2.11 ist dies für innerorts stattfindende Unfälle gezeigt – ergeben sich je nach Unterscheidungskriterium zum Teil erheblich unterschiedliche

### Unfalltyp



**Abb. 2.11** Prozentuale Verteilung der Unfalltypen im Jahr 2011, innerorts

### Unfalltyp



**Abb. 2.12** Prozentuale Verteilung der Unfalltypen im Jahr 2011, außerorts

Anteile: So sind innerorts 26,5 % aller Getöteten bei Überschreitenunfällen zu beklagen, während lediglich 12,1 % der Verletzungsfolgekosten diesem Unfalltyp zuzurechnen sind. Im Gegensatz dazu weisen die beiden Unfalltypen Einbiegen-/Kreuzen-Unfall und Abbiegeunfall auf der Basis der Verletzungsfolgekosten mit zusammen 39,8 % einen deutlich höheren Anteil auf als bei der Verteilung der Getöteten, der bei 26,4 % liegt. Diese Verschiebungen konnten in diesem Ausmaß bei den Außerorts-Unfällen nicht beobachtet werden (Abb. 2.12), weil hier die höhere Unfallschwere zu schwereren Verletzungen führte und damit eine geringere Schwankungsbreite beim Verhältnis zwischen der Anzahl der schwer und tödlich Verletzten aufwies; dieses Verhältnis liegt außerorts im Vergleich zu Unfällen im Innerortsbereich (durchschnittlich 11-fach außerorts gegenüber dem 33-fachen Wert innerorts) deutlich niedriger.

Ein denkbarer statistischer Zusammenhang zwischen Unfalltyp und Aufprallstelle, beispielsweise an Personenkarrenwagen, ist zwar möglich, erscheint aber nicht angebracht, da die Konfliktsituation nicht zwangsläufig zur Kollision zwischen den Verkehrsteilnehmern führt. Die Relevanzbetrachtung der Unfalltypen kann allerdings als Entscheidungshilfe für Maßnahmen im Bereich der aktiven Sicherheit herangezogen werden, da sie mit der Beschreibung der Konfliktlösung die Möglichkeit bietet, Maßnahmen im Bereich der Verkehrsumwelt zu initiieren und damit zu einer Entschärfung der Konfliktsituation beizutragen. Daneben lassen sich Möglichkeiten für Maßnahmen am Fahrzeug erarbeiten mit dem Ziel, die Fahrzeugeigenschaften beim Zusammenwirken zwischen Fahrer und Fahrzeug positiv zu beeinflussen.

### 2.4.3 Kollisionsart

Mit den Kollisionsarten werden die Unfälle zwischen den einzelnen Kollisionskontrahenten, unabhängig von Verursachungszuweisung und Beteiligungsreihenfolge, wie dies in der Bundesstatistik ausgewiesen ist, gekennzeichnet. Durch die Betrachtung einer einzelnen Kollisionsart, z. B. durch Zusammenfassung aller NFZ/PKW- oder aller PKW/PKW-Unfälle, kann die Signifikanz der Kollisionsarten widerspruchsfrei angegeben werden, da hierbei, im Gegensatz zu den Untersuchungen der Unfallarten, eine Mehrfachzählung vermieden wird. Die Art der Darstellung in Form der so genannten Kollisionsarten-Matrix wurde bereits in [18] mit den Häufigkeiten der Kollisionen und der Anzahl der Getöteten belegt. Sie dient der Einteilung des Unfallgeschehens; genau genommen beinhaltet die Kollisionsarten-Matrix jedoch nur die Hindernis-Kollisionen und die Kollisionen mit zwei beteiligten Kollisionskontrahenten (dies sind annähernd 90 % aller Unfälle), nicht aber Mehrfachkollisionen. Die Besetzung der Matrix, die schematisch in Abb. 2.13 dargestellt ist, erfolgt in der Weise, dass jedem Matrix-Element die jeweils interessierenden Zahlenwerte einer Kombination zwischen zwei (gleichen oder verschiedenen) Kollisionskontrahenten zugewiesen wird. Links an der Matrix sind als Zeilenelemente die Verkehrsteilnehmer aufgetragen, die mit anderen Verkehrsteilnehmern und Hindernissen (Spalenelemente) kollidieren können. Die Unterteilung erfolgt, gemäß den bereits bei den Unfallarten ange-

	NFZ	PKW	MZ	FR	FG	Hindernis
NFZ	$n_{11}$	$n_{12}$	$n_{13}$	$n_{14}$	$n_{15}$	$n_{16}$
PKW	---	$n_{22}$	$n_{23}$	$n_{24}$	$n_{25}$	$n_{26}$
MZ	---	---	$n_{33}$	$n_{34}$	$n_{35}$	$n_{36}$
FR	---	---	---	$n_{44}$	$n_{45}$	$n_{46}$
FG	---	---	---	---	$n_{55}$	$n_{56}$



Unfallart PKW

**Abb. 2.13** Schema der Kollisionsarten-Matrix

	NFZ	PKW	MZ	FR	FG	Hindernis
NFZ	3.599	32.276	3.839	5.828	3.685	4.974
PKW	---	114.314	27.763	45.744	22.259	50.792
MZ	---	---	789	1.216	850	12.270
FR	---	---	---	5.069	3.857	12.839
FG	---	---	---	---	0	0

Dargestellt sind 351.963 Unfälle mit Sach- und Personenschäden (= 90,8 %) ggb. insgesamt 387.753 entsprechenden Unfällen

**Abb. 2.14** Kollisionsarten-Matrix: Anzahl der Hindernis-Unfälle und der Unfälle zwischen zwei Kollisionskontrahenten mit Personen- und schweren Sachschäden, 2011

wandten Beteiligengruppen, in Nutzfahrzeuge (NFZ), Personenkraftwagen (PKW), motorisierte Zweiräder (MZ), Fahrräder (FR) und Fußgänger (FG). Auf diese Weise werden alle Allein-Unfälle, d. h. Unfälle mit Hindernissen, und die Unfälle mit zwei Beteiligten erfasst.

Unter Verwendung der Unfall- und Verletztenzahlen aus der Bundesstatistik 2011 [6] ist in Abb. 2.14 die Anzahl der Hindernis-Unfälle und der Unfälle mit zwei Kollisionskontrahenten mit Personen- und schweren Sachschäden für jede Kollisionsart in die entsprechenden Matrizeelemente eingetragen. Mit dieser Kollisionsarten-Zuordnung können insgesamt allerdings nur 91 % aller Unfälle erfasst werden; der unberücksichtigte Anteil umfasst Mehrfachkollisionen.

Die am häufigsten auftretende Kollisionsart wird erwartungsgemäß durch PKW/PKW-Kollisionen gebildet, die zweithäufigste Unfallkombination sind PKW/Hindernis-Kollisi-

onen, daran schließen sich in der Reihenfolge ihres Auftretens die Kollisionsarten PKW/FR, NFZ/PKW, PKW/MZ und PKW/FG an.

Für diese Kollisionsarten lässt sich aus dem Datenmaterial der Bundesstatistik 2011 [6] die Anzahl der tödlich, schwer und leicht verletzten Verkehrsteilnehmer bestimmen. Werden diese Zahlen mit den unter volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten ermittelten Verletzungskosten (vgl. Abschn. 3.2.4) verknüpft, so ergeben sich – ähnlich wie bereits im Zusammenhang mit den Unfallarten durchgeführt – für jede Kollisionsart die Verletzungskosten, die in Abb. 2.15 gezeigt werden [20].

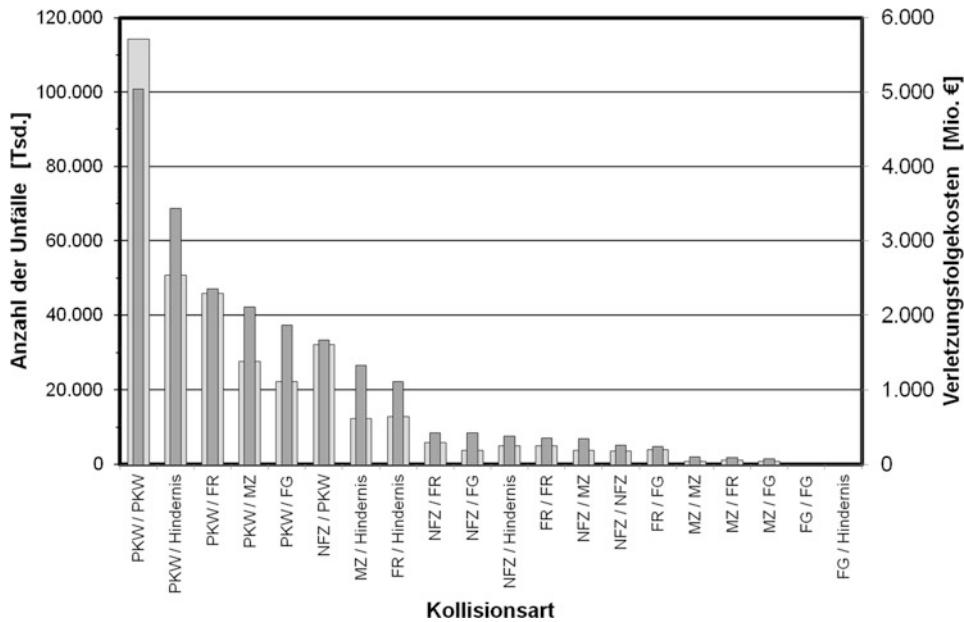
	<b>NFZ</b>	<b>PKW</b>	<b>MZ</b>	<b>FR</b>	<b>FG</b>	<b>Hindernis</b>
<b>NFZ</b>	258,115	1.670,545	348,947	426,237	424,999	379,852
<b>PKW</b>	---	5.036,999	2.111,215	2.349,708	1.872,180	3.432,146
<b>MZ</b>	---	---	99,501	95,264	71,454	1.327,740
<b>FR</b>	---	---	---	353,304	236,881	1.112,550
<b>FG</b>	---	---	---	---	0,000	0,000

Dargestellt sind 21.608 Mio. € Verletzungskosten (= 87,9 %) ggb. insgesamt 24.585 Mio. € aufgrund aller bei Straßenverkehrsunfällen verletzten Personen

**Abb. 2.15** Kollisionsarten-Matrix: Verletzungskosten in Mio. € für Hindernis-Kollisionen und Unfälle zwischen zwei Kollisionskontrahenten, 2011

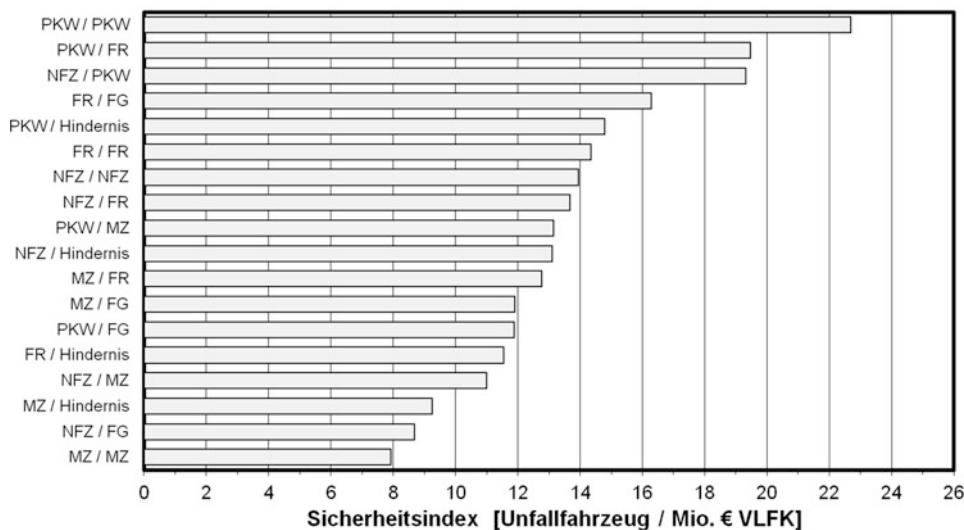
Stellt man in Abhängigkeit dieser Kosten eine Rangreihe auf, die wiederum von der Kollisionsart PKW/PKW angeführt und von PKW/Hindernis-, PKW/FR-, PKW/MZ-, PKW/FG- und NFZ/PKW-Unfällen gefolgt wird, so ergibt sich gegenüber der Unfallhäufigkeit eine Umverteilung innerhalb der Rangreihe: Gemessen an den Verletzungskosten weisen beispielsweise die PKW/FG-Unfälle eine erheblich größere Bedeutung auf als die alleinige Anzahl der Unfälle vorgibt. Aber nicht nur die Rangreihe, sondern auch die absoluten Beträge der Unfallzahl und der Verletzungskosten (vgl. z. B. PKW/PKW- und PKW/Hindernis-Unfälle) weisen erhebliche Unterschiede zueinander auf, die durch die Darstellung in Abb. 2.16 verdeutlicht werden sollen.

Es wurde bereits gezeigt, dass durch PKW-Unfälle ungefähr 73 % der Verletzungskosten entstehen (vgl. „Unfallart PKW“ in Abb. 2.10); dies sind etwa 16,473 Mrd. €. Eine andere Möglichkeit zur Darstellung der Sicherheit für die einzelnen Kollisionsarten stellt der **Sicherheitsindex** dar. Mit Hilfe dieser Kenngröße wird die Anzahl der Unfälle mit Personen- und Sachschäden aus Maßstabsgründen auf 1 Mio. € Verletzungskosten bezogen. Vergleicht man nun die in Abb. 2.17 dargestellte Rangreihe, so ist zu erkennen, dass die PKW/PKW-Kollision die höchste Sicherheit aufweist. Demgegenüber weisen PKW/Hindernis-Kollisionen – bei Unfallhäufigkeit und absoluten Verletzungskosten jeweils auf Rang zwei – eine nur etwa 35 % niedrigere Sicherheit auf. Dieses überraschende Ergebnis ist in sofern bemerkenswert, da die Sicherheit von PKW bei Crash-Versuchen



**Abb. 2.16** Rangreihe der Kollisionsarten nach Verletzungsfolgekosten und Vergleich mit der Häufigkeit der Unfälle, 2011

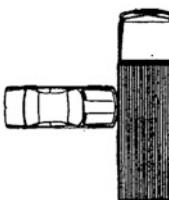
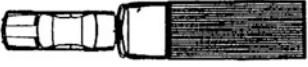
#### Kollisionsarten



**Abb. 2.17** Rangreihe der Kollisionsarten gemessen an der Anzahl der Unfälle pro Mio. € Verletzungsfolgekosten, 2011

mit Hilfe des Barriere-Aufpralls ausgelegt und überprüft wird. Generell lässt sich feststellen, dass die PKW-Kollisionen mit anderen PKW, NFZ und Hindernissen eine relativ hohe Sicherheit aufweisen (Sicherheitsindizes zwischen etwa 15 und 23 Unfälle/Mio. € Verletzungsfolgekosten). Bei den NFZ/Hindernis- und den NFZ/NFZ-Kollisionen, bei denen auf den Insassenschutz für NFZ-Fahrer geschlossen werden kann, beträgt der Sicherheitsindex lediglich etwa 13 bis 14 Unfälle/Mio. € Verletzungsfolgekosten. Bei näherer Betrachtung fällt zudem auf, dass sich für PKW/FR-Kollisionen eine höhere Sicherheit ergibt als für Kollisionen zwischen Radfahrern. Der Grund hierfür dürfte in der geringen Verletzungsschwere der PKW-Insassen und der günstigeren Abwurffkinematik von Radfahrern zu finden sein. Die Kollisionsarten mit dem geringsten Sicherheitsindex bilden erwartungsgemäß die Unfälle mit Beteiligung von Fußgängern (FG) und die mit motorisierten Zweirädern (MZ) aufgrund der fehlenden Deformationsstrukturen und zumindest bei Motorrädern den hohen Kollisionsgeschwindigkeiten.

**Abb. 2.18** Kollisionstypen (KT) bei PKW/NFZ-Unfällen

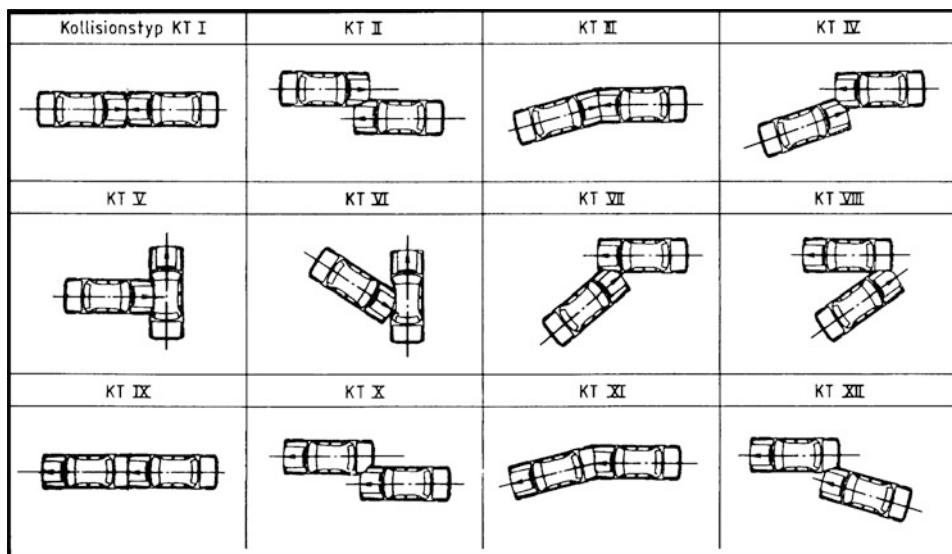
PKW / NFZ	KT	
Front / Front	A	
Front / Seite	B	
Front / Heck	C	
Seite / Front	D	
Heck / Front	E	

## 2.4.4 Kollisionstyp

Mit Hilfe der Kollisionstypen wird die Unfallsituation hinsichtlich der geometrischen Gegebenheiten (so z. B. die Lage der Kollisionskontrahenten, die Beschädigungsflächen u. a.) und des Deformationsverhaltens der beteiligten Strukturen qualitativ beschrieben. Die Kollisionstypen-Einteilung ermöglicht somit eine erste erforderliche Unterteilung der Unfälle innerhalb einer Kollisionsart mit dem Ziel, vergleichbare Unfall- und Verletzungsmechanismen der Insassen für die Unfallanalyse bereitzustellen. Es wird später zu zeigen sein, dass weitere Unterscheidungen, z. B. bezüglich des verwendeten Rückhaltesystems, notwendig sind, die mehr auf das Kontaktssystem, also auf die Relation zwischen Insassen und Innenraum, abzielen. Im Unterschied dazu ist die Kollisionstypen-Einteilung als „äußere“ Unterscheidungsmöglichkeit der Unfallsituation aufzufassen.

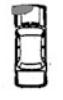
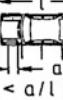
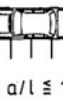
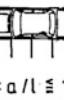
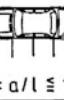
Die Definition der Kollisionstypen für NFZ/PKW-, PKW/PKW- und PKW/Hindernis-Unfälle wurden in [16] bzw. [21] erarbeitet und zur Ermittlung und Überprüfung von Sicherheitsmaßnahmen angewandt. Die somit eingeführten Kollisionstypen sind in den Abb. 2.18 bis 2.20 dargestellt. Die sich für kollidierte Personenkraftwagen ergebenden Kollisionstypen sind in Tab. 2.1 zusammengefasst.

Das Material der Bundesstatistik reicht in seiner Tiefe nicht aus, die Kollisionstypen abzuleiten. Diese Ableitung, wie auch die weitere zahlenmäßige Strukturierung, erfolgt anhand des Datenmaterials der Unfallforschung an der Medizinischen Hochschule Hannover (MHH). Bei dem bereitgestellten Datenmaterial handelt es sich um 1.080 PKW-Unfälle mit



**Abb. 2.19** Kollisionstypen bei PKW/PKW-Unfällen

**Abb. 2.20** Kollisionstypen bei PKW/Hindernis-Unfällen

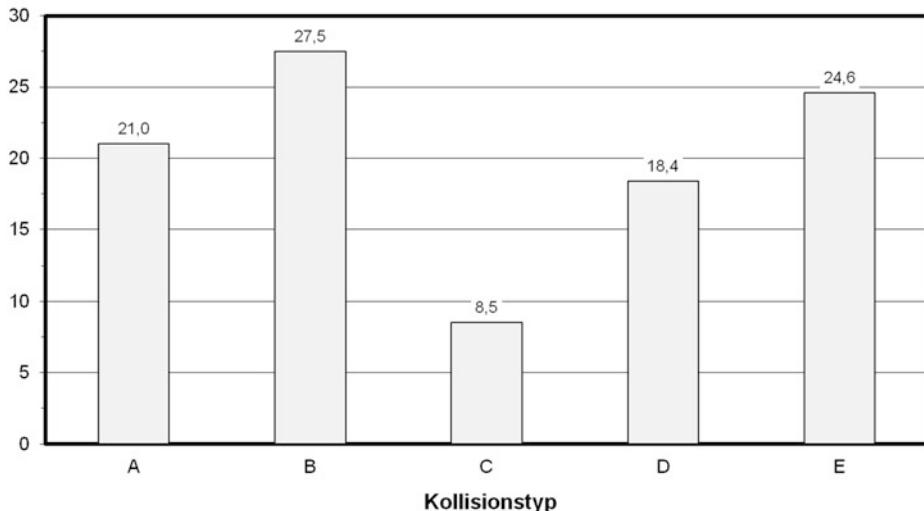
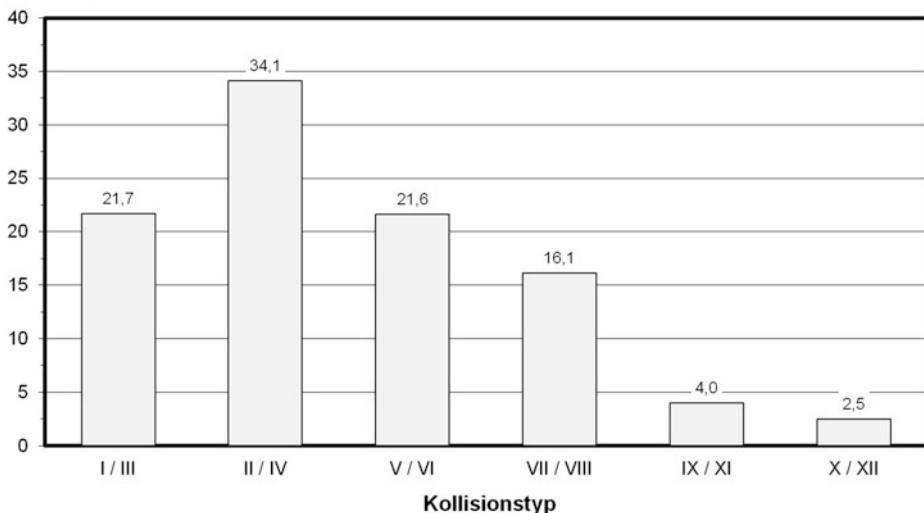
Frontalkollisionen / (Heckkollisionen)			
01 / (15)	02 / (16)	03 / (17)	
 $0 < a/b \leq 1/2$	 $0 < a/b \leq 1/2$	 $0 < a/b \leq 1/2$	
04 / (18)	05 / (19)	06 / (20)	
 $1/2 < a/b < 1$	 $1/2 < a/b < 1$	 $1/2 < a/b < 1$	
Seitenkollision			
07	08	09	10
 $0 < a/l \leq 1/6$	 $0 < a/l \leq 1/6$	 $0 < a/l \leq 1/6$	 $0 < a/l \leq 1/6$
11	12	13	14
 $1/6 < a/l \leq 1/4$	 $1/6 < a/l \leq 1/4$	 $1/6 < a/l \leq 1/4$	 $1/6 < a/l \leq 1/4$
a: Hindernisbreite b: Fahrzeugbreite l: Fahrzeulgänge			

insgesamt 2.330 verletzten PKW-Insassen. Werden die Unfälle mit äußeren Verkehrsteilnehmern vernachlässigt, so verbleiben vom Ausgangsmaterial noch 1.028 Unfälle mit

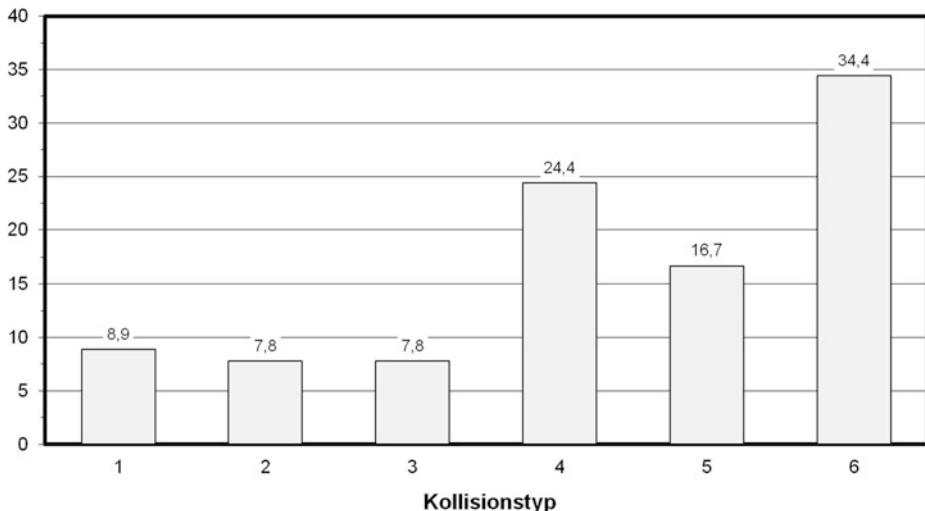
- 189 NFZ/PKW-Unfällen,
- 639 PKW/PKW-Unfällen (mit 742 PKW) und
- 200 PKW/Hindernis-Unfällen,

**Tab. 2.1** Kollisionstypen zu PKW/NFZ-, PKW/PKW- und PKW/Hindernis-Kollisionen

Kollisionsart	Anzahl der Kollisions-typen	Unfallkonstellation für Kollisionsobjekt		
		Front	Seite	Heck
PKW / NFZ	5	A	D	E
PKW / PKW	12	I bis IV	V bis VII	IX bis XII
PKW / Hindernis	20	1 bis 6	7 bis 14	15 bis 20

**Häufigkeit [%]****Abb. 2.21** Häufigkeitsverteilung der Kollisionstypen bei NFZ/PKW-Unfällen**Häufigkeit [%]****Abb. 2.22** Häufigkeitsverteilung der Kollisionstypen bei PKW/PKW-Unfällen

an denen insgesamt 1.131 Personenkraftwagen beteiligt waren. Die Verteilung der sich für NFZ/PKW-Kollisionen ergebenden Kollisionstypen ist auf der Basis von 104 Fällen unter Berücksichtigung eindeutiger Unfallbeschreibungen in Abb. 2.21 dargestellt.

**Häufigkeit [%]****Abb. 2.23** Häufigkeitsverteilung der Kollisionstypen bei frontalen PKW/Hindernis-Unfällen

Die Verteilung der bei PKW/PKW-Unfällen auftretenden Kollisionstypen wurde auf der Basis von 524 Personenkraftwagen ermittelt, sie ist in Abb. 2.22 gezeigt.

Die Unterscheidung in schmale (Kollisionstyp 1 bis 3) bzw. breite Hindernisse (Kollisionstyp 4 bis 6) erfolgte anhand der Hindernisbeschreibung, wobei unsicher erscheinende Zuordnungen (z. B. Objekte mit einer Masse von weniger als 200 kg, Zaun, Gebüsch u. a. m.) und offensichtlich nicht simulierbare Unfälle (z. B. Graben, Erdwall) unberücksichtigt blieben. Die Kollisionstypen-Verteilung der somit verbleibenden 167 frontalen PKW/Hindernis-Unfälle ist in Abb. 2.23 gezeigt.

Aufgrund der inkonsistenten Definitionen der Kollisionstypen, mit denen im einen Fall lediglich die Anstoßbereiche beschrieben werden (bei NFZ-Kollisionen), im anderen Falle aber die Deformationseigenschaften sowohl des Kollisionsobjekts als auch des Kontrahenten (bei PKW/Hindernis-Kollisionen) zumindest ansatzweise einbezogen werden, ist eine durchgängige Anwendung der Kollisionstypen wenig hilfreich und weist hier lediglich dokumentierenden Charakter auf.

## 2.4.5 Aufprallart

Die Aufprallart beschreibt die Unfallsituation des einzelnen Kollisionsobjekts, d. h. des interessierenden Unfallbeteiligten. Im vorliegenden Fall ist dies der kollidierte Personenkraftwagen, der frontal, lateral und heckseitig durch einen Aufprall beansprucht werden kann; zusätzlich ist der Überschlag als Unterscheidungsmerkmal eingeführt. Die so defi-

**Tab. 2.2** PKW-Aufprallarten (Datenmaterial der Unfallforschung MHH)

Aufprallart PKW	Kollisionskontrahenten			Gesamt- Anzahl [ - ]	Verletzungs- folgekosten [Mio. €]	Sicherheits- zahl [Unf./Mio. €]
	NFZ	PKW	Hindernis			
<b>Front</b>	104 56,5%	524 70,8%	167 58,2%	795 65,7%	79,67 58,3%	5,10
<b>Seite</b>	69 37,5%	179 24,2%	83 29,0%	331 27,3%	54,25 39,7%	3,12
<b>Heck</b>	11 6,0%	37 5,0%	3 1,0%	51 4,2%	0,76 0,6%	34,46
<b>Überschlag</b>	0 0,0%	0 0,0%	34 11,8%	34 2,8%	1,97 1,4%	8,81
<b>Summe</b>	184 100,0%	740 100,0%	287 100,0%	1.211 100,0%	136,65 100,0%	---

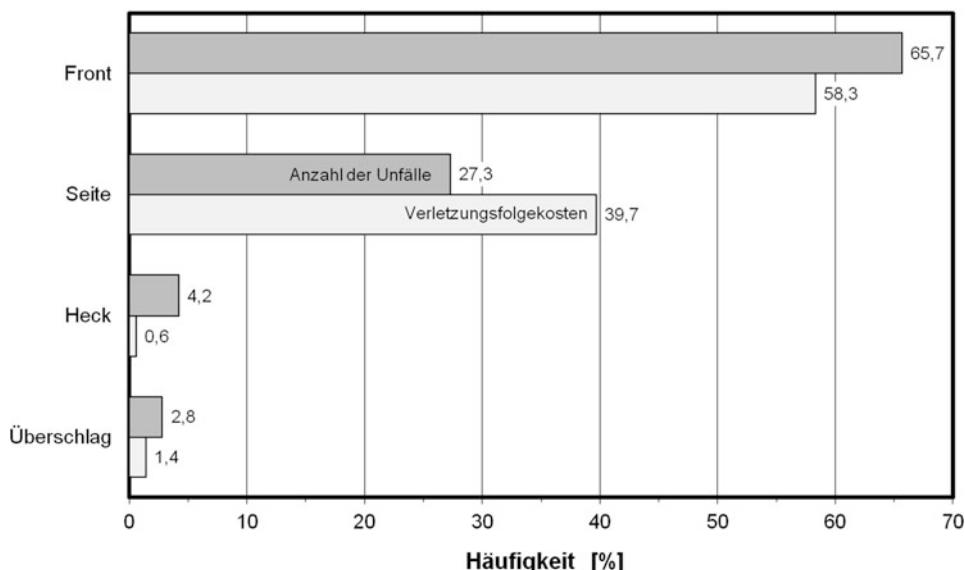
nierte Aufprallart impliziert die gänzlich unterschiedliche Kinematik und die daraus resultierende Belastung der PKW-Insassen. Zur Ermittlung der Aufprallarten aus dem bereitgestellten Datenmaterial der Unfallforschung MHH kann von 1.231 PKW ausgegangen werden, die mit anderen Personenkraftwagen oder mit Nutzfahrzeugen kollidiert oder auf ein Hindernis aufgeprallt sind. Da zur Relevanzuntersuchung die Verletzungsfolgekosten einbezogen werden sollen, wurden die Unfälle, bei denen die Verletzungen der Insassen unbekannt sind, vernachlässigt, sodass für die Verteilung der Aufprallarten nur noch 1.211 Personenkraftwagen zur Verfügung standen.

Das Schadensausmaß in Form der Verletzungsfolgekosten hängt in starkem Maße von der Aufprallart ab; dies kommt in den Zahlenwerten der Tab. 2.2 zum Ausdruck. Hier sind zunächst Anzahl und prozentuale Verteilung der PKW-Aufprallarten bei Kollisionen mit den Kollisionskontrahenten NFZ, PKW und Hindernis aufgetragen; der Überschlag ist gewissermaßen ein Sonderfall der Hinderniskollision und tritt wegen des Ausschlusses von Mehrfachkollisionen bei NFZ- und PKW-Kollisionen nicht auf. Bemerkenswert ist der relativ hohe Anteil des Frontalaufpralls bei PKW-Kollisionen (70,8 %) im Vergleich zu anderen Kollisionskontrahenten (NFZ: 56,5 % bzw. Hindernis: 58,2 %). Andererseits sind PKW-Insassen durch den Seitenauftprall mit Nutzfahrzeugen (37,5 %) aufgrund der ausgeprägten architektonischen Inkompatibilität zwischen Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen erheblich stärker gefährdet.

Bei der Gesamtanzahl der Aufprallarten dominiert erwartungsgemäß der Frontalaufprall mit 65,7 %, gefolgt vom Seitenauftprall (27,3 %) und vom Heckaufprall (4,2 %); der Überschlag zeigt lediglich einen Anteil von 2,8 % auf. Dies zeigt in anschaulicher Weise auch der in Abb. 2.24 dargestellte Vergleich der Aufprallarten.

Bei der vorliegenden Untersuchung der Aufprallarten soll jedoch weniger ein Repräsentativitätsnachweis anhand der Unfallzahlen erbracht werden. Vielmehr wird hier nachdrücklich auf die Notwendigkeit der Verwendung der Verletzungsfolgekosten bei Rele-

### Aufprallart



**Abb. 2.24** Verteilung der Häufigkeit und der Verletzungsfolgekosten der Aufprallarten bei PKW-Kollisionen

vanzuntersuchungen abgehoben: Die in Tab. 2.2 aufgelistete Verteilung der Verletzungsfolgekosten zeigt eine beachtenswerte Verschiebung hin zum Seitenaufprall, der in der Häufigkeitsverteilung einen Anteil von 27,3 %, bei der Verteilung der Verletzungsfolgekosten hingegen 39,7 %, ein erheblich höheres Verletzungsrisiko also, aufweist (Abb. 2.24).

Dies kommt, wenn auch in einem anderen Wertebereich, durch die in [5] definierte Sicherheitszahl – hier angewandt auf die Aufprallarten – zum Ausdruck: Wird die jeweilige Unfallanzahl auf die ermittelten Folgekosten der Insassenverletzungen bezogen, so ergeben sich die in der rechten Spalte der Tab. 2.2 aufgelisteten Sicherheitsmaßzahlen, die die Sicherheit der PKW-Insassen bei verschiedenen Aufprallarten kennzeichnen. Auch hier gilt: Je größer die Sicherheitszahl und damit das Maß der passiven Sicherheit, desto geringer ist das Verletzungsrisiko. Infolgedessen weist der Heckaufprall die größte Insassensicherheit auf, da zwischen den Insassen und dem Kollisionskontrahenten große Deformationswege zur Verfügung stehen, um einen allmählichen Geschwindigkeitsangleich zu erzielen. Erheblich niedriger ist die Sicherheit beim Überschlag, bei dem die angegurteten Insassen weitgehend geschützt sind, sofern die Fahrgastzelle in ihrer Form erhalten bleibt. Eine geringere Sicherheit bzw. ein höheres Risiko besteht für die Insassen frontal kollidierter Personenkarren. Bei seitlich beaufschlagten PKW liegt im Vergleich dazu das Verletzungsrisiko noch um ein beträchtliches Maß höher, da hier der Insasse ab einer bestimmten Unfallschwere innerhalb kürzester Zeit annähernd auf die Geschwindigkeit des stoßenden Kollisionskontrahenten gebracht wird. Bei der Interpretation der

gezeigten Sicherheitszahlen darf allerdings der Hinweis nicht fehlen, dass die bei den verschiedenen Aufprallarten z. T. erheblich differierenden Werte der Unfallschwere (z. B. Aufprallgeschwindigkeit) implizit enthalten sind. Einen Vergleich der Verteilungen der Aufprallarten, auf der Grundlage einmal der Unfallzahl und zum anderen der Verletzungsfolgekosten, zeigt Abb. 2.24. Der Frontalaufprall ist dabei mit deutlich mehr als der Hälfte sowohl in Bezug auf die Häufigkeit als auch in Bezug auf die Verletzungsfolgekosten vertreten.

## 2.4.6 Aufpralltyp

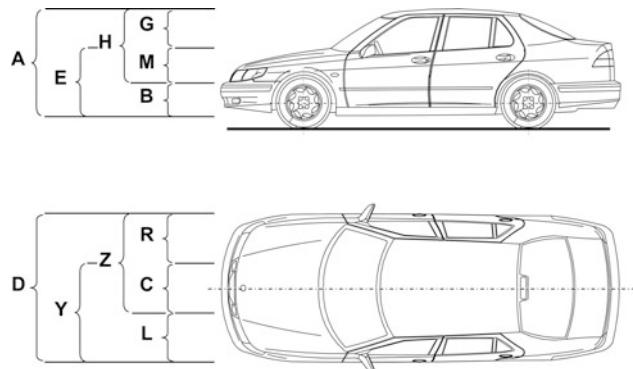
Für den Bewegungsablauf der am Unfall beteiligten Fahrzeuge, aber auch für die Kinematik und die Belastung der Insassen, ist es von ausschlaggebender Bedeutung, in welchem Bereich und in welchem Ausmaß die Front-Deformationsstruktur des Personenkarosserieswagens beim Aufprall beansprucht wird. Die Unterscheidung der Deformationsbereiche kann mit Hilfe des Aufpralltyps erreicht werden; mit ihm wird der Grad der Überdeckung und die Lage der Beschädigung gekennzeichnet. Durch diese Typisierung erfolgt also eine Klassifizierung der translatorischen und der rotatorischen Bewegungsanteile des Fahrzeugs während eines Aufpralls und der entsprechenden Insassenbewegung relativ zum Fahrzeug-Innenraum. Es ist leicht einzusehen, dass bei voller zentrischer Überdeckung der frontal aufprallende PKW die höchste translatorische Verzögerung bei vernachlässigbarer rotatorischer Bewegung erfährt. Die Verzögerung bei einem mittigen Pfahlaufprall liegt in der Regel niedriger als bei einem Aufprall mit voller Überdeckung. Bei einer außermittigen Teilüberdeckung weist die translatorische Verzögerung ebenfalls niedrigere Werte auf, zusätzlich steigt allerdings die rotatorische Komponente, und zwar mit zunehmender Exzentrizität.

Im Datenmaterial der Unfallforschung MHH wird zur Unterscheidung der Aufpralltypen der Fahrzeug-Deformationsindex (VDI: Vehicle Deformation Index nach Collision Deformation Classification [22]) verwendet, der sowohl für das Kollisionsobjekt als auch für den Kollisionskontrahenten angegeben ist; im Falle von Alleinunfällen ist die Hindernisbeschreibung ausreichend. Ausgehend von 795 frontal kollidierten PKW ergeben sich durch Ausschluss nicht ausreichend genau beschriebener Situationen 716 zur Aufpralltypisierung verwendbare Fahrzeuge. Die Beschädigungen dieser PKW lassen sich anhand der Deformationsindizes in horizontale ( $x/y$ -Ebene) und vertikale ( $x/z$ -Ebene) Aufpralltypen unterteilen; diese sind in Abb. 2.25 dargestellt.

Die weitaus meisten Fälle hinsichtlich ihrer Häufigkeit können dem Aufpralltyp A (43 %), bei dem sich die Deformation über den gesamten vertikalen Frontbereich erstreckt, zugeordnet werden. Die Aufpralltypen E, B und M, die den Fahrzeugvorbau umfassen (vgl. Abb. 2.25), sind in ihrer Häufigkeit mit ungefähr 50 % vertreten.

Die Verteilung der Aufpralltypen in der horizontalen Fahrzeugebene geht aus Tab. 2.3 hervor, wobei nur geringfügige Verschiebungen zwischen den prozentualen Anteilen der Häufigkeit und den Verletzungsfolgekosten auftreten.

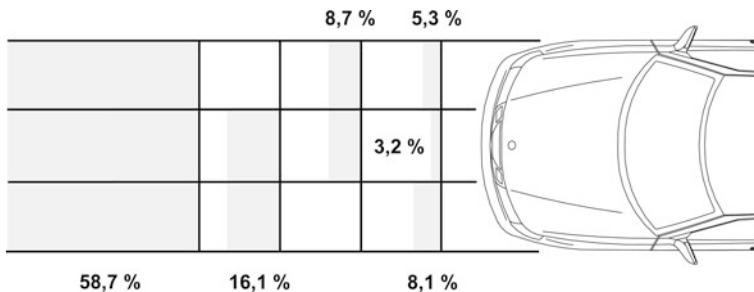
**Abb. 2.25** Aufpralltypen bei frontal kollidierten PKW (nach SAE J224)



**Tab. 2.3** Häufigkeitsverteilung und Verletzungsfolgekosten der Aufpralltypen (PKW-Front) in horizontaler Ebene (Quelle: Datenmaterial der Unfallforschung MHH)

Aufpralltyp (horizontale Ebene)	Häufigkeit		Verletzungsfolgekosten	
	[ - ]	[ % ]	[Mio. €]	[ % ]
D	420	58,66	51.703	69,13
Y	115	16,06	10.512	14,06
Z	62	8,66	3.518	4,70
L	58	8,10	4.872	6,51
G	23	3,21	1.822	2,44
R	38	5,31	2.359	3,15
Summe	716	100,00	74.786	100,00

Für die asymmetrisch auftretenden Kollisionen lässt sich ein starkes Übergewicht des linksseitigen Aufpralls (Y: 2/3- bzw. L: 1/3-Überdeckung) gegenüber dem rechtsseitigen (Z: 2/3- bzw. R: 1/3-Überdeckung) feststellen, wobei die linksseitigen Aufpralltypen ungefähr doppelt so hohe Anteile aufweisen wie die rechtsseitigen (Abb. 2.26).



**Abb. 2.26** Häufigkeitsverteilung der Aufpralltypen (PKW-Front)

Mit Hilfe der bisher gezeigten Strukturierungselemente wurden die Unfälle nach äußeren Kriterien klassifiziert und gegeneinander abgegrenzt. Zur Beurteilung der Verletzungssituation der Insassen erscheint es jedoch vorteilhaft, Strukturierungskriterien auch im Fahrzeuginnenraum anzulegen. Damit wird eine Zusammenfassung gleichartiger Verletzungsmechanismen (Kinematik, Kontakt und Verletzungsentstehung) ermöglicht, die eine größtmögliche Einschränkung der Streuung auf insassenspezifische Unterscheidungsmerkmale (Alter, Geschlecht, Konstitution) zulässt. Die Strukturierung hat allerdings mit zunehmender Tiefe zur Folge, dass mit der Teilung des Unfallmaterials die Anzahl der Beobachtungen kleiner wird. Die Balance zwischen beiden Zielsetzungen, einerseits der Beschränkung auf gleichartige Verletzungsmechanismen zur Herabsetzung der Streuung und andererseits der Bereitstellung einer statistisch ausreichenden Anzahl von Verletzungen, erfordert eine ausgewogene Vorgehensweise bei der Anwendung der Auswahlkriterien.

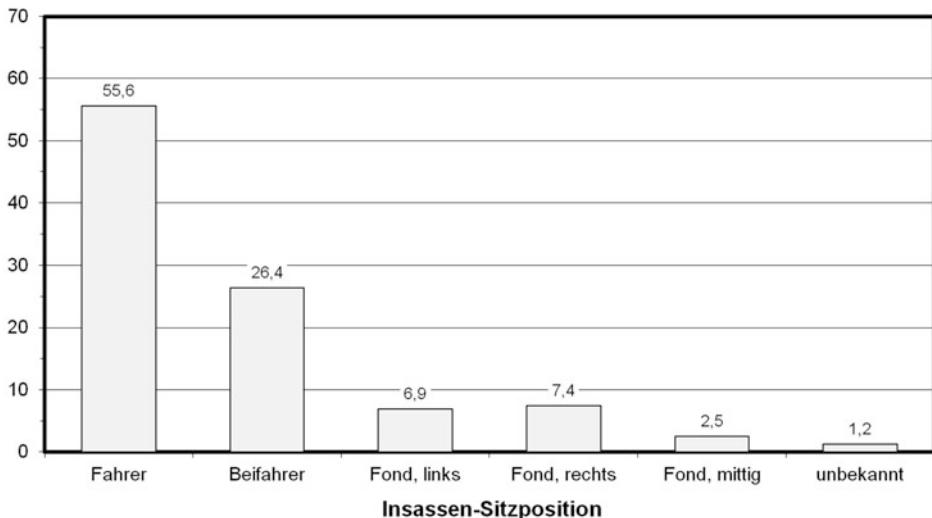
#### 2.4.7 Belastungsart und Belastungstyp

Die Belastungsart bezieht sich auf die während des Unfalls beanspruchten Körperregionen. Bei den hier untersuchten 1.288 PKW-Insassen wurden insgesamt 6.091 unterschiedlich schwere Einzelverletzungen festgestellt, die mit einem Anteil von 33 % dem Kopf, mit

**Abb. 2.27** Belastungsart: Verteilung der Verletzungen von Insassen in frontal kollidierten PKW



Körperteil	Häufigkeit [-]	Häufigkeit [%]
Kopf	2.033	33,4
Hals	132	2,2
Thorax	875	14,4
Arme	825	13,5
Abdomen	199	3,3
Becken	243	4,0
Beine	1.777	29,1
Unbekannt	7	0,1
	6.091	100,0

**Häufigkeit [%]****Abb. 2.28** Belastungstyp: Verteilung der Sitzpositionen in frontal kollidierten PKW

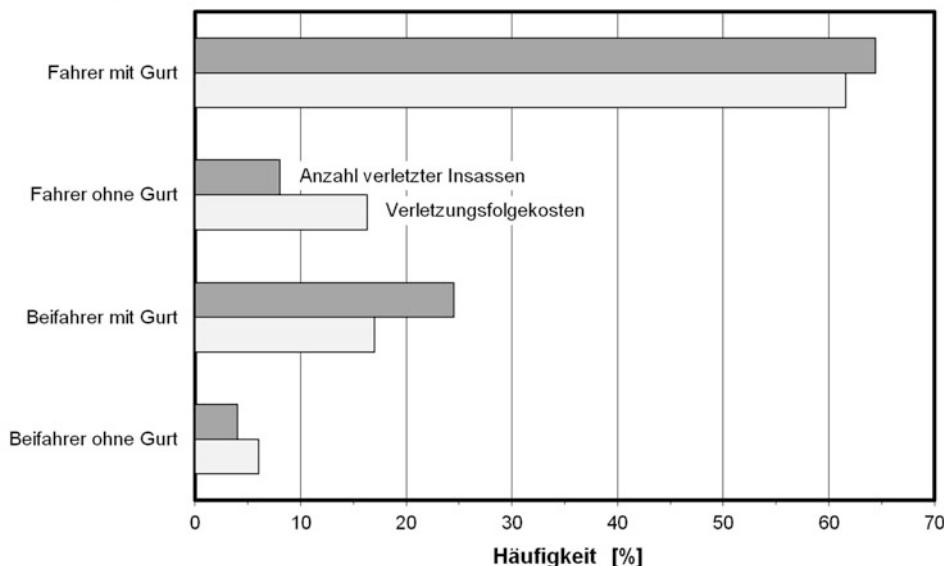
29 % den Beinen und mit jeweils ungefähr 14 % dem Thorax und den Armen zugeordnet werden können (Abb. 2.27). Da jedoch höchst unterschiedliche Verletzungen bei Fahrern und Beifahrern sowie bei Insassen mit und ohne Insassenschutz-Systemen (Gurt, Airbag) festgestellt wurden, wird zur Charakterisierung der Insassenkinematik und der daraus resultierenden Verletzungsentstehung zusätzlich zur Belastungsart noch der Belastungstyp eingeführt.

Mit Hilfe des Belastungstyps wird im eigentlichen Sinn die Frage nach der Art des Insassenschutzes beantwortet. Damit hängen die Belastungsrichtung, die Sitzposition und die Benutzung von Insassenschutz-Systemen zusammen; im Grunde genommen erfolgt durch die Bereitstellung von Belastungstypen eine Klassifizierung der Insassen-Rückhaltung. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal innerhalb der Belastungstypen ist die Sitzposition, da hiervon der zur Verfügung stehende Vorverlagerungsweg und im Falle eines Anpralls die beaufschlagte Kontaktstruktur (Lenkrad, Armaturenbrett, Airbag u. a.) sowie deren Deformationseigenschaft abhängt.

Ausgehend von 716 PKW-Frontalkollisionen verteilen sich insgesamt 1.288 Insassen auf Fahrer (56 %), Beifahrer (26 %) und Fondinsassen (18 %). Die Häufigkeitsverteilung für Sitzpositionen der Insassen ist in Abb. 2.28 dargestellt.

Schließlich kann mit Hilfe des Belastungstyps die Gurtenutzung der Front-Insassen unterschieden werden, wobei die mit „unbekannt“ gekennzeichneten Fälle vernachlässigt wurden. Für die so verbleibenden 1.022 Front-Insassen wurde unterstellt, dass das Gurtsystem von Fahrern in 89 % und von Beifahrern in 88 % benutzt wurde. Dabei wurde die Gurtenlegequote des vorgelegenen älteren Unfall-Datenmaterials auf neuere Zahlen

### Belastungstyp



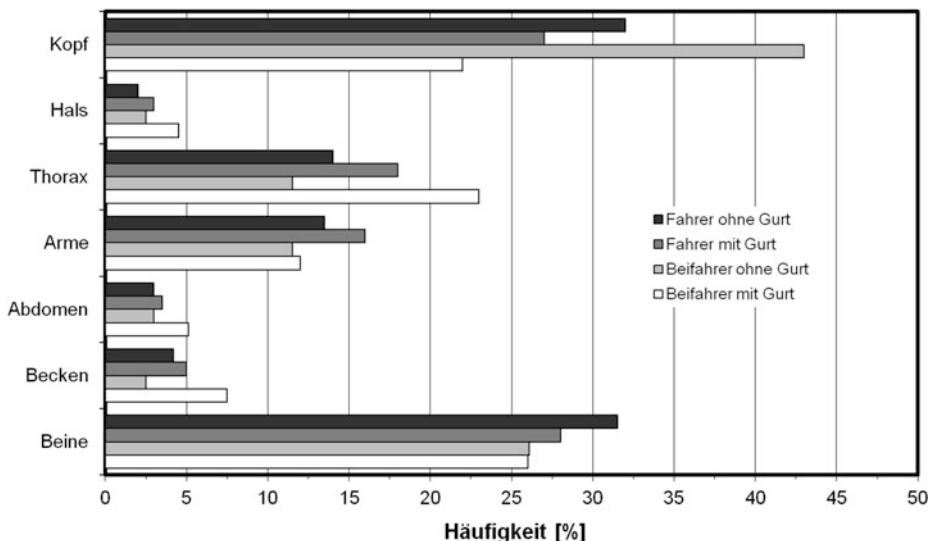
**Abb. 2.29** Belastungstyp: Prozentuale Verteilung der Gurtbenutzung von verletzten Insassen frontal kollidierter PKW im Vergleich mit Verletzungskosten

aus dem Jahr 2003 hochgerechnet [17]. Anhand der ermittelten Verletzungskosten kann, unter der Annahme einer gleichen Unfallschwere-Verteilung, eine deutliche Herabsetzung der Kosten aufgrund der Gurtbenutzung konstatiert werden (vgl. Abb. 2.29): Während die nicht angegurteten Front-Insassen im Mittel mit ca. 6 % beteiligt sind und einen Verletzungskosten-Anteil von 11 % aufweisen, reduziert sich der Anteil der Verletzungskosten bei den angegurteten Insassen mit einer Häufigkeit von 45 % auf 39 %; die Reduzierung des Kostenanteils kann als Gurtnutzen gedeutet werden.

Nachdem nun Belastungsart (Körperregionen) und Belastungstyp (Sitzposition und Insassenschutz-System) eingeführt sind, lässt sich die auf Front-Insassen bezogene Belastungsart in sinnvoller Weise um den Belastungstyp erweitern. In Ergänzung zur Häufigkeitsverteilung der Verletzungen einzelner Körperregionen für alle Insassen (vgl. Abb. 2.27) ist in Abb. 2.30 die Verteilung der Einzelverletzungen in Abhängigkeit vom Belastungstyp dargestellt; dabei erfolgte aus Gründen der Übersichtlichkeit eine Begrenzung auf Fahrer und Beifahrer ohne und mit Gurtbenutzung.

Der Vergleich der Verletzungshäufigkeit ohne/mit Gurtbenutzung zeigt eine Reduzierung der Kopf- und Beinverletzungen sowohl für Fahrer als auch für Beifahrer, wobei die Kopfverletzungen der Beifahrer aufgrund der Gurtbenutzung erheblich stärker zurückgehen als die der Fahrer. Dieser Umstand ist zurückzuführen auf den größeren Vorverlagerungsweg beifahrerseitig. Der Anteil der Thorax- und der Abdomen/Becken-Verletzungen nimmt aufgrund der Gurtkräfte z. T. erheblich zu, allerdings sind die Verletzungen weniger

### Belastungsart



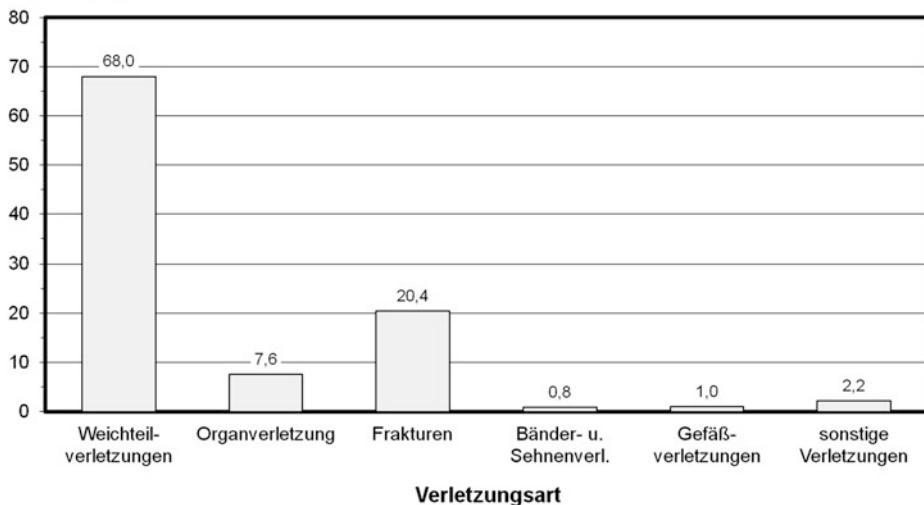
**Abb. 2.30** Belastungsart und -typ: Prozentuale Verteilung der körperteilspezifischen Verletzungen von Insassen in frontal kollidierten PKW unter Berücksichtigung der Gurtnutzung

schwerwiegend. Die Erhöhung der Halsverletzungen dürfte aus der Rückhaltewirkung der Brust herrühren, während der Kopf lediglich über den Hals zurückgehalten wird. Darüber hinaus zeigt sich auffallend der relativ hohe Anteil der Verletzungen der unteren Extremitäten bei angegurteten Insassen gegenüber beispielsweise den reduzierten Kopfverletzungen. Durch den Airbag-Einsatz nimmt die Bedeutung der Fuß- und Beinverletzungen bezüglich der Häufigkeit, nicht aber der Verletzungsschwere noch weiter zu.

### 2.4.8 Verletzungsart und Verletzungstyp

Mit der Verletzungsart werden Weichteil-, Organ-, Gefäß-, Bänder- und Sehnen-Verletzungen sowie Frakturen unterschieden. Der Verletzungstyp hingegen kennzeichnet die Beanspruchung unter mechanischen Gesichtspunkten. Im Datenmaterial der Unfallforschung MHH ist der Verletzungstyp allerdings nur in wenigen Fällen angegeben und verschließt sich somit einer exakten statistischen Auswertung, sodass er anhand der Verletzungsbeschreibung am Körperteil und der zugehörigen Verletzungsschwere lediglich abgeschätzt werden konnte.

Zur zahlenmäßigen Darstellung ist die Häufigkeitsverteilung der Verletzungsart auf der Basis von 1.022 Front-Insassen in Abb. 2.31 gezeigt. Die häufigste Verletzungsart wird erwartungsgemäß durch Weichteilverletzungen mit einem Anteil von 68 % gebildet, wobei

**Häufigkeit [%]**

**Abb. 2.31** Verletzungsart: Prozentuale Verteilung der Verletzungen von Insassen in frontal kollidierten PKW

die Verletzungsschwere und deren Folgekosten niedriger sind im Vergleich zu Frakturen, Organ- und Gefäßverletzungen, die mit einer Häufigkeit von 20 bzw. 9 % auftreten.

Mit dem Verletzungstyp werden vier grundsätzlich verschiedene verletzungsverursachende Mechanismen eingeführt, und zwar Verletzungen aufgrund

- direkter Krafteinwirkung,
- indirekter Krafteinwirkung,
- von Trägheitskräften und
- von Hyperextension und -flexionen (Überstreckung, Überbeugung).

Eine direkte Krafteinwirkung liegt in all jenen Fällen vor, in denen Verletzungen durch einen direkten Kontakt zwischen Körperteil und Insassenschutzsystem (Fahrzeug-Innenraum, Sitz, Gurtsystem, Airbag) hervorgerufen werden; dies können oberflächliche Weichteilverletzungen ebenso sein wie Frakturen am Kopf, am Thorax, am Becken und an den Extremitäten oder auch Organverletzungen im Abdominalbereich. Um Verletzungen durch indirekte Krafteinwirkung handelt es sich im Gegensatz dazu, wenn sie nicht am beanspruchten (äußeren) Körperteil, aber aufgrund der dort eingeleiteten Kräfte entstanden sind. Zu einer derartigen Verletzung kann beispielsweise eine Lungenlazeration (Riss) als Folge einer Thorax-Instabilität gezählt werden. Bleibt hingegen der knöcherne Körperteil stabil, so können Verlagerungen von Organen aufgrund ihrer Massenträgheit auftreten und, bei ausreichend hoher Intensität, zu Verletzungen führen. Solche Verletzungen können beispielsweise Aortenrupturen, Herzbeutelkontusionen (ohne Thorax-Instabilität)

oder auch Hirnkontusionen durch Kontakt am Schädelknochen oder Contre-coup-Verletzungen an der gegenüberliegenden (stoßabgewandten) Gehirnseite sein. Schließlich lassen sich Verletzungen auf Hyperextensionen und Hyperflexionen der Gelenke oder der Wirbelsäule zurückführen. Dieser Verletzungstyp wird im Allgemeinen durch Bänder- oder Sehnenverletzungen bzw. in schweren Fällen durch Luxationen und Frakturen der Gelenke und Wirbel gekennzeichnet. Die vier hier beschriebenen Verletzungstypen lassen sich retrospektiv aufgrund des Verletzungsbildes nur schwer voneinander abgrenzen.

---

## Literatur

1. Statistisches Bundesamt Wiesbaden (Hrsg.): Todesursachen in Deutschland 2010. Fachserie 12, Reihe 4. Internet-Abruf am 11.9.2012 unter <http://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Gesundheit/Todesursachen/Todesursachenstatistik.html>.
2. Kramer, F.: Passive Sicherheit/Biomechanik I. Vorlesungsskript zur gleichnamigen Lehrveranstaltung an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden (2011).
3. Praxenthaler, H., Wagner, H.: Verkehrsmedizin in Gegenwart und Zukunft. In: Wagner, H. (Hrsg.) Verkehrsmedizin. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo (1984)
4. Schneider, W.: Verhalten des Menschen im Straßenverkehr als Risikofaktor und seine Beeinflussung. In: Wagner, H. (Hrsg.) Verkehrsmedizin. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo (1984)
5. Kramer, F., Deter, T.: Zur Quantifizierung der Straßenverkehrssicherheit. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Heft 1 (Januar 1992).
6. Statistisches Bundesamt Wiesbaden (Hrsg.): Verkehrsunfälle 2011. Fachserie 8, Reihe 7. Internet-Abruf am 10.7.2012 unter <http://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/VerkehrsunfaelleJ.html>.
7. Kramer, F.: Schutzkriterien für den Fahrzeug-Insassen im Falle sagittaler Belastung. Dissertation an der Technischen Universität Berlin. Fortschritt-Berichte, VDI-Reihe 12. Bd 137. (1989).
8. Compton, C.P.: The Use of Public Crash Data in Biomechanical Research. In: Nahum, A.M., Melvin, J.W. (Hrsg.) Accidental Injury – Biomechanics and Prevention. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York Tokyo (1993).
9. Fahrzeugsicherheit 90 – Analyse von PKW-Unfällen, Grundlage für künftige Forschungsarbeiten. Büro für Kfz-Technik des Verbandes der Haftpflichtversicherer, Unfallversicherer, Autoversicherer und Rechtsschutzversicherer e. V. (HUK-Verband). München (1994).
10. Georgi, A.: GIDAS – Unfallforschung vor Ort an der TU Dresden. Vortrag im Rahmen des Dresdener Sicherheitskolloquiums an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden (2004).
11. Appel, H.: Unfallaufklärung aus technischer Sicht. Beitrag in „Verkehrsmedizin“ von H.-J. Wagner (Hrsg.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo (1984).
12. Burg, H., Moser, A.: Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion – Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation, 2. Aufl. Vieweg + Teubner|GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden (2009).
13. Kramer, F.: Unfallrekonstruktion. Vorlesungsskript zur gleichnamigen Lehrveranstaltung an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden (2010/11).

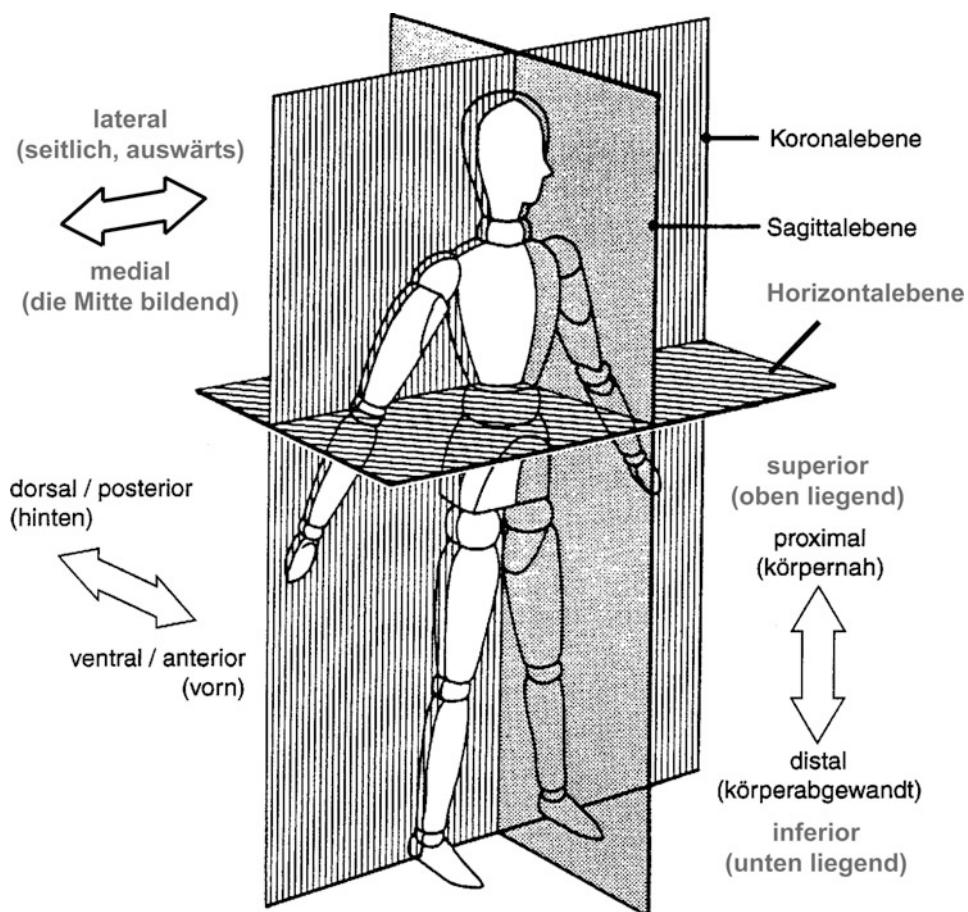
- 
14. Nagel, U.: Rechnergestützte Unfallrekonstruktion – Programmsystem auf der Basis der Stoß- und der Kraftrechnung. Diplomarbeit am Institut für Fahrzeugtechnik, Technische Universität Berlin (1991).
  15. Zeidler, F.: Die Analyse von Straßenverkehrsunfällen mit verletzten PKW-Insassen unter besonderer Berücksichtigung von versetzten Frontalkollisionen mit Abgleiten der Fahrzeuge. Dissertation am Institut für Fahrzeugtechnik, Technische Universität Berlin. Verlag Information Ambis GmbH, Kippenheim (1982).
  16. Richter, B., Appel, H., Hoefs, R., Langwieder, K.: Entwicklung von PKW im Hinblick auf einen volkswirtschaftlich optimalen Insassenschutz. Abschlußbericht des Forschungsprojekts TV 8036 des Bundesministers für Forschung und Technologie. (1984).
  17. Kramer, F., Kramer, M., Lüders, M., Herpich, T., Class, U.: Die Bedeutung von OoP-Situationen im Straßenverkehr hinsichtlich künftiger Auslegung von Insassenschutz-Systemen. VDI-Tagung „Innovativer Kfz-Insassen- und Partnerschutz“ in Berlin (2003).
  18. Appel, H., Kramer, F.: Biomechanik und Kraftfahrzeugsicherheit. Umdruck zur Vorlesung am Institut für Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität Berlin (1987).
  19. Kramer, F.: Analyse des Unfallgeschehens zur Ermittlung der Unfallkenngröße für Frontalkollisionen und der Verletzungsschwere sagittal belasteter PKW-Insassen. Forschungsbericht Nr. 325/88. Institut für Fahrzeugtechnik, Technische Universität Berlin (1988).
  20. Kramer, F.: Volkswirtschaftlicher Schaden aufgrund der Verletzungsfolgekosten. Nicht veröffentlichtes Arbeitspapier und Auswertungsprogramm AUSWERT (Version 3.8 – angewandt am 11.7.2012). Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden (Januar 2008).
  21. Danner, M., Appel, H., Schimkat, H.: Entwicklung kompatibler Fahrzeuge. Abschlußbericht des Forschungsprojekts TV 7661 des Bundesministers für Forschung und Technologie. (1980).
  22. Collision Deformation Index – SAE J 224 MAR80. Report of the Automotive Safety Committee, approved Jan. 1971, completely revised by the Motor Vehicle Safety System Testing Committee March 1980. SAE Handbook, Vol. 4, Warrendale, PA (USA) (1986).

Während sich die Biomechanik in der aktiven Fahrzeugsicherheit wie auch in der Arbeitswissenschaft auf ergometrische (zu verrichtende Arbeit) und dynamometrische (aufzubringende Betätigungskraft) Aspekte und ihre Einflussfaktoren konzentriert, behandelt die Biomechanik im Zusammenhang mit der passiven Sicherheit die mechanische Belastbarkeit des lebenden Körpers oder von Körperteilen mit dem Ziel, die Verletzungsmechanik bei Unfallopfern zu analysieren und objektive Kriterien zur Unterscheidung von reversiblen und irreversiblen Verletzungen bereitzustellen. Unter Biomechanik versteht man also die Beschäftigung mit dem mechanischen Verhalten des lebenden Körpers bzw. seiner Bestandteile, d. h. es werden hier statische und dynamische Zustände und Prozesse analytisch beschrieben [1].

Im Folgenden soll die Verletzungsmechanik von Organ- und Gewebeverletzungen sowie Frakturen aufgezeigt werden. Dazu wird auf die Anatomie des menschlichen Körpers und das Verhalten bei Belastungen eingegangen. Die Verletzungsmechanik ist relevant für das Verständnis der Verletzungsentstehung beim Unfall und die Vermeidung unfallspezifischer Verletzungen durch den Einsatz von Sicherheitsmaßnahmen. Das Verständnis um die Widerstandsfähigkeit des Gewebes ist relevant hinsichtlich der Behandlung und der Heilung von Verletzungen sowie der Wiederherstellung von Unfallopfern. Da sich die Entstehung und das Ausmaß der Verletzungen auf physikalische Belastungen zurückführen lassen, ist die Mechanik von Bedeutung, und die Antwort des Körpers auf die physikalische Belastung ist in der Biologie begründet. So ist die Ermittlung von Schutzkriterien, die eine Aussage über die Beanspruchung des Körpers oder von Körpereinzelteilen zulassen, im eigentlichen Sinn Mechanik. Die Auslegung von Fahrzeugen und deren Einrichtungen zur Sicherstellung nur einer zulässigen Beanspruchung bzw. zur Vermeidung einer unzulässig hohen Belastung ist die Aufgabe von Sicherheitsingenieuren, sodass sich die Biomechanik als ingenieurwissenschaftliche Verbindung zwischen Biologie und angewandter Mechanik versteht.

### 3.1 Anatomie des menschlichen Körpers und Verletzungsmechanismen

In der Anatomie bedient man sich nicht des kartesischen Koordinatensystems in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung, sondern es wurden anatomische Ebenen definiert [2], die in Abb. 3.1 dargestellt sind. Die Ebenen werden bezeichnet als Median- oder Sagittalebene, Koronalebene und Transversal- oder Horizontalebene. Bei den Richtungen wird nach [3] unterschieden in ventral (bauchwärts) oder anterior (vorn) bzw. dorsal (rückseitig) oder posterior (hinten), in lateral (seitlich, auswärts) bzw. medial (die Mitte bildend) und in superior (höher liegend) oder distal (weiter vom Rumpf entfernt gelegen) bzw. inferior (unten liegend) oder proximal (körpernah gelegen).



**Abb. 3.1** Anatomische Ebenen und Richtungen (aus [2])

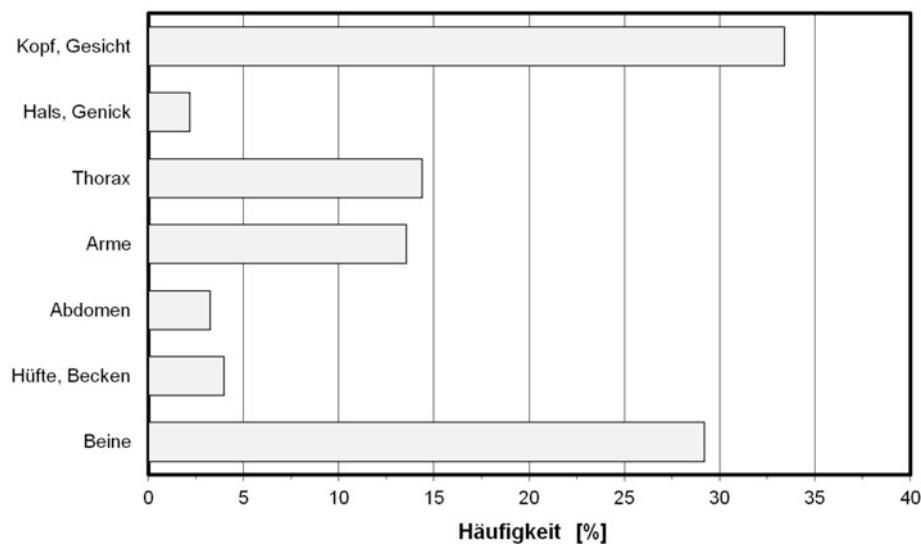
### 3.1.1 Der Kopf

Der Kopf ist bei Verkehrsunfällen das exponierteste und das am meisten gefährdete Körperteil. In Abb. 3.2 ist beispielhaft die Verteilung der Verletzungen von PKW-Insassen bei Frontalkollisionen gezeigt; auffallend ist der hohe Anteil von Kopf- und Gesichtsverletzungen gegenüber den Verletzungen anderer Körperregionen. Die hohe Gefährdung des Kopfes und die damit einhergehende Notwendigkeit für einen wirksamen Schutz vor Verletzungen resultiert aus dem Umstand, dass die Verletzung der Gehirnstruktur derzeit irreversibel, d. h. nicht ausheilbar ist.

Bei der Anatomie des Kopfes unterscheidet man die äußeren Organe, die Weich- und Gewebeteile, den knöchernen Schädel und das Gehirn, das im Schädel eingebettet liegt und mit dem Mittelhirn den Übergang zum Rückenmark bildet.

Die **Kopfhaut** ist 5 bis 7 mm dick und enthält drei Gewebelagen: Die haaraufnehmende Haut bestehend aus der Oberhaut (gefäßlose äußere Haut) und der Lederhaut, die die Haartaschen aufnimmt und mit einem glatten Muskelgewebe (Gänsehaut, richtet feinere Haare auf) ausgestattet ist. Darunter liegt das Unterhautzellgewebe, in dem Fettzellhaufen, Blutgefäße und Nerven eingelagert sind. Und schließlich gibt es als dritte Lage das Muskelgewebe. Unterhalb dieser dreilagigen Kopfhaut liegt ein loses Zellgewebe auf einer faserigen Haut, die die Knochenstruktur umschließt (Knochenhaut). Die Dicke, die Festigkeit und die Beweglichkeit dieser äußeren drei Kopfhaut-Lagen können ebenso wie die abgerundete Schädelkontur in ihrem Zusammenwirken als Schutzmechanismen aufgefasst werden.

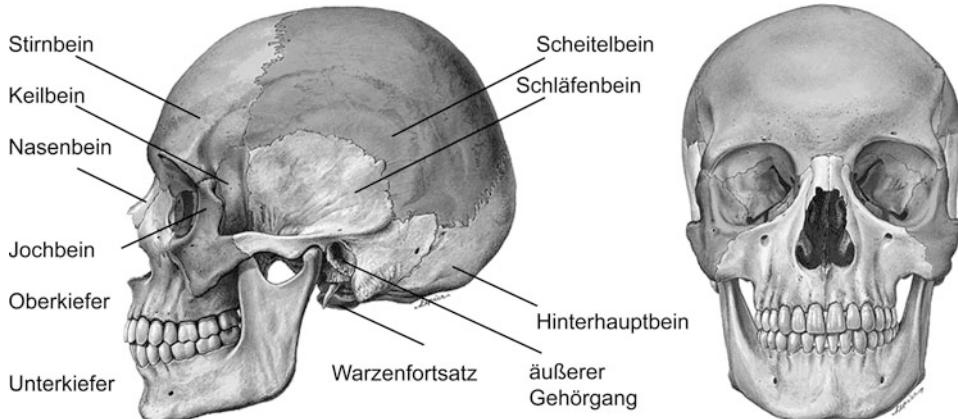
#### Körperregion



**Abb. 3.2** Körperteil-spezifische Verletzungen von PKW-Insassen bei Frontkollision

werden. Greift an der Kopfhaut eine Zugkraft an, so bewegen sich die drei Hautlagen gemeinsam wie ein Gewebe.

Der **Schädel** ist das komplexeste Gebilde des menschlichen Skeletts. Seine knöcherne Struktur ist übersichtlich geformt und enthält das Gehirn, die Augen, die Ohren, die Nase und die Zähne. Die Dicke des Schädels variiert zwischen 4 und 7 mm und bietet so eine geeignete Aufnahme und ausreichend Schutz für die Organe. Der Schädel setzt sich aus 8 Knochenschalen zusammen, die zusammen 14 Knochen bilden den Gesichtsschädel, und die Zähne variieren bekanntermaßen bis zu einer Anzahl von 32. Neben dem Gesichtsschädel (Augen-, Nasen- und Mundhöhle) wird das Schädeldach geformt durch Siebbein, Stirnbein, Scheitelbein, Hinterhauptbein sowie das paarweise auftretende Schläfenbein und das Keilbein (Abb. 3.3). Das Innere des Schädeldaches ist konkav (gewölbt) und weist eine relativ glatte Oberfläche auf. Die Schädelbasis ist eine unregelmäßige Knochenplatte mit Vertiefungen und Erhöhungen sowie kleinen Löchern (Foramen) für Blutgefäße und Nerven und dem großen Hinterhauptloch (Foramen magnum) als Durchtritt des verlängerten Rückenmarks.



**Abb. 3.3** Anatomisches Orientierungsbild des Schädel (nach [4])

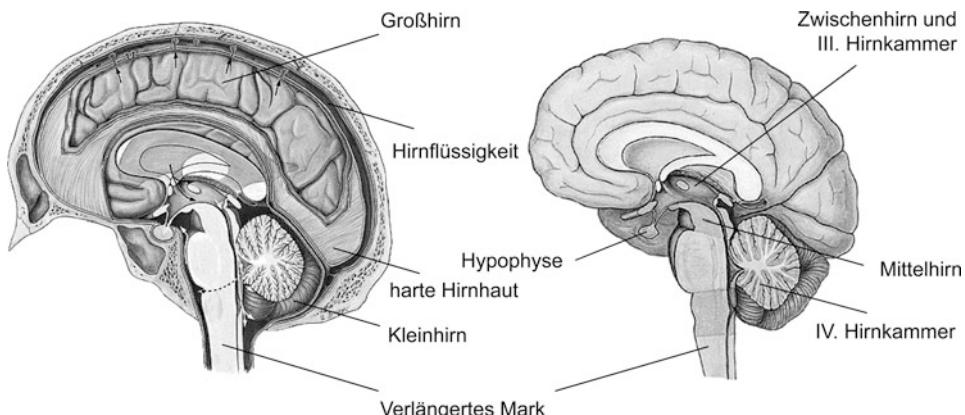
Drei Schutzhüllen, bekannt als **Hirn- und Rückenmarkhaut**, umgeben und schützen somit das Gehirn und das Rückenmark. Die Funktion dieser Häute besteht darin, Hirn und Rückenmark gegenüber den sie umgebenden Knochen zu isolieren. Die Häute bestehen zunächst aus Bindegewebe und sind gleichzeitig ausgeformt als Teil der Blutgefäß-Wände und als Nervenhüllen sofern diese eine Verbindung eingehen zwischen Gehirn und Schädel. Man unterscheidet drei Hautlagen: die harte Hirnhaut (Dura mater), die Spinnwebenhaut (Arachnoidea) und die weiche Hirnhaut (Pia mater).

Die harte Hirnhaut ist ein widerstandsfähiges Bindegewebe, die das Rückenmark umgibt und im Schädel aus zwei Lagen besteht. Die äußere Schädel- oder Knochenhaut füttert die innenliegende Knochenfläche aus; die innere Hirnhaut umfasst das Gehirn. Im Hirnbereich sind die beiden Hautlagen zu einer Lage verwachsen, außer an den Stellen, wo sie sich

trennen, um venösen Gefäßen Platz zu geben, die das Gehirn mit Blut versorgen. Falten der Hirnhaut-Lagen bilden die Großhirnsichel, die tief in die längsverlaufende Furche zwischen der rechten und der linken Gehirn-Hemisphäre hineinragt. Schließlich unterstützt das Kleinhirnzelt wie ein Absatz die hintenliegende Gehirn-Hemisphäre.

Die Spinnwebenhaut ist eine bindegewebige Membran, die über die Furchen und Windungen des Gehirns und Rückenmarks gelegt ist. Die Außenfläche der Spinnwebenhaut liegt an der harten Hirnhaut, der Dura mater, an und begrenzt von innen her den kapillären Subdural-Raum; die Innenfläche ist mit der weichen Hirnhaut, der Pia mater, durch ein bindegewebiges Bälkchenwerk verbunden.

Die weiche Hirnhaut selbst ist eine dünne Membran aus feinem Bindegewebe, das mit zahlreichen kleinen Blutgefäßen ausgestattet ist. Sie liegt dicht an der Hirn- bzw. der Rückenmarkoberfläche an. Der Raum zwischen der Spinnwebenhaut und der weichen Hirnhaut sowie die Hirnkammern (Ventriculus) sind mit einer farblosen Flüssigkeit (Liquor) angefüllt, die das Gehirn mit Nährstoffen versorgt und äußere Erschütterungen dämpft [5].



**Abb. 3.4** Längsschnitt durch die Mitte des Schädels und des Gehirns (nach [4])

Das **Gehirn** wird strukturell und funktionell unterteilt in fünf Teile (vgl. Abb. 3.4): Großhirn (Cerebrum), Kleinhirn (Cerebellum), Mittelhirn (Mesencephalon), Zwischenhirn (Diencephalon) und verlängertes Mark (Medulla oblongata). Zusätzlich weist es vier Hirnkammern, drei Membranen (Hirnhäute), zwei Drüsen (Hypophyse und Zirbeldrüse), zwölf paarweise auftretende Schädelnerven und die Schädelarterien und -venen auf. Seine durchschnittliche Länge beträgt ca. 165 mm und seine größte Breite ca. 140 mm; abhängig von der Körpergröße beträgt sein Gewicht bei Männern ca. 1,36 kg und bei Frauen nur geringfügig weniger. Das Großhirn umfasst ungefähr 7/8 des Gewichts und ist in eine rechte und eine linke Hemisphäre unterteilt [5].

Eine detaillierte Analyse von **Kopfverletzungen** ist schwierig, da zwar die Verletzungsarten (Verletzungen und Frakturen) weitgehend bekannt, ihre Entstehung jedoch, insbesondere der Bezug zum Verletzungstyp (mechanische Beanspruchung), weiterhin umstrit-

ten und diskussionswürdig ist. Die Gründe hierfür liegen zum einen an der bisher fehlenden eindeutigen Zuordnung zwischen Verletzungstyp und -art (ausreichend komplexe mathematische Simulationsmodelle sind nur schwer zu verifizieren) und zum anderen an der Problematik von Leichen- oder Tierversuchen, den Alterseinfluss und die Übertragbarkeit auf den Menschen ausreichend zuverlässig einbeziehen zu können. Bei den Kopfverletzungen unterscheidet man [6]

- Quetschungen, Prellungen sowie Riss- und Schnittwunden
- Brüche des Gesichtsschädelns und Schädelfrakturen, die in starkem Maße durch das Innenalter beeinflusst werden, und
- Gehirnverletzungen, bei denen im Wesentlichen die mechanische Beanspruchung die Verletzungsschwere dominiert.

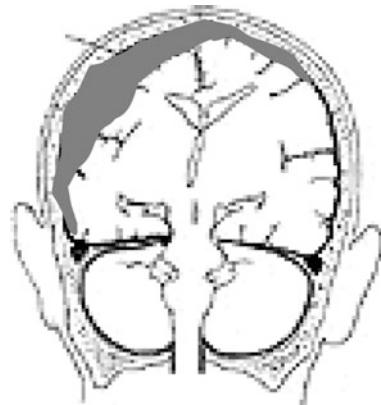
Unter **Schädelfrakturen** sind Brüche des knöchernen Schädels zu verstehen, die bei nicht stattfindendem Anprall auf „harte“ Strukturen (des Fahrzeug-Innenraums, aber auch der Fahrzeug-Außenhaut) ausgeschlossen werden können. Die Frakturen lassen sich unterscheiden in Berstungs- und Biegebrüche. Berstungsbrüche treten bei eingeleiteten Schwingungen mit ca. 360 Hz und großen Amplituden auf und versetzen den Schädel in gegenseitige Schwingungen (Antiresonanz). Biegungsbrüche sind die Folge von Belastungen mit einem höheren Frequenzanteil von etwa 950 Hz; hier liegt die Resonanzfrequenz des knöchernen Schädels [7, 8, 9]. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Schädelfrakturen und Gehirnverletzungen existiert nicht, dennoch zeigen verschiedene Untersuchungen, dass das Auftreten gefährlicher Komplikationen nach anfänglich leichten Gehirnverletzungen häufig in Verbindung mit Schädelfrakturen zu sehen ist [10]. Doch wurden andererseits in [11] Verletzte mit schweren Gehirnblutungen untersucht, bei denen zur Hälfte Schädelfrakturen diagnostiziert wurden, während bei den anderen Patienten keine Frakturen festgestellt werden konnten. Der Grund für diese Unsicherheiten ist darin zu sehen, dass Schädelbasisfrakturen klinisch, auch mit Hilfe von Röntgenaufnahmen, nur sehr schwer zu erkennen sind.

**Gehirnverletzungen** werden klinisch in zwei große Kategorien unterteilt, und zwar in diffuse und örtliche Verletzungen. Die diffusen Verletzungen, die bei Fahrzeug- und Fußgängerunfällen in rund drei von vier Fällen anzutreffen sind [12], umfassen Hirn-Schwellungen, Gehirnerschütterungen (Concussio) und großflächige Verletzungen. Örtliche Verletzungen sind solche wie traumatisch bedingte Blutungen zwischen Dura und Schädelknochen (epidurale Hämatome, Abb. 3.5), Blutungen zwischen Dura und Arachnoidea (subdurale Hämatome, Abb. 3.6) meist durch Abriss der Brückenvenen, bei Schädelfrakturen auftretende große Blutergüsse innerhalb des Gehirns (intrazerebrale Hämatome, Abb. 3.7) und Kontusionen, das sind Prellungen und Quetschungen des Gehirns, die im Augenblick der Einwirkung eines stumpfen Traumas durch Anprall von anliegenden Rindenbezirken an den Schädelknochen entstehen. Die Kontusionen (Abb. 3.8) finden sich sowohl an der stoßzugewandten (Coup-Wirkung) als auch an der stoßabgewandten Gehirnseite (Contre-coup-Wirkung) und sind oftmals begleitet von Kommotionsyndromen

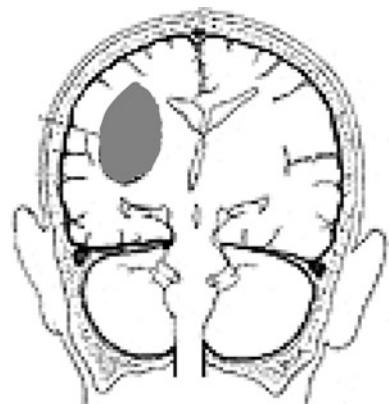
**Abb. 3.5** Epidurales Hämatom: Bluterguss zwischen Schäeldach und harter Hirnhaut (aus [13])

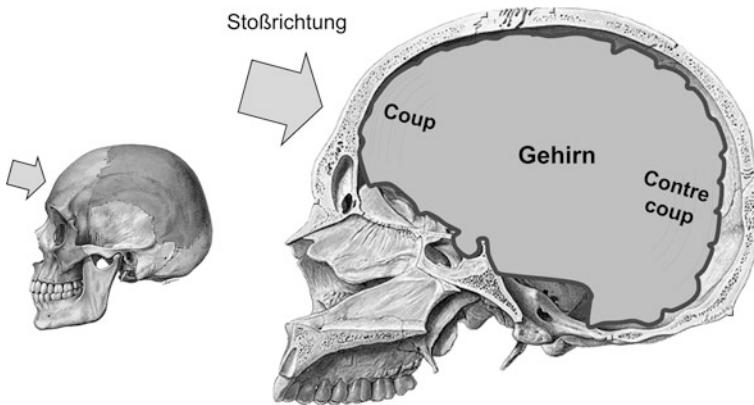


**Abb. 3.6** Subdurales Hämatom: Bluterguss unterhalb der Hirnhaut (aus [13])



**Abb. 3.7** Intracerebrales Hämatom: Bluterguss innerhalb der Gehirnsubstanz (aus [13])





**Abb. 3.8** Erscheinungsform von Gehirn-Kontusionen (Coup- und Contre-coup-Verletzungen), nach [4]

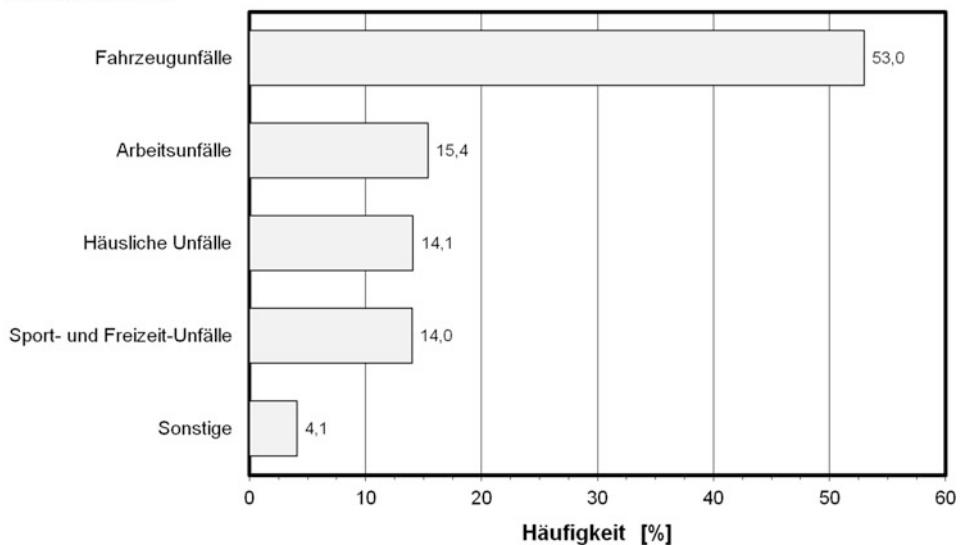
(Commotio cerebri: Gehirnerschütterung), also traumatisch bedingten reversiblen Schädigungen des Gehirns ohne anatomisch fassbares Substrat [3]. Subdurale Hämatome und großflächige Verletzungen sind die bedeutsamsten Verletzungen bei unfallbedingten Todesfällen [12].

### 3.1.2 Die Wirbelsäule

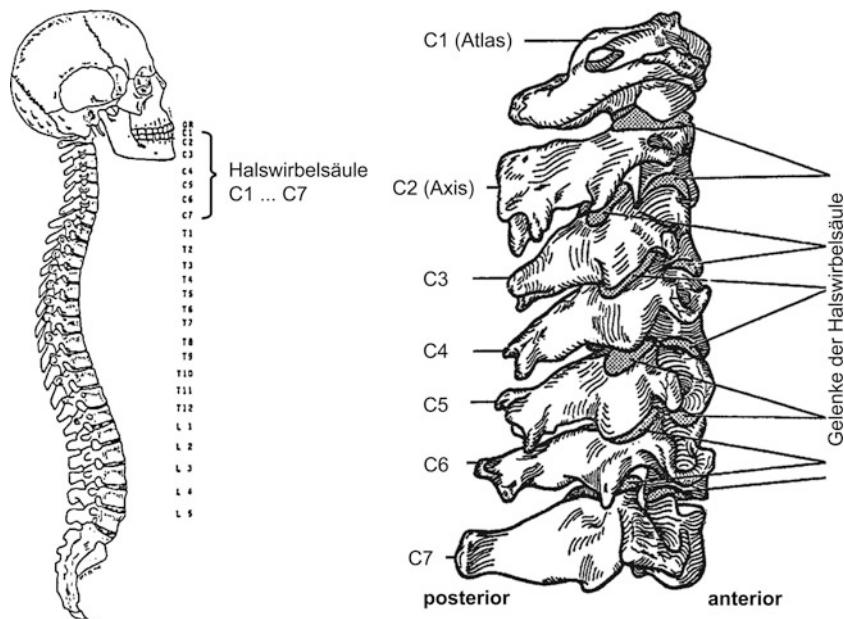
Im vorliegenden Abschnitt soll lediglich die Region der **Halswirbelsäule (HWS)** betrachtet werden, da sie vom mechanischen und strukturellen Aspekt einen höchst komplexen Mechanismus aufweist [14, 15] und zudem nach [16] im Verkehrsunfallgeschehen im Vergleich zu anderen Unfallursachen dominant ist (Abb. 3.9). Die Halswirbelsäule selbst ist der obere Teil der menschlichen Wirbelsäule (Columna vertebralis), die man nach [3] unterscheidet in folgende Regionen (Abb. 3.10):

- Halswirbel (Vertebrae cervicales) mit der Bezeichnung C1 bis C7 bilden die Halswirbelsäule, davon wird der erste Halswirbel C1 als Atlas, der zweite C2 als Axis und der siebte C7 wegen seines tast- und sichtbar vorragenden Dornfortsatzes als Vertebra prominens bezeichnet,
- 12 Brustwirbel (Vertebrae thoracicae) mit der Bezeichnung T1 bis T12 bilden die Brustwirbelsäule,
- 5 Lendenwirbel (Vertebrae lumbales) mit der Bezeichnung L1 bis L5 bilden die Lendenwirbelsäule,
- 5 zum Kreuzbein verschmolzene Kreuzbeinwirbel (vertebrae sacrales) und
- 4 bis 5 rudimentäre und oft verschmolzene Steißwirbel (Vertebrae coccygeae).

### Unfallsituationen

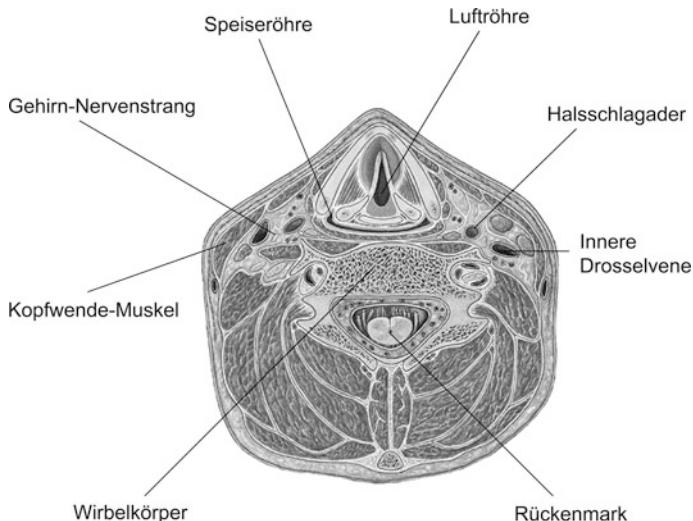


**Abb. 3.9** Halswirbelsäulen-Verletzungen bei unterschiedlichen Unfallsituationen (aus [16])



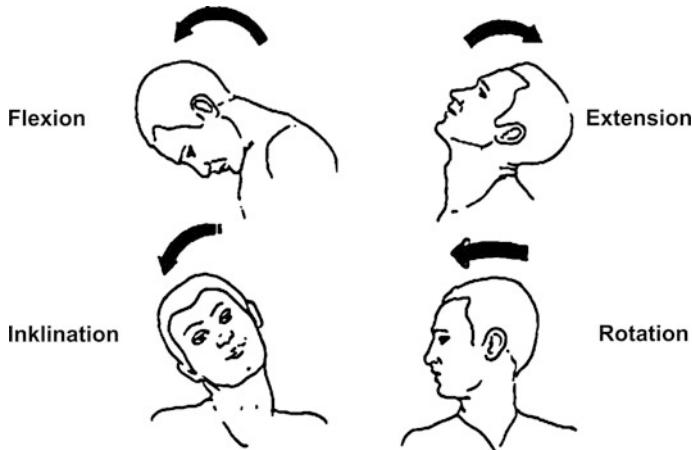
**Abb. 3.10** Seitenansicht der gesamten Wirbelsäule und der Halswirbelsäule

Die **Region der Halswirbelsäule** reicht von der (gedachten) Verbindungslinie zwischen Schädelbasis und Unterkiefer bis in Höhe der ersten Rippe bzw. dem Schlüsselbein und weist zwei Basisfunktionen auf: Sie trägt und unterstützt den Kopf und ermöglicht seine Bewegungsfähigkeit, und sie dient zum anderen als Leitungskanal, um Strukturen des Kopfes und des Gesichts mit denen des Brustkorbs und des Beckens zu verbinden. Im vorderen Bereich des Halses sind die Versorgungsorgane angeordnet. Dies sind einerseits die kleineren Muskeln des Vorderhalses, die Speiseröhre als Verbindung zum Magen, der Kehlkopf und die obere Luftröhre, die zu den Lungen führt, die Schilddrüse sowie Arterien und Venen zur Blutversorgung des Kopfes, des Gehirns und des Gesichts. Daneben verlaufen wichtige Nervenstränge vom Gehirn und vom Rückenmark der Halswirbelsäule vertikal durch diese Region. Im rückwärtigen Teil des Halses befindet sich der Zentralbereich der Halswirbel, deren seitliche und hintere Flächen von den Hals-Hauptmusken umgeben sind (Abb. 3.11). Zusätzlich verlaufen die Nervenstränge, die vom Rückenmark der Halswirbelsäule ausgehen, in und zwischen den Lateral-Muskeln in den rückwärtigen Bereich des Halses.



**Abb. 3.11** Horizontalschnitt durch den Hals in Höhe des Kehlkopfes (nach [4])

Die **Beweglichkeit der Halswirbelsäule** wird begrenzt durch die gelenkige Verbindung, die normale Streckung der Bänder, die die Wirbel umgeben, und durch die Muskeln, die am Schädel und an den Halswirbeln angebunden sind. Das Kopfnicken ist eine Bewegung zwischen Schädel und dem ersten Wirbel C1 (Atlas), alle anderen Bewegungen des Kopfes und des Halses, wie die Vorwärtsbeugung (Flexion), das rückwärtige Strecken (Extension), das Neigen (Inklination) und das Drehen (Rotation) des Kopfes zu einer Seite, erfolgt im allgemeinen zwischen jedem der Halswirbel (Abb. 3.12). Die einzige mögliche Bewegung allerdings, die zwischen den Wirbel C1 (Atlas) und C2 (Axis) stattfinden kann, ist das Schütteln



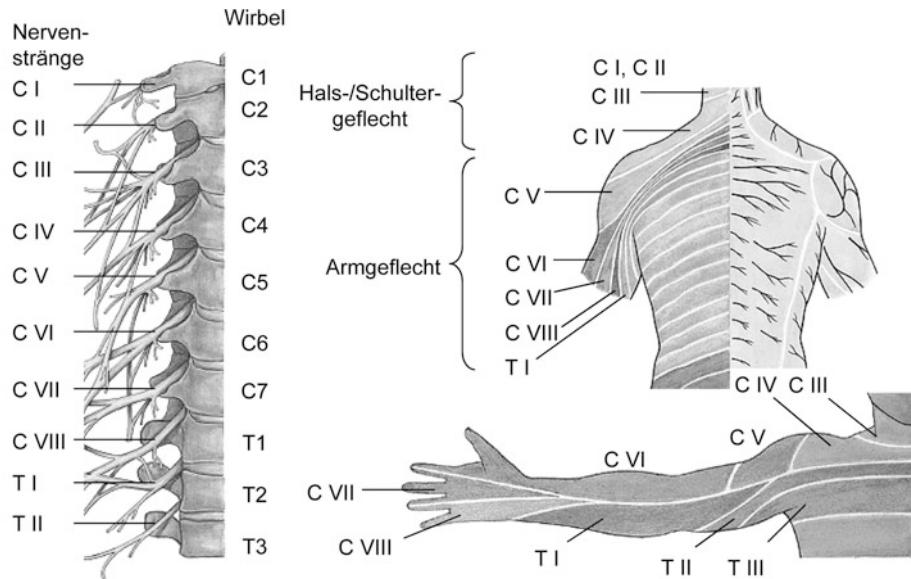
**Abb. 3.12** Die vier allgemeinen Bewegungen des Kopfes und der Halswirbelsäule (aus [17])

des Kopfes (z. B. bei einer Verneinung). Die große Beweglichkeit der Wirbelsäule ist durch die seitlichen Gelenkverbindungen gegeben. Halsbewegungen hingegen sind begrenzt aufgrund der Gelenkkapseln, die alle Gelenke der Halswirbelsäule umgeben, des geringen Ausmaßes an Kompression der Bandscheiben und der eingeschränkten Dehnungsfähigkeit der Bänder zwischen den benachbarten Wirbeln (Band zwischen den Dornfortsätzen und den Wirbelbögen, Nackenband, sowie vorderes und hinteres Längsband). Übermäßige Beanspruchungen in jeder Richtung führen somit notwendigerweise entweder zu einer Überbeanspruchung der Bänder, zur Kompression der Bandscheiben oder der Knochen der Halswirbelsäule, gelegentlich verbunden mit Bänderrissen und Wirbelfrakturen [17].

Die **Halsnerven**, die dem Rückenmark der Halswirbelsäule entspringen, treten nach außen zwischen den Wirbelstielen hindurch und vereinigen sich unmittelbar nach Durchtritt wieder miteinander. Auf diese Weise wird die Zusammensetzung aus Nerven zu einem regelrechten Geflecht, das durch Umgestaltung und Neuverteilung von einzelnen Nervenfasern verschiedene Körperregionen erreicht.

Das Halsgeflecht (Plexus cervicalis, CI bis CIV) versorgt die Haut des Halses, die Gesichtsseiten mit starken Abzweigungen zu den Muskeln, die neben und hinter den Halswirbeln angeordnet sind (Abb. 3.13). Die Nervenstränge aus den unteren Halswirbeln (zwischen C4 bis C7 sowie zwischen den Brustwirbeln T1 und T2) bilden das ausgedehnte Armgeflecht (Plexus brachialis, CV bis CVIII sowie TI) und verzweigen sich zu den Armnerven [17].

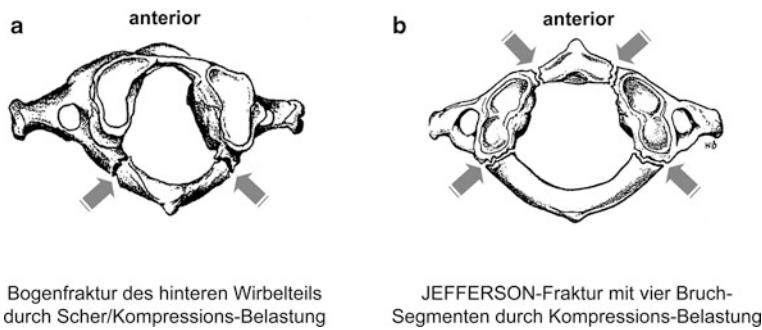
Die **Klassifizierung der Verletzungen** der Halswirbelsäule basiert auf retrospektiven Datenauswertungen von Verletzten, Bewegungsstudien mit Hilfe mathematischer Modelle, aus Film- oder Videoaufzeichnungen, Experimenten mit Leichen oder Leichenteilen und nachträglichen Auswertungen verschiedener, bereits veröffentlichter Verletzungsumstände [16]. Demzufolge variiert die Einordnung der Verletzungen je nach Zielsetzung aus



**Abb. 3.13** Die Nervenstränge des Hals- und des Armgeflechts und die Verteilung der Nervensegmente im Hals, in der Brust und in den oberen Extremitäten (nach [4])

radiologischer, pathologischer, neurologischer oder mechanischer Sicht, wobei sie oftmals aus Gründen der Darstellung einer gewissen Vereinfachung unterworfen ist (oder auch sein muss).

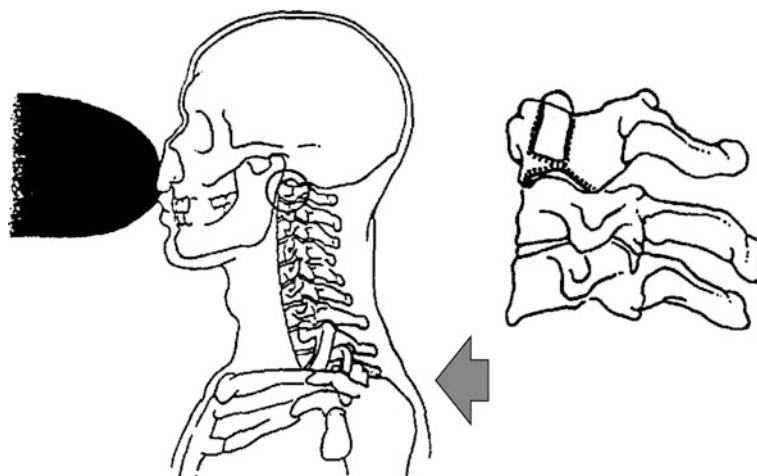
Im Folgenden wird daher die in [17] dargelegte **Verletzungsmechanik** der Halswirbelsäule (auszugsweise) wiedergegeben, bei der der dynamische Aspekt gemeinsam mit dem klinischen im Vordergrund steht. Eine übermäßige **Vorwärtsbewegung des Kopfes** relativ zur Halswirbelsäule bewirkt Scherkräfte, die eine Verlagerung zwischen Atlas C1 und Hinterhaupt bewirkt; die Folge für die Betroffenen ist meist tödlich. Dieser Verletzungstyp ist häufig bei Fußgängern anzutreffen, die von einem Fahrzeug angefahren werden. Die Unversehrtheit des Hinterhaupt/Atlas-Gelenks wird primär aufrechterhalten durch Bänderstrukturen, die bei derartigen Verletzungen reißen. Der hintere Bogen des Wirbels C1 bricht im Wesentlichen durch Kompression zwischen dem Bogen und dem ausgeprägten Dornfortsatz des Wirbels C2. Diese Fraktur erfolgt üblicherweise an der Vertiefung, ausgebildet durch die Wirbelschlagader (Arteria vertebralis), durch die der ringförmige Knochen seine dünnste Stelle aufweist (Abb. 3.14a). Daneben treten bei Flexionen der Halswirbelsäule Splitterfrakturen dadurch auf, dass das kräftige, an den Dornfortsätzen verwachsene Band die schmale Stelle des Atlasbogens (C1) wegreißt. Als so genannte Jefferson-Fraktur wird das Bersten des ringförmigen Wirbels C1 bezeichnet, die durch **axiale Belastung** vom Hinterhaupt-Gelenkkopf auf die obenliegende Gelenkseite des Wirbels C2 zustande kommt. Die Folge ist die klassische Fraktur des Atlas in vier Segmente (Abb. 3.14b).



**Abb. 3.14** a, b Typische Frakturen des Halswirbels C1 (Atlas), nach [17]

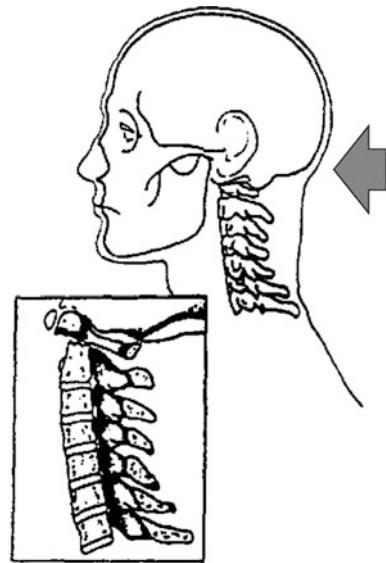
Die Drehung zwischen Wirbel C1 (Atlas) und C2 (Axis) erfolgt um den Zahnfortsatz (Dens) des Axis, der in den vorderen Teil des Atlas hineinragt. **Dens-Frakturen** werden durch drei Typen klassifiziert: Typ 1 ist eine schrägverlaufende Fraktur durch das Ende des Zahnfortsatzes und repräsentiert in aller Regel eine Abrissfraktur. Der Typ 2 kennzeichnet eine Fraktur an der Basis des Zahnfortsatzes, d. h. am Wirbelkörper des Axis, und Typ 3 schließlich beschreibt eine Fraktur, die sich auf den gesamten Wirbelkörper des Axis erstreckt. Bei einem Anprall des Gesichts, z. B. bei einer Vorwärtsbewegung des Oberkörpers (Torso), wird der Dens beim Auftreten einer Fraktur leicht nach hinten verlagert (Abb. 3.15).

Ferner induziert ein Schlag gegen das untere Hinterhaupt oder eine Fixierung des unteren Hinterhauptes bei einer rückwärtigen Torso-Bewegung eine Abscherung und eine



**Abb. 3.15** Dens-Fraktur mit rückwärtiger Verlagerung aufgrund eines Gesichtsanpralls und gleichzeitiger Torso-Vorwärtsbewegung (nach [17])

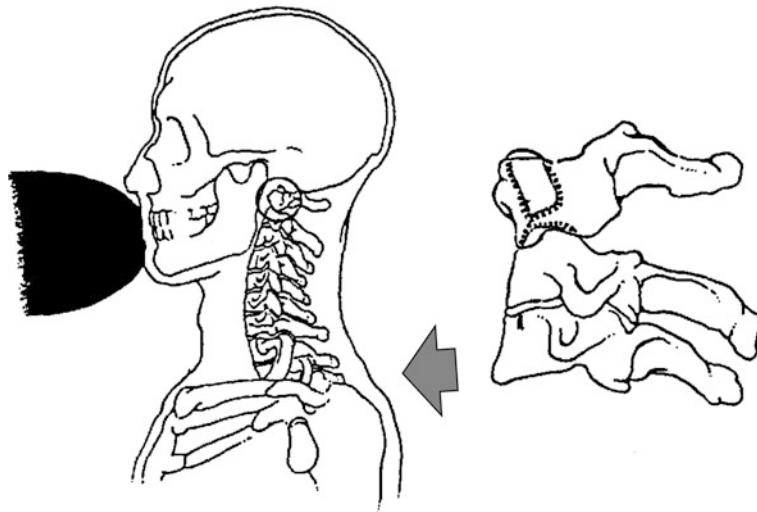
**Abb. 3.16** Dens-Fraktur mit Vorwärts-Verlagerung aufgrund eines Schläges gegen das untere Hinterhaupt oder Fixierung dieses Bereichs und gleichzeitiger Torso-Rückwärtsbewegung (nach [17])



nach vorn verlagerte Fraktur des Zahnfortsatzes (Abb. 3.16). Der dritte Mechanismus findet statt, wenn das untere Gesicht gegen eine Struktur prallt, sodass dies eine Beugung des Kopfes zur Folge hat. Bewegt sich der Torso weiter nach vorne, so erfährt der Hals unterhalb des Atlas eine Extension. Das dabei auftretende Biegemoment verursacht das Brechen des Dens an seiner Basis mit oder ohne nach vorn gerichteter Verlagerung. Durch Scherkräfte, die am Hinterhaupt oder am Gesicht wirksam sind, kann wiederum der Atlas am Axis nach vorn oder auch nach hinten verlagert werden (Abb. 3.17). Greift der Kraftvektor exzentrisch an und ruft dabei ein Moment um die vertikale Achse hervor, so ist eine rotatorische Subluxation (unvollständige Verrenkung, bei der die Gelenkflächen in Berührung bleiben) denkbar.

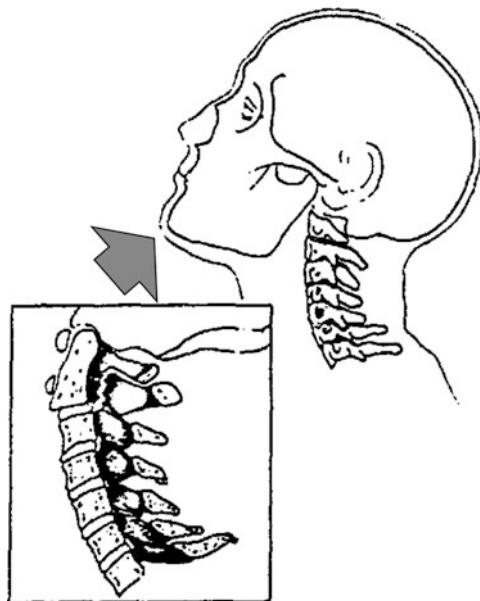
Die Streckung der vorderen Wirbelemente aufgrund einer **Extension des Halses**, bei der die hinteren Elemente einer Kompression ausgesetzt sind, hat zur Folge, dass es zu einer Interaktion zweier Dornfortsätze und gelegentlich auch mit dem hinteren Teil des Wirbelbogens kommt. Dabei tritt üblicherweise eine Fraktur des Wirbels C2 auf, bei der der hintere Teil des Wirbelkörpers vom vorderen getrennt wird (Abb. 3.18). Die Analogie dieser Verletzungen zu denen gerichtlich Erhängter führte zur Namensgebung dieses Verletzungskomplexes: „Hangman’s-Fraktur“.

Mitunter treten auch Frakturen des Wirbels C2 im Gelenkbereich auf, die dann analog zu den häufiger auftretenden Konditionen in der unteren Wirbelsäule sind. Diese Verletzungen sind nur manchmal tödlich und werden oft ohne neurologisches Defizit überlebt. Sie stellen sich meist durch die Fixierung des Kinns ein, während der Körper unterhalb des Kopfes nach unten wegtautcht (Abb. 3.19). Diese Situation ruft eine Extension bei gleichzeitiger Zugbelastung (Tension) hervor.

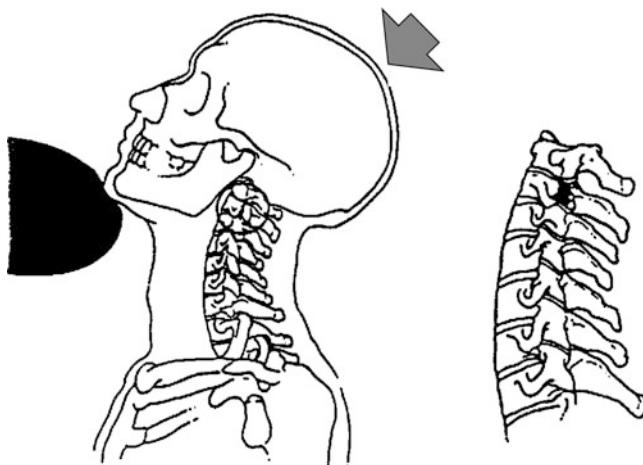


**Abb. 3.17** Dens-Fraktur an seiner Basis aufgrund eines Biegemoments beim Stoß gegen das untere Gesicht und gleichzeitiger Torso-Vorwärtsbewegung (nach [17])

**Abb. 3.18** Fraktur des Wirbels C2 mit Trennung des hinteren Teils des Wirbelkörpers vom vorderen (so genannte „Hangman's Fraktur“) aufgrund einer Extension des Halses (nach [17])



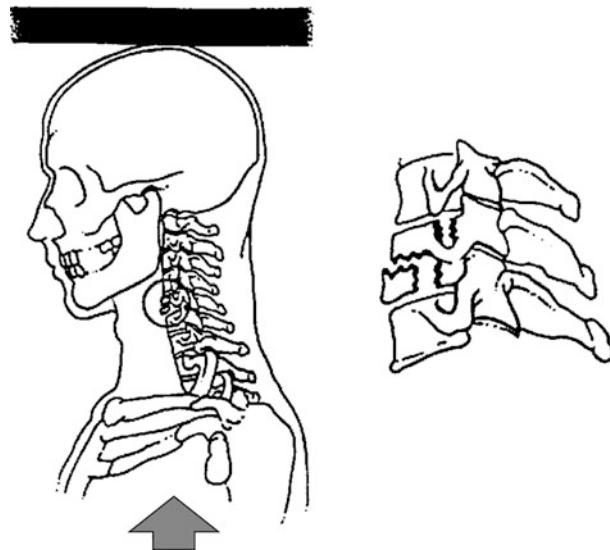
Verletzungen aufgrund **axialer Kompression** treten auf, wenn bei Bewegungseinschränkung des Kopfes und gleichzeitiger Aufwärtsbewegung des Torsos, eine Gerade mit Hals und Kopf bildend, eine Kraft in Längsrichtung der Kopf/Hals/Torso-Achse wirkt. Ist die vertikale Kraft ausreichend groß, so resultiert aus dieser Belastung eine typische



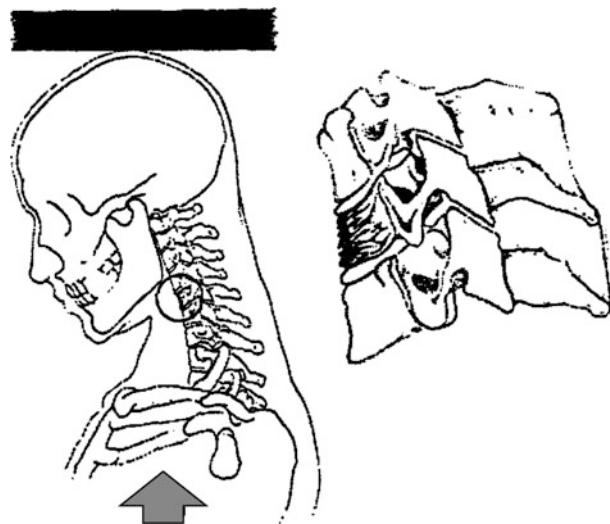
**Abb. 3.19** Fraktur des Wirbels C2 durch die Fixierung des Kinns und gleichzeitigem Wegtauchen des Körpers aufgrund einer Kombination aus Extension und Zugbelastung (Tension), nach [17]

Berstfraktur an einem Wirbelkörper (Abb. 3.20). Die Entstehung dieser Fraktur lässt sich mit der Übertragung der Kompressionskraft innerhalb der Halswirbelsäule erklären: Die zwischen den Wirbelköpfen befindlichen Bandscheiben wirken als Absorptionselemente bei Stößen, wegen ihres zähflüssigen Verhaltens jedoch sind sie im Wesentlichen nicht komprimierbar. Mit zunehmender Kraft beulen die durchsichtigen Knorpelplatten, die die benachbarten Oberflächen der Wirbelkörper umfassen, ein. Der Grund dafür liegt an der zerklüfteten Knochenstruktur der Wirbelkörper mit seinen ausgedehnten Aderkanälen; bei zunehmender Belastung des Wirbelkörpers leeren sich diese Blutgefäße und die Knorpelplatte wird eingedrückt. Folglich kommt es zunächst zu einer Fraktur dieser Knorpelplatte. Bei einer weiteren Belastungszunahme wird die Bandscheibe in den Wirbelkörper hineingedrückt und führt zum typischen Berstbruch, der den Wirbelkörper regelrecht zersplittert. Der rückwärtige Teil des Wirbelkörpers verlagert sich dabei üblicherweise nach hinten in Richtung Rückenmark, während das vordere Fragment nach vorn gestoßen wird.

Flexion/Kompressions-Verletzungen treten auf, wenn eine Kraft am hinteren Scheitelpunkt des Kopfes, nicht jedoch im extrem hinteren oder im Bereich des Hinterhauptes, angreift. Eine ähnliche Situation stellt sich aber auch bei einer Bewegungseinschränkung des Kopfes ein, während sich der Torso weiterbewegt und Kopf und Oberkörper einen Winkel bilden, der eine **Flexion der Halswirbelsäule** induziert. Übersteigt die Kraft ein bestimmtes Maß, so kommt es zu einer Kompressionsfraktur eines Wirbelkörpers im unteren Bereich der Halswirbelsäule (C3 bis C7) in seiner typisch keilförmigen Erscheinungsform (Abb. 3.21). Durch die Kompression der Wirbelkörper werden die Bänder zwischen den Dornfortsätzen benachbarter Wirbel (*Ligamentum interspinalia*) gedehnt, und mitunter tritt ein Bruch von einem oder mehreren Dornfortsätzen auf (Abb. 3.22).



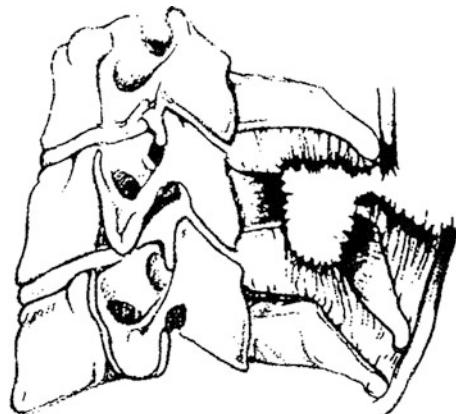
**Abb. 3.20** Berstbruch des Wirbels C5 aufgrund axialer Kompression (nach [17])



**Abb. 3.21** Keilförmige Fraktur des Wirbels C5 durch eine Flexion/Kompressions-Belastung (nach [17])

Verletzungen durch Flexion/Scher-Belastungen treten durch Kräfte auf, die am Hinterhaupt rechtwinklig zur Längssachse des Kopfes angreifen; sie bewirken ebenfalls eine Flexion der Halswirbelsäule. Aus der dabei wirksamen Scherbelastung resultiert üblicherweise im unteren Teil der Halswirbelsäule ein Bänderriss bei gleichzeitiger Vorwärtsverlagerung

**Abb. 3.22** Riss des Bandes zwischen den Dornfortsätzen benachbarter Wirbel und Fraktur des Dornfortsatzes durch Überdehnung (aus [17])

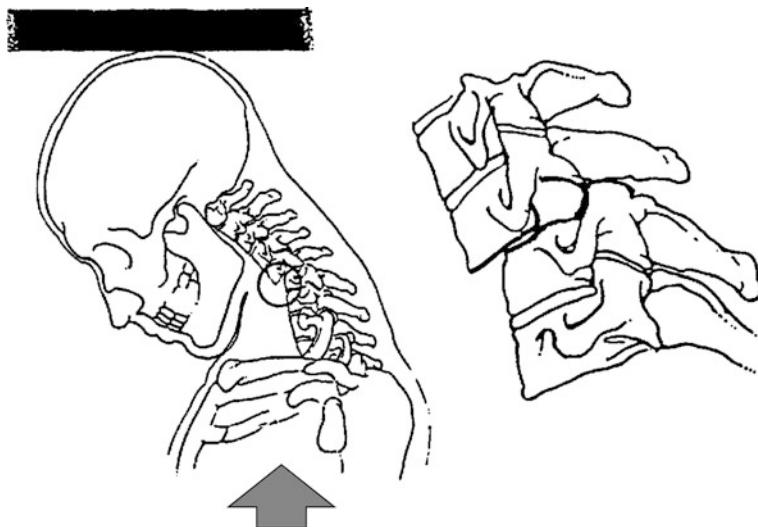


**Abb. 3.23** Vorwärtsverlagerung und Bänderriß zwischen benachbarten Dornfortsätzen ohne Frakturen durch Flexion/Scher-Belastung (aus [17])



der Wirbelkörper, wobei die untere Gelenkfläche des Wirbels über die obere des darunterliegenden Wirbels gleitet. Ein Aufklaffen des Raumes zwischen den benachbarten Dornfortsätzen aufgrund des Bänderrisses in Höhe der Dislokation ist die Folge (Abb. 3.23). Die Relativverschiebung der beteiligten Wirbel kann das vordere Längsband der Wirbelsäule, das an den Vorderflächen der Wirbelkörper verwachsen ist und vom Hinterhaupt- bis zum Kreuzbein verläuft, von der oberen Vorderseite des Wirbelkörpers ablösen; knöcherne Verletzungen treten dabei gewöhnlich nicht auf. Ebenfalls ohne signifikante Knochenfrakturen wird die Belastung in Fällen aufgenommen, bei denen eine Kraft am Hinterhaupt in einer Richtung wirkt, die noch eine Flexion bei gleichzeitiger Scherwirkung induziert, ohne eine bedeutsame Kompression der Wirbelkörper hervorzurufen (Abb. 3.24).

Treten die bisher beschriebenen Belastungen kombiniert mit einer **Rotation des Kopf/Hals-Bereichs** auf, so führen diese zu erheblichen Bänderrissen und -ablösungen sowie zu ein- oder wechselseitigen Wirbel-Dislokationen ohne signifikante knöcherne Verletzungen. Allerdings finden die Verschiebungen bereits bei niedrigerem Belastungsniveau statt als bei Kräften, die Flexionen und Kompressionen zur Folge haben. Bei Untersu-



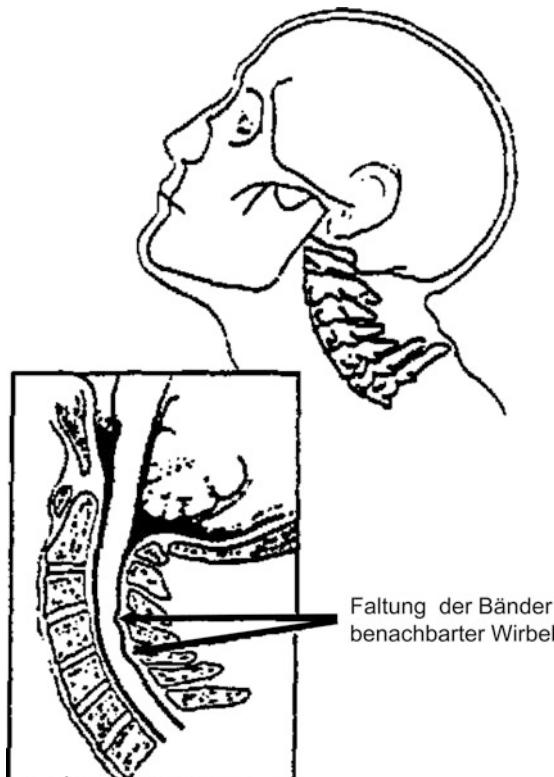
**Abb. 3.24** Ventrale Dislokation ohne Fraktur des Wirbels C5 durch eine Flexion/Scher-Belastung (nach [17])

chungen von Unfällen, bei denen die Kinematik ebenso wenig wie das Verletzungsbild auf einen Flexion/Scher-Mechanismus hinwiesen, aber auch in einigen Fällen typischer Flexion/Scher-Verletzungen, zeigte sich aufgrund der Rotationsbewegung eine zusätzliche Zugbelastung des Halses mit bemerkenswerten Zerrungen in der Größenordnung der beschriebenen Dislokationen mit dem Ergebnis von Rissen des vorderen und hinteren Längsbandes, Zertrümmerungen der Bandscheibe sowie Reißern der Gelenkkapseln. Die Entstehung dieser Verletzungen ist extrem unsicher, sodass nicht von einem eindeutigen Verletzungsbild ausgegangen werden kann.

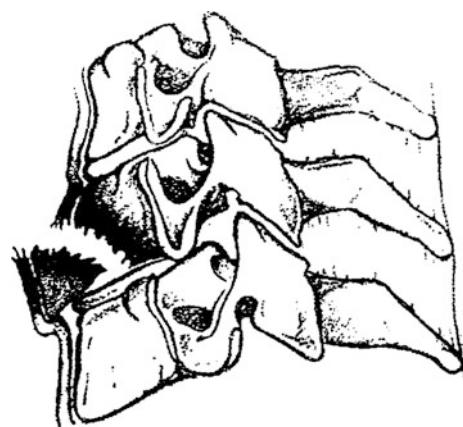
Verletzungen aufgrund von Extension/Kompressions-Belastungen treten bei ausreichend hohen Kräften auf, die im Stirnbereich des Kopfes einwirken oder in Fällen, bei denen der Kopf in seiner Bewegungsmöglichkeit behindert ist und sich gleichzeitig der Torso im Wesentlichen in Richtung der Längsachse weiterbewegt. Diese Belastung induziert eine **Extension des Halses** und eine entsprechende Belastung der Wirbel. Die hinteren Wirbelemente wirken dabei als Drehpunkt, sodass die auftretenden Zugkräfte zum Zerreissen des vorderen Längsbandes und zum Bruch der Bandscheiben führen können. Die Rückwärtsverlagerung der oberen Wirbel bewirkt eine Verengung des Wirbelkanals und damit ein Zusammendrücken des Rückenmarks entweder durch die Faltung der Bänder zwischen benachbarten Wirbelbögen oder durch eine Einschnürung zwischen der rückwärtigen unteren Kante des einen Wirbelkörpers und der hervortretenden Kante des darunterliegenden Wirbels (Abb. 3.25).

Eine zusätzliche vertikale Kompression induziert Frakturen der unteren Fläche des oberen Wirbels und lässt eine Vorwärtsbewegung des darunterliegenden Wirbels zu. Dabei

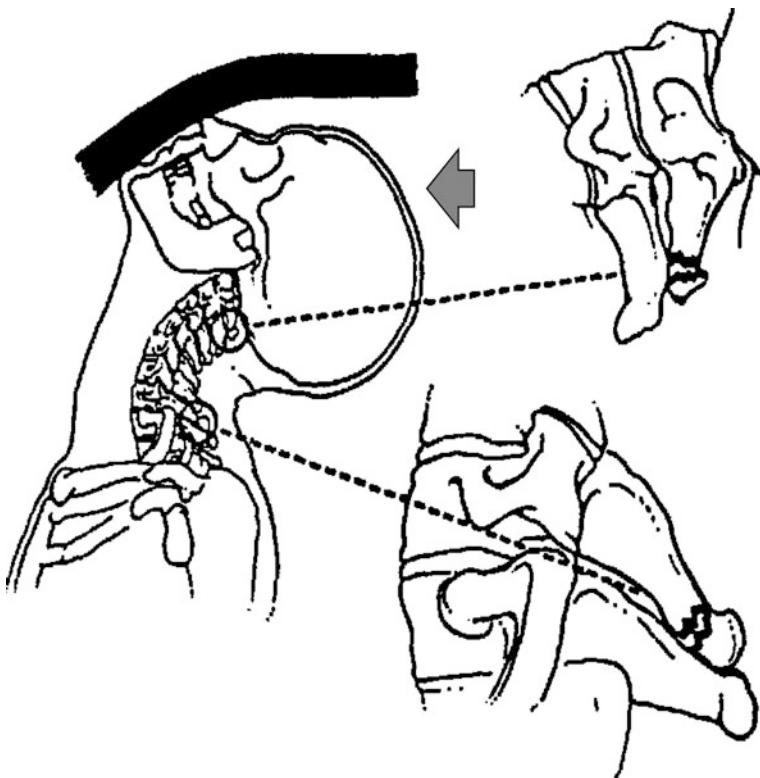
**Abb. 3.25** Beeinträchtigung des Wirbelkanals aufgrund eingefalteter Bänder benachbarter Wirbelbögen bei erzwungener Extension (nach [17])



**Abb. 3.26** Riss des vorderen Längsbandes und Ausbrechen eines Fragments aus der vorderen Unterseite eines Wirbelkörpers aufgrund einer Extension/Kompressions-Belastung (aus [17])



kann ein kleines Knochenstückchen der unteren Vorderkante des verschobenen Wirbelkörpers durch das gerissene vordere Längsband herausgebrochen werden (Abb. 3.26). Es können aber auch Frakturen des Dornfortsatzes und des Wirbelbogens auftreten, die dazu neigen, sich nach oben zu verlagern (Abb. 3.27).

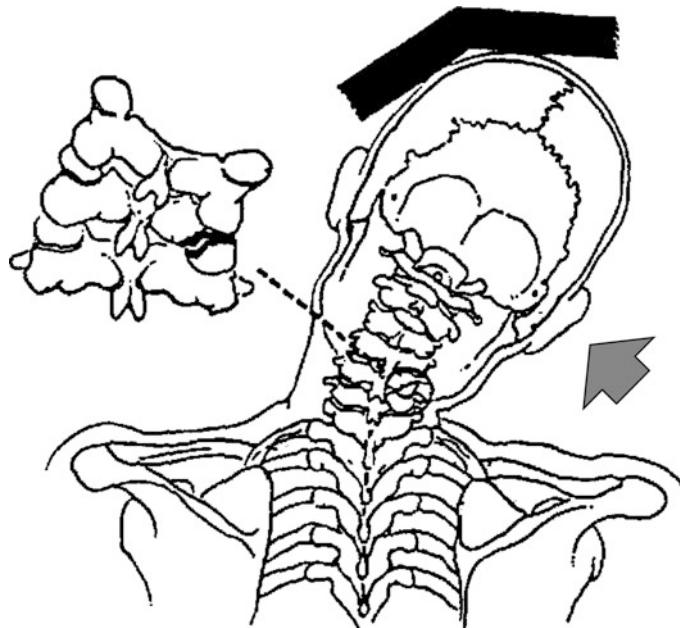


**Abb. 3.27** Fraktur des Dornfortsatzes der Wirbel C1 und C7 aufgrund einer Extension/Kompressions-Belastung (nach [17])

Von einer lateralalen Flexion/Kompressions-Belastung spricht man, wenn der Kopf einer seitlichen Bewegung ausgesetzt wird. Dem Hals wird dabei eine **laterale Beugung** aufgezwungen, die eine Beanspruchung des Wirbelseitenbereichs zur Folge hat und zu Frakturen der auf der komprimierten Seite liegenden Struktur führen kann (Abb. 3.28). Tritt gleichzeitig eine Rotation des Kopfes auf, so können sich Splitter vom betroffenen Wirbelkörper ablösen.

Direkte Verletzungen erfolgen meist durch einen mit ausreichend hoher Kraft geführten **Schlag gegen den hinteren Hals**, insbesondere im unteren Bereich. Die Folge kann eine Fraktur des Dornfortsatzes eines oder mehrerer Wirbel sein. Bei entsprechenden **lateralen Belastungen** gegen den Hals können Frakturen des Querfortsatzes der Wirbel die Folge sein. Eine unmittelbare Traumatisierung des Halses ist selten verbunden mit anderen knöchernen Verletzungen, ohne dass eine beträchtliche Kraft wirksam ist.

Bei Heckkollisionen treten häufig Halswirbel-Distorsionen auf. Dabei handelt es sich meist um eine Schwebebewegung mit S-Form der Halswirbelsäule und anschließender **Extension**. Die sekundäre **Flexions-Bewegung** (beispielsweise beim Fallen in den Gurt) ist



**Abb. 3.28** Fraktur der seitlichen Struktur des Wirbels C5 aufgrund einer lateralen Flexion/Kompressions-Belastung (nach [17])

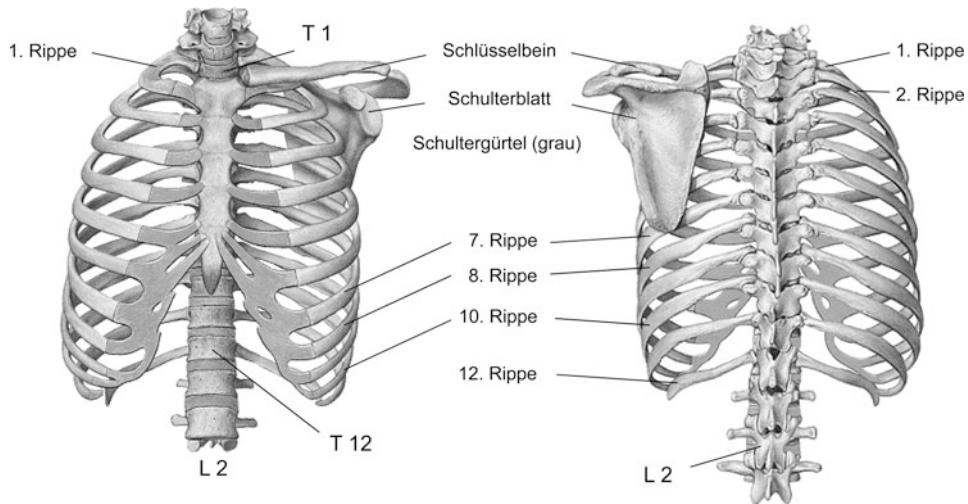
meistens energiearm. Nicht selten treten schmerzhafte Zerrungen oder Verstauchungen des Halses auf [18], deren Beurteilung besondere Kenntnisse im Bereich der Biomechanik erfordert [14, 19].

Die meisten **Weichteil-Verletzungen** betreffen die Nackenmuskulatur. Die früher bei fehlenden Kopfstützen festgestellten Verletzungen im vorderen Teil des Halses treten kaum mehr auf. Dabei waren bei genügend hoher Belastung Risse der Muskelfasern, Blutungen in der Speiseröhre und der Muskeln, Trennen der vorderen Längsbänder und Beschädigungen der Bandscheiben entstanden.

### 3.1.3 Der Thorax

Der Thorax, wie die Brust genannt wird, besteht aus dem knöchernen Brustkorb und den darunter liegenden Organen. Er ist nach unten abgegrenzt durch das Zwerchfell, eine dünne muskulöse Scheidewand zwischen Brust- und Bauchhöhle. Die Brustwand ist als nachgiebiger Hohlraum ausgebildet und schützt das Atmungs- und das Herz/Gefäß-System.

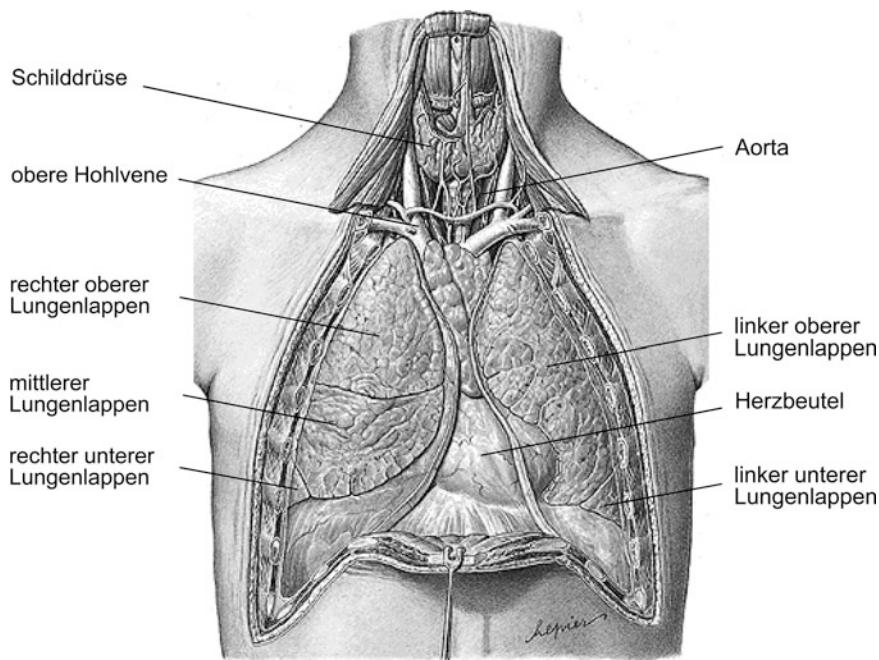
Der **Brustkorb** (Abb. 3.29) umfasst zwölf Brust-Wirbel (T1 bis T12), zwölf Rippenpaare und das Brustbein (Sternum). Hinten an der Wirbelsäule ist jede der zwölf Rippen mit dem



**Abb. 3.29** Anatomisches Skelett des Brustkorbs (nach [4])

korrespondierenden Brustwirbel gelenkig verbunden. An der Brustvorderseite ist jede der oberen sieben Rippen (Costae verae) mit dem Sternum knorpelig verwachsen, während die unteren fünf Rippen (Costae spuriae) keine direkte Verbindung zum Brustbein haben. Die Rippen 8 bis 10 bilden den Rippenbogen und sind durch eine knorpelige Anbindung mit der siebten Rippe verbunden; die beiden letzten Rippen enden frei [3]. Die Brustwand umfasst die knöchernen Rippen, Knorpel und Muskeln, die der Brust das Ausdehnen und Zusammenziehen beim Atmungsvorgang ermöglichen. Dabei verbinden die Muskeln die Rippen miteinander und vervollständigen den nachgiebigen Brustkorb, der den inneren Organen Schutz bietet. Zudem füllen Blutgefäße und Nervenstränge den Raum zwischen den benachbarten Rippen aus [20].

Die **Lunge** (Pulmo) besteht aus zwei Lungenflügeln, wobei der linke Lungenflügel zwei Lappen (oben und unten) und der rechte Flügel drei Lappen (oben, mittig und unten) aufweist (Abb. 3.30). Die Lungen sind von einer serösen Membran (Pleura visceralis) umhüllt; weitere Membranen (Pleura parietalis) bilden die innere Oberfläche der Brustwand, umschließen im **Mittelfellraum** (Mediastinum) die Organe der Thorax-Mitte und decken das Zwerchfell ab [3]. Das Herz, die hinführenden und von ihm kommenden großen Blutgefäße, die Brustdrüse, die Speiseröhre, der untere Abschnitt der Luftröhre und der Lymphknoten der Brust befinden sich im Mittelfellraum, der nach vorn durch das Sternum und rückwärtig durch die Brustwirbelsäule begrenzt ist [21]. Die Luftröhre, ein 10 bis 12 cm langer Abschnitt der Atemwege, beginnt unterhalb des Ringknorpels und endet mit den Abzweigungen in den rechten und linken Stammbronchien in Höhe des vierten Brustwirbels. Die Stammbronchien verzweigen sich entsprechend den Lungenlappen rechts in drei und links in zwei Lappenbronchien, die sich wiederum aufteilen in die Segmentbronchien

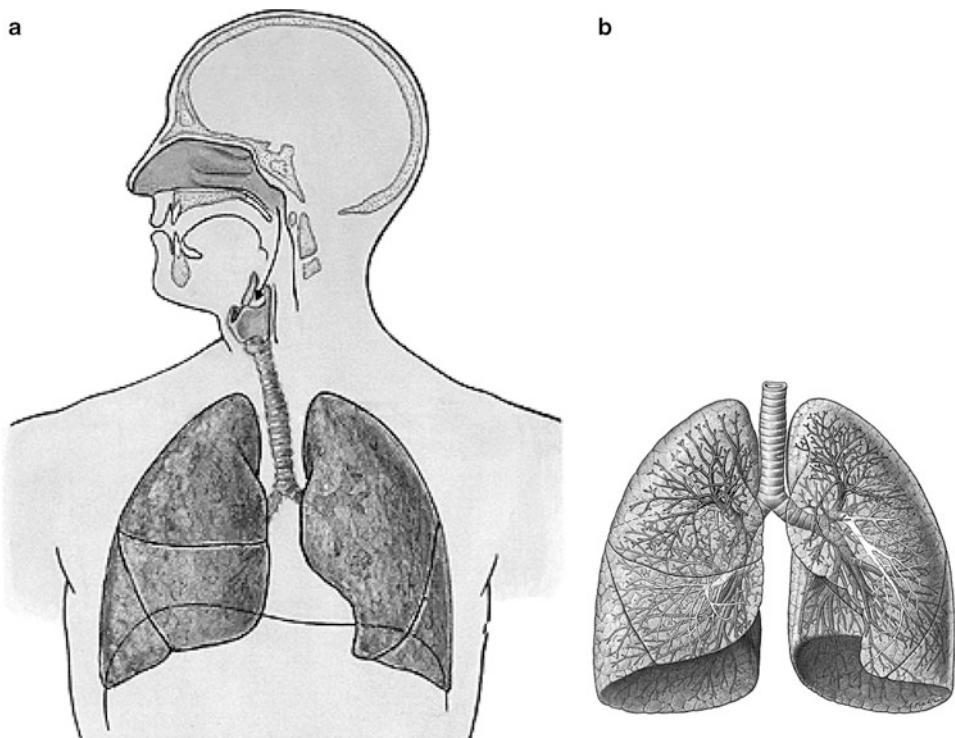


**Abb. 3.30** Lageverhältnisse im Brustkorb (von ventral), nach [4]

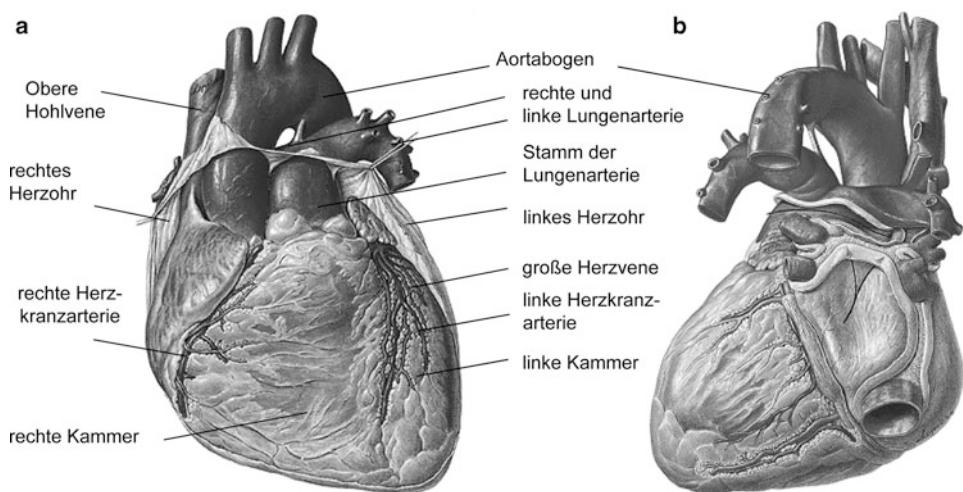
und schließlich fein verästelt an den Lungenbläschen münden (Abb. 3.31), an denen der Sauerstoff/Kohlendioxid-Austausch mit dem Blut stattfindet [3].

Das **Herz** (Cor, Cardia) ist ein muskulöses Hohlraum-Organ, das sich im unteren Teil des Brustraums im mittleren Mediastinum zwischen den Lungen und auf dem Zwerchfell befindet. Es weist ungefähr die Größe einer Faust auf und wiegt 300 g beim erwachsenen Mann und 250 g bei einer Frau [21]. Unterteilt ist das Herz in vier Kammern, den linken und rechten Vorhof (Atrium) und die linke und rechte Herzkammer (Ventriculus). Das aus dem Körper (außer den Lungen) zurückströmende, sauerstoffarme Blut fließt durch die vertikal verlaufende obere und untere Hohlvene (Vena cava superior und inferior) und gelangt in den rechten Vorhof. Aus der rechten Kammer wird das venöse Blut durch den Stamm der Lungenarterie (Truncus pulmonalis) gepumpt und gelangt durch die rechte bzw. linke Lungenarterie (Arteria pulmonalis dextra und sinistra) zur Lunge. Dort gibt das Blut Kohlendioxid an die Atemluft in den Lungenbläschen ab, wird mit Sauerstoff angereichert und fließt durch die vier Lungenvenen zum linken Vorhof. Von hier gelangt das arterielle, also sauerstoffangereicherte Blut zur dickwandigen linken Herzkammer, von der es durch die Aorta zu allen Körperregionen (außer zu den Lungen) gepumpt wird [3].

Abbildung 3.32 zeigt die Vorder- und die Rückansicht des Herzmuskels mit seinen Gefäßen. Das Herz sowie die arteriellen und venösen Herzkranzgefäße sind von einem zwei-

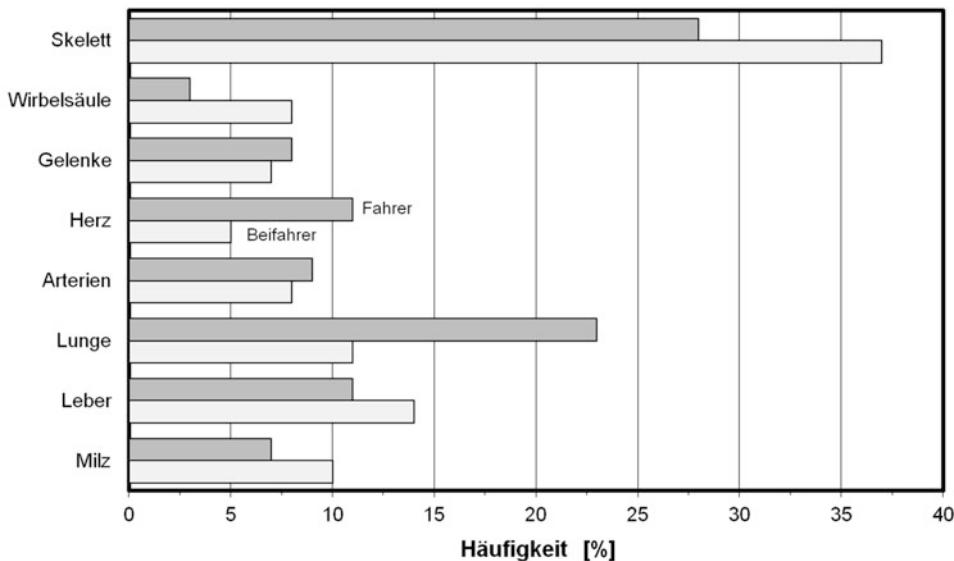


**Abb. 3.31** Verzweigung der Luftröhre in die Stammbronchien (a) und deren Verästelung (b) (aus [4])



**Abb. 3.32** Herz bei geöffnetem Herzbeutel (a von ventral, b von dorsal), nach [4]

### Belastungsart

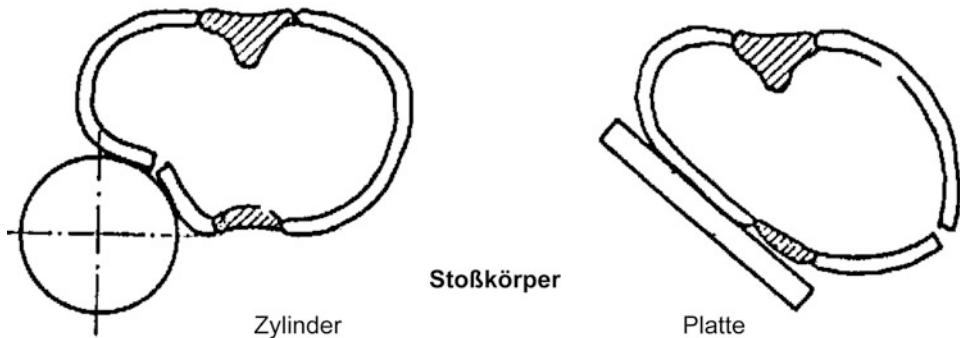


**Abb. 3.33** Häufigkeit von Thorax-Verletzungen (AIS > 2) für Fahrer und Beifahrer (aus [21])

lagigen, fibrösen Binde- und Fettgewebe, dem Herzbeutel (Perikard), umschlossen, dieser schützt den Herzmuskel gegen Überdehnung. Zwischen beiden Herzbeutelblättern oder -lagen befindet sich nur ein Film seröser Flüssigkeit.

**Verletzungen des Thorax**, aber ebenso des abdominalen Bereichs, sind bei Kontakt mit Fahrzeug-Innenraumteilen im Vergleich zu Verletzungen des Kopfes und der Extremitäten weniger häufig (vgl. Abb. 3.2). Werden allerdings nur schwere Verletzungen (AIS > 2) berücksichtigt, so weisen Thorax- und Abdomen-Verletzungen nach den Kopfverletzungen die größte Häufigkeit auf. Der häufigste Kontakt des Fahrers findet mit der Lenkeinrichtung statt, während der Beifahrer am häufigsten am Armaturenbrett anprallt. Wie Abb. 3.33 zeigt, treten für beide Insassen Brüche des Brustkorbes am stärksten in Erscheinung, gefolgt von Lungenverletzungen des Fahrers sowie Verletzungen der Leber und des Herzens. Leber und Milz befinden sich zwar unterhalb des Zwerchfells, also außerhalb des Thorax, liegen aber im Bereich des unteren lateralen Rippenbogens, in dem sie durch den Lenkradkranz verletzt werden können [21].

Die Anatomie des Thorax und des Brustkorbs ist von bedeutendem Einfluss auf das Verletzungsmuster und die **Verletzungsmechanik** des Thorax, zu deren Beschreibung nachfolgend auszugsweise aus [20] zitiert wird. Seine seitliche Ausdehnung ist größer als die in Anterior/posterior-Richtung, sodass eine direkte sagittale Belastung im Allgemeinen zu Einzelfrakturen von mehreren Rippen, nicht jedoch zum Einfallen der Brustwand führt. Eine laterale Beanspruchung, wie sie bei Seitenkollisionen auftritt, hingegen führt bei ausreichend hoher Belastung, je nach Intensität und Stoßkörperform, zu Rippenfrakturen mit

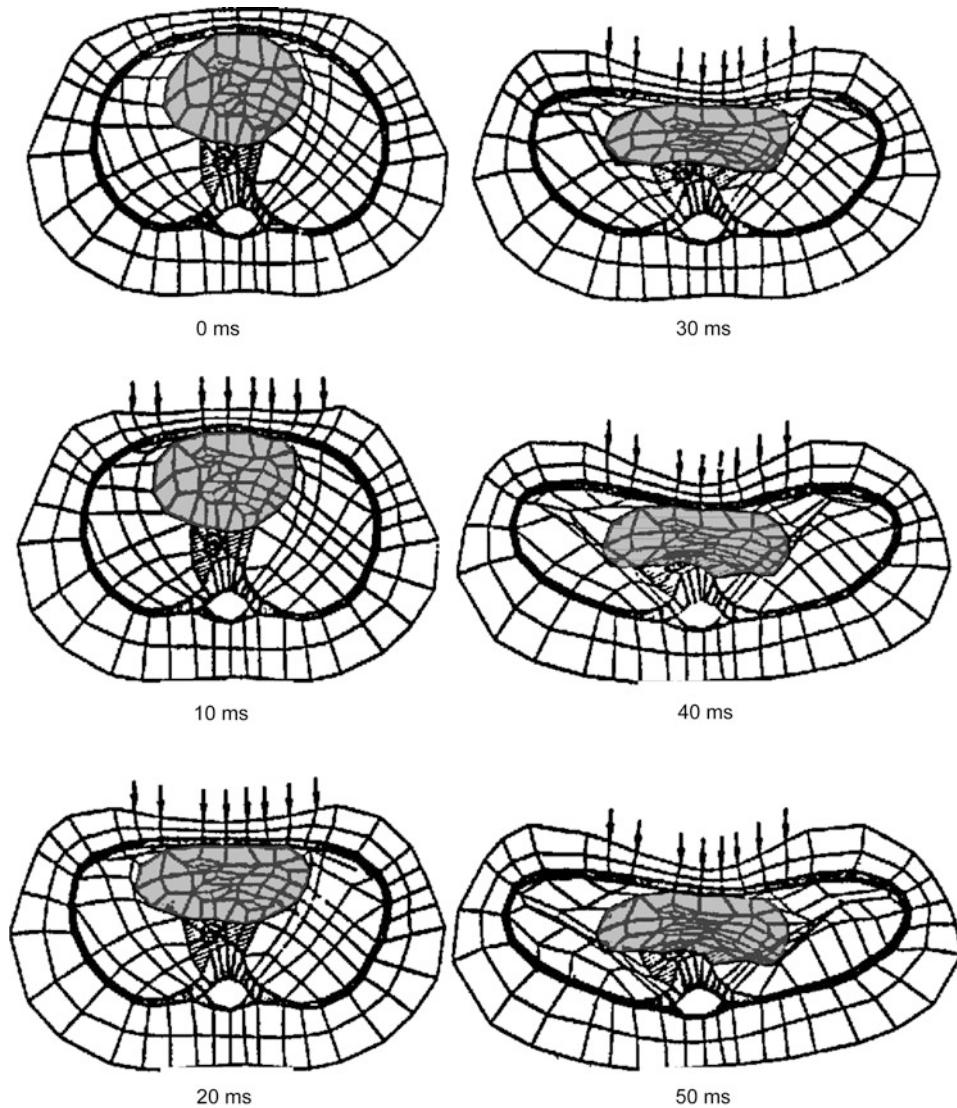


**Abb. 3.34** Bruchart der Rippen bei lateralem Anprall mit unterschiedlichen Stoßkörpern (aus [22])

zwei und mehr Bruchstellen an jeder Rippe (Abb. 3.34) und kann eine Thorax-Instabilität zur Folge haben. Der Grund hierfür ist darin zu sehen, dass in der lateralen Region die Rippen dicht unter der Oberfläche liegen, weniger schützendes Muskelgewebe haben und eine stärkere Krümmung aufweisen.

Obgleich **Rippenfrakturen** häufig in Verbindung mit schweren Brustverletzungen auftreten, korrespondiert das Ausmaß knöcherner Verletzungen nicht notwendigerweise mit der Gesamtschwere der Verletzungen. Lebensbedrohliche Verletzungen von Organen der Brust können auftreten, ohne dass es zu Rippen- oder Brustbein-Frakturen kommt, insbesondere bei jüngeren Erwachsenen, deren Brustkorb durch eine höhere Nachgiebigkeit gekennzeichnet ist. Treten allerdings Rippenbrüche auf, wird von der auftretenden Energie nur ein verminderter Anteil auf die inneren Organen übertragen, sodass die Verletzungswahrscheinlichkeit reduziert wird. Die meisten knöchernen Verletzungen resultieren aus einem Thorax-Anprall, der eine Kompression der Brust und die Deformation der inneren Organe zur Folge hat; dies ist zu erkennen in den Darstellungen der Abb. 3.35 aus einer rechnerischen Simulation mit 30 %-iger Thorax-Kompression. Die Folge kann eine Kontusion innerer Organe, d. h. eine Quetschung aufgrund stumpfer Gewalteinwirkung, sein. Beim lateral Anprall kann es zum Bruch an mehreren Stellen nur einer Rippe kommen, aber auch multiple Frakturen, so genannte Rippenserienfrakturen, sind möglich (Abb. 3.36), mit der Gefahr einer Instabilität der Brustwand und von Organverletzungen aufgrund der Verlagerung der Bruchenden in den Brustraum.

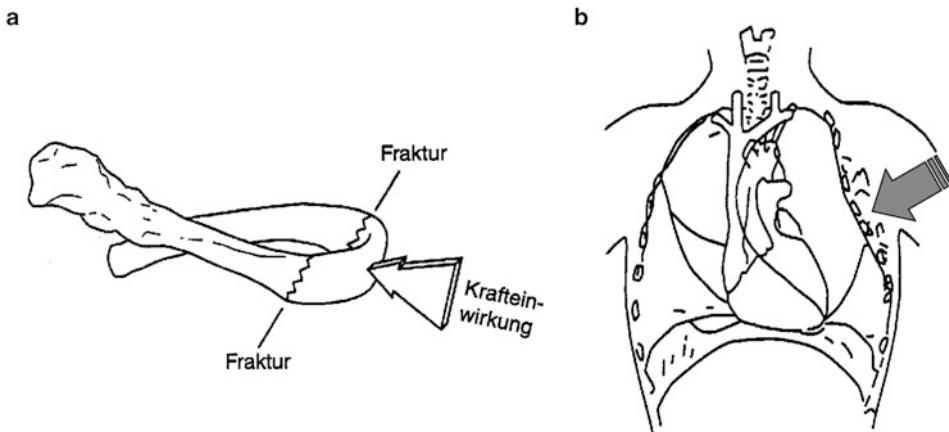
Mehrfachbrüche an verschiedenen Rippen bewirken eine **Thorax-Instabilität**, die aufgrund der Unterversorgung der Luftzufuhr der betreffenden Lunge zu einer starken Beeinträchtigung der Atmungstätigkeit führt. Das instabile Brustwandsegment wird üblicherweise von seinem umgebenden Gewebe abgelöst und erlaubt so, dass es beim Einatmen angesaugt wird. Die verbleibende Brustwand sinkt ein, anstatt sich auszudehnen; beim Ausatmen wird das Segment nach außen bewegt: Man spricht von einer paradoxen Atmung [3]. Zwar bleibt dabei der Atemstoß erhalten, aber das beim Einatmen stattfindende Abflachen der Brustwand reduziert den Unterdruck zwischen den beiden Blättern des Rippenfells



**Abb. 3.35** Thorax-Kompression und Deformation der inneren Organe mit Hilfe der rechnerischen Simulation bei 30 %-iger Kompression (nach [20])

(Pleura), sodass die betroffene Lunge nicht mehr ausreichend mit Atemluft versorgt wird; infolge dessen weist das Blut zu wenig Sauerstoff auf (blaurote Färbung der Lippen).

Das Eindringen scharfer Bruchenden der frakturierten Rippen kann zum Durchstoßen (Perforation) und zu Rissen (Lazeration) in der Lunge führen. Durch eine offene Wunde ist das Rippenfell dem atmosphärischen Druck ausgesetzt, Außenluft dringt in den

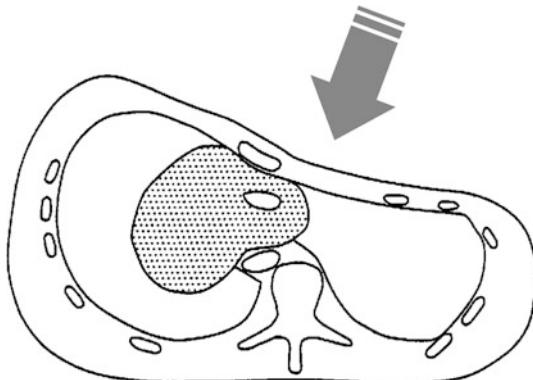


**Abb. 3.36** Fraktur einer Rippe an mehreren Stellen (a) und Rippenserienfraktur beim lateral Anprall (b) (nach [20])

Pleuraraum (Brustfell) ein und die Lunge kann in sich zusammenfallen und kollabieren; man spricht vom **Pneumothorax**. Oberflächliche Risse des Lungengewebes führen zu einem spontanen Verkleben durch geronnenes Blut, während tiefe Risse, insbesondere von Hauptluftwegen und Blutgefäßen, meistens einen erheblichen Blutverlust zu Folge haben. Das Blut gelangt in den Brustraum und man spricht von einem **Hämorthorax**, der ebenfalls zu einem Lungenkollaps führen kann. Der Blutverlust, der von einer Brustwandverletzung herrührt, reduziert das zirkulierende Blut, da ein Teil in den Brustraum fließt, und ist meist ausgeprägter in Verbindung mit Thorax-Instabilitäten als bei Rippenserienfrakturen. Ein Bluterguss, der zu einem Hämorthorax führt, kann auch durch Risse der zwischen den Rippen befindlichen (interkostalen) Muskeln und Gefäße hervorgerufen werden, besonders dann, wenn sich die Verletzung nahe an der Rückseite der Brustwand befindet, da in diesem Bereich kräftige Blutgefäße verlaufen, die mit den Hauptvenen des Mittelfellraumes verbunden sind.

Die Beanspruchung stumpfer Gewalt auf den Brustkorb führt üblicherweise zu Frakturen des Sternum und der Rippen, sodass das Herz zwischen Sternum und Wirbelsäule zusammengedrückt wird. Abhängig vom Ausmaß der Kompression können dabei **Verletzungen des Herzens** (Quetschverletzungen, Aorta-Rupturen oder Risse des Herzmuskelns) auftreten (Abb. 3.37). Risse, die auch den Herzbeutel in Mitleidenschaft ziehen, führen zu einem Hämorthorax und sind in den meisten Situationen tödlich. Ist der Herzbeutel-Riss jedoch weniger ausgedehnt, so kann das geronnene Blut den Riss schließen. In diesem Fall oder wenn der Herzbeutel intakt bleibt, sammelt sich jedoch das Blut zwischen Herz und Herzbeutel und führt zu einem Bluterguss, dem Hämoperikard (Perikard: Herzbeutel). Das Hämoperikard kann eine Herztamponade zur Folge haben, die bei zunehmendem Druck die Hohlvenen zusammendrückt und zum Herzstillstand führt.

**Abb. 3.37** Kompression des Herzens mit der Folge von Quetschverletzungen, Aorta-Rupturen oder Rissen des Herzmuskels (nach [20])

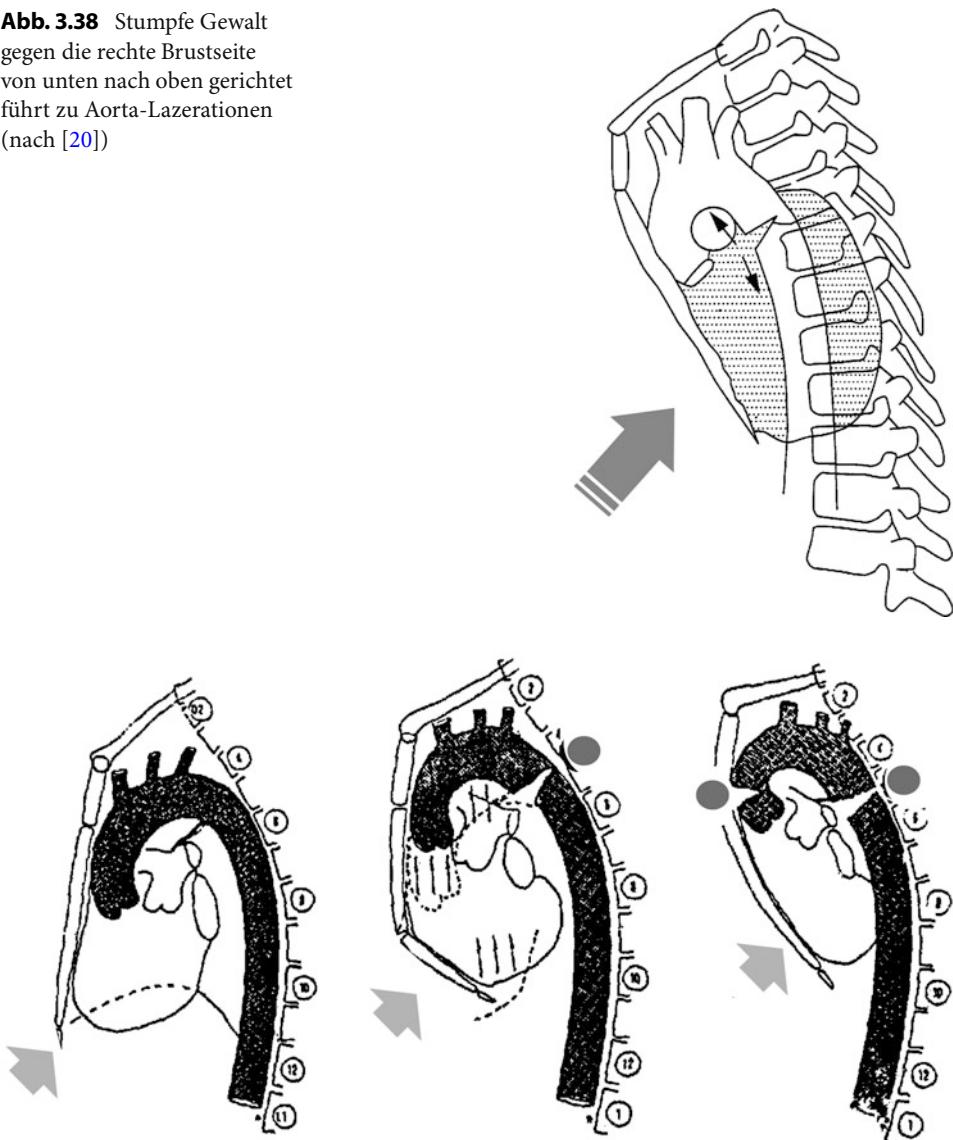


Im Falle stumpfer Gewalt sind Herzverletzungen mit Rupturen zwar möglich, sie treten jedoch relativ selten auf. Sie wurden aber interessanterweise meist als solche diagnostiziert, und zwar bei „unerkannten“ Verletzungen, die zum Tod führten. **Herzkontusion** (Quetschung, Prellung) ist die häufigste Verletzung, doch ist sie schwierig zu diagnostizieren und kann gelegentlich durch das Vorhandensein weiterer Verletzungen verdeckt werden. Schwerere Verletzungen des Herzens resultieren aus **Lazerationen des Herzmuskelgewebes**, d. h. aus Rissen im Gewebe, die an der äußeren oder der inneren Oberfläche auftreten. Ein Herztrauma kann aber auch funktionale Effekte, wie Rhythmus- und Herzaktionsstörungen, hervorrufen, die bei starker Beeinträchtigung zum Tod führen können. Dabei ist eine Herzrhythmus-Störung eines der häufigsten Anzeichen für eine Herzmuskel-Kontusion.

**Verletzungen der Aorta und der Hauptblutgefäße** aufgrund stumpfer Gewalt haben üblicherweise das Aufreißen der Gefäßwandung zur Folge. In vielen Fällen ist die Ruptur vollständig und damit tödlich. Bei Überlebenden derartiger Verletzungen kommt es vor, dass die Gefäßwand-Lazeration nicht die äußerste, aus elastischen Fasern aufgebaute Schicht der Wandung umfasst, sodass das Blut im Wesentlichen innerhalb des Gefäßsystems verbleibt, doch kann die dabei entstehende Erweiterung der Gefäßwand zum späteren Tod führen. Wirkt die stumpfe Gewalt auf der rechten Brustseite und ist von unten nach oben gerichtet, so sind die auftretenden Verletzungen häufig begleitet von Aorta-Lazerationen (Abb. 3.38). Der Aorta-Riss betrifft üblicherweise den abwärts verlaufenden Teil des Gefäßes unmittelbar hinter dem Abzweig der Unterschlüsselbein-Schlagader. An dieser Stelle befindet sich die Übergangsstelle zwischen dem relativ beweglichen Aorta-Bogen und dem abfallenden Abschnitt, der durch die interkostalen Gefäße zwischen der abfallenden Aorta und dem Thorax fixiert ist. Das „Aufschaufeln“ des Herzens bei einer Thorax-Kompression überdehnt die Aorta an der Vorderfläche und kann dabei den Abriss der Gefäße hervorrufen (Abb. 3.39).

Rupturen der Aorta und der Blutgefäße treten meistens in Verbindung mit weiteren Thorax-Verletzungen auf. Ein Abriss der bedeutsamen aufsteigenden Gefäße (Kopf- und

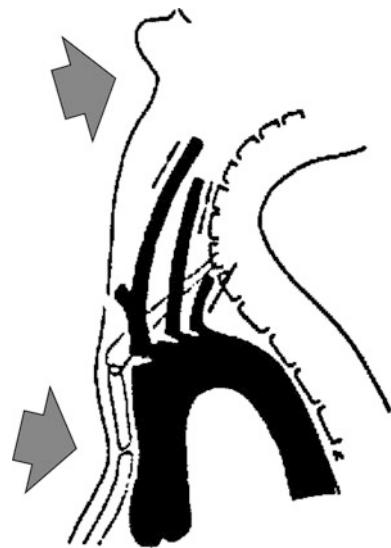
**Abb. 3.38** Stumpfe Gewalt gegen die rechte Brustseite von unten nach oben gerichtet führt zu Aorta-Lazerationen (nach [20])



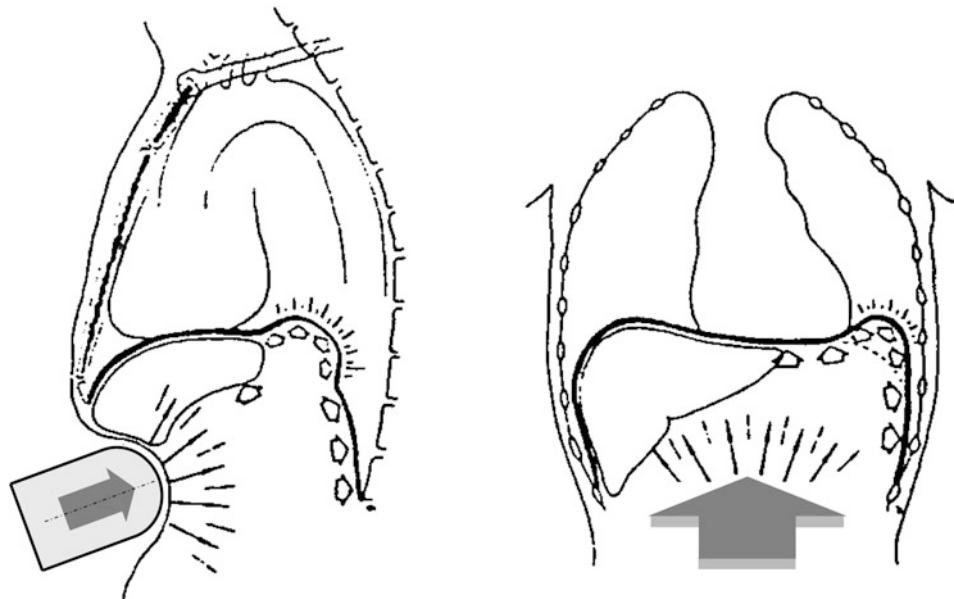
**Abb. 3.39** „Aufschaufeln“ des Herzens bei Thorax-Kompression führt zu Aorta- und Gefäß-Rupturen (nach [20])

Unterschlüsselbeinschlagader) kann aus einer gleichzeitigen Brustkompression mit Hyperextension des Halses und einer Überdehnung dieser Gefäße resultieren. Diese Verletzungssituation ist gekennzeichnet durch Eindrückung des oberen Brustkorbs und weiterer Verletzungen (Abb. 3.40).

**Abb. 3.40** Brustkompression mit Hyperextension des Halses führt zu Gefäß-Lazerationen (nach [20])



Das Zwerchfell (Diaphragma) ist eine muskulöse Scheidewand zwischen dem Thorax und dem Abdomen und kann durch eine im Abdominalbereich wirkende stumpfe Gewalt verletzt werden (Abb. 3.41); die dabei auftretende **Lazeration des Zwerchfells** ist im Wesentlichen begrenzt auf den linken Bereich. Aufgrund des Unterdrucks im Brustraum



**Abb. 3.41** Lazerationen des Zwerchfells aufgrund stumpfer Gewalt gegen das Abdomen (nach [20])

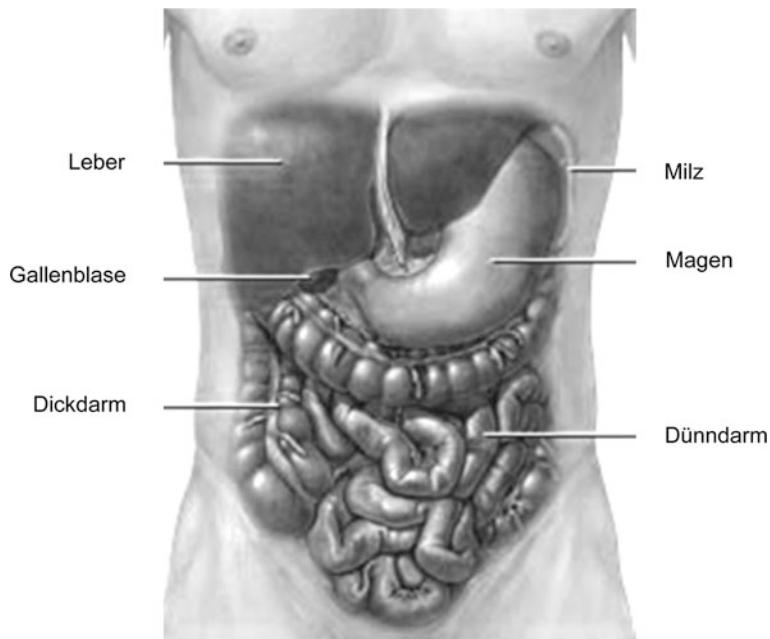
tendiert der Riss dazu, offen zu bleiben, sodass Teile der Baucheingeweide durch die Öffnung in den Brustraum eintreten können (Hernia). Die Folge des daraus resultierenden Drucks auf die Lunge ist eine teilweise Entleerung des betroffenen Lungenabschnitts und eine Verlagerung des Herzens auf die gegenüberliegende Seite.

Die **Speiseröhre** ist durch ihre Lage im hinteren Bereich des Mittelfells geschützt, doch können auch hier Verletzungen aufgrund stumpfer Gewalt gegen den Thorax auftreten.

### 3.1.4 Das Abdomen und das Becken

Das **Abdomen**, wie der Bauch oder Unterleib auch bezeichnet wird, ist die größte Körperhöhle, doch kann es streng genommen nicht als „Höhle“ angesehen werden, da die in der Bauchregion liegenden Organe den gesamten Raum vollständig ausfüllen. Die Bauchorgane umfassen zwei **Haupttypen von Organen**, nämlich die kompakten und die hohlförmigen Organe, die unter verschiedenen mechanischen Belastungen ein völlig unterschiedliches Verhalten aufweisen. Die kompakten Organe sind Leber (Hepar), Milz (Li- en, Splen), Bauchspeicheldrüse (Pankreas), die Nieren (Ren) mit den Nebennierendrüsen (Glandula suprarenalis) und bei Frauen die Eierstöcke (Ovarium); die hohlförmigen Organe umfassen Magen (Stomachus), Dick- und Dünndarm (Intestinum crassum und intestinum tenue), Harnblase (Vesica urinaria) und wiederum nur bei Frauen die Gebärmutter (Uterus). Die relative Position der Organe ist in Abb. 3.42 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Leber den größten Raum einnimmt, umgeben vom unteren, rechtsseitigen Brustkorb, während Magen und Milz auf der linken Seite des unteren Brustkorbs angeordnet sind. Die Bauchspeicheldrüse liegt diagonal an der Rückseite des Abdomens. Der **Abdominalbereich** ist nach oben begrenzt durch das Zwerchfell (Diaphragma), das sich über den Eingeweiden (Viscera) als Dom ausbildet und hoch in den Thorax bis in Höhe der Anbindung der vierten Rippe am Sternum hineinragt. Nach unten reicht der Abdominalbereich bis zum knöchernen Becken mit seinen Muskeln. Der obere Teil des Abdomens ist allseitig umschlossen vom Brustkorb und hinten von der Wirbelsäule, die üblicherweise nicht zum Abdominalbereich gezählt wird, demgegenüber wird der mittlere Teil von einer Muskulatur, hinten allerdings wieder von der Lendenwirbelsäule, umgeben. Die Muskulatur reicht bis zum unteren Teil des Abdomens, das nach hinten durch das Kreuzbein und das Steißbein und seitlich durch das Darmbein des Beckens begrenzt wird [23].

Die **Haupt-Blutgefäße** des Abdominalbereichs sind die Bauch-Aorta (Aorta abdominalis) und die untere Hohlvene (Vena cava inferior), die im rückwärtigen Bereich des Abdominalraums rechts vor der Wirbelsäule liegen und von denen Abzweigungen zu allen Stellen des Abdomens führen. Sie erreichen den Abdominalbereich durch eine gesonderte Öffnung im Zwerchfell und teilen sich in Höhe des fünften Lendenwirbels (unmittelbar unter dem Nabel) gabelförmig in die linke und rechte Hüftschlagader und -vene (Arteria und Vena iliaca communis) auf.



**Abb. 3.42** Das Abdomen und seine Organe (nach [4])

Ein Charakteristikum in der Unterscheidung zwischen den kompakten und den Hohlorganen liegt in ihrer Dichte. Die kompakten Organe sind mit Gefäßen ausgestattet, die Flüssigkeiten enthalten, und weisen daher eine höhere Dichte auf als die hohlförmigen Organe. Hinzu kommt, dass die einzelnen Organe von einer mit einem dünnen Flüssigkeitsfilm versehenen Membran umgeben sind; zudem sind einige Organe (z. B. Leber, Milz und Eingeweide) nur lose durch gefaltete Bänder mit ihrer Umgebung verbunden, sodass sie sich relativ leicht gegeneinander verschieben lassen. Diese hohe Mobilität, aber desgleichen die Lokalisation der Abdominalorgane zeigt erhebliche Auswirkungen hinsichtlich der **Verletzungsmechanik**: So ergeben Experimente an Körperteilen in liegender, sitzender oder aufrechter Position völlig unterschiedliche Resultate, weil das zu untersuchende Abdominalorgan in unterschiedlichen Richtungen ausweichen kann. Darüber hinaus sind die Ergebnisse davon abhängig, ob ein Organ unmittelbar vor der Wirbelsäule angeordnet ist, bei dem z. B. das Risiko, bei einem Frontalanprall zerdrückt zu werden, größer ist als bei einem Organ, das sich seitlich neben der Wirbelsäule befindet. Ähnliche Unterschiede lassen sich beim Vergleich der beiden Nieren zeigen: Die rechte Niere liegt aufgrund des Vorhandenseins der Leber üblicherweise etwas tiefer als die linke Niere und ist wegen der fehlenden Schutzwirkung durch die unteren Rippen stärker gefährdet als die linke Niere. Dies gilt im Grunde genommen für alle Abdominalorgane, die im Bereich des unteren Brustkorbs angeordnet sind und durch die Rippen einen gewissen Schutz genießen. Obgleich sie wegen der nur indirekten Anbindung am Sternum nicht so steif sind wie die

oberen Rippen, bieten die unteren Rippen immerhin noch eine lastverteilende Fläche und damit einen gewissen Widerstand gegen Verformung, insbesondere bei stumpfer Gewalt von der Seite oder von hinten [23].

Die **Leber** (Hepar) ist das größte der kompakten Organe im Abdomen und weist bei Einwirkung stumpfer Gewalt die höchste Mortalitätsrate auf [23]. Derartige Verletzungen können bei einer Beanspruchung mit niedriger Geschwindigkeit aus einfachen Kompressionen gegen die Wirbelsäule oder die rückwärtige Abdominalwand resultieren, es können aber auch viskose Verletzungen auftreten, bei denen sich bei hoher Beanspruchung innerhalb der Leber ein Flüssigkeitsdruck aufbaut und zu ausgedehnten Zug- und Scherbelastungen führt. Zudem kann die Leber durch Relativbewegung gegenüber ihrer Umgebung bei hohen Beschleunigungen verletzt werden; die Verletzungen treten dann üblicherweise an den Anbindungsstellen auf und lassen sich auf Überdehnungen der Bänder und Blutgefäße zurückführen. Schließlich können Leberrisse durch Penetration gebrochener Rippen beim Auftreten stumpfer Gewalt hervorgerufen werden.

Aufgrund der stark mit Gefäßen durchsetzten Struktur der **Milz** (Lien) zeigt sich bei traumatischen Organ-Zerstörungen ein bedeutsam hohes Sterblichkeitsrisiko. Bei den zwei klassischen Verletzungsmechanismen der Milz, wie sie in [23] unterschieden werden, handelt es sich einmal um einen Stoß gegen den linken unteren Bereich des Abdomens, bei dem die Milz direkt getroffen wird, und zum anderen um ein indirektes Trauma, hervorgerufen durch eine hohe Beschleunigung des Körpers und der daraus resultierenden großen Verlagerung der Milz relativ zu ihrer Anbindungsstelle. Im ersten Fall kann es häufig zu tiefen Einrissen bis hin zu vollständigen Zertrümmerungen des Organs aufgrund des Zusammendrückens bei Beanspruchungen mit niedrigen oder zu viskosen Verletzungen mit höheren Geschwindigkeiten kommen. Verletzungen bei indirekter Beanspruchung treten in Form von Abrissen des Gefäßstiels oder von Rissen der Gefäß- und Nervenstränge an der Milz auf; der Grund dafür ist in der Überdehnung der Anbindung während der Beschleunigungsphase zu sehen.

Die **Nieren** (Niere: Ren) sind, beidseitig der Wirbelsäule liegend, von Muskeln an den Seiten und im rückwärtigen Bereich des Abdomens und vorn von anderen Abdominalorganen umgeben. Ausgehend von dieser anatomischen Anordnung kann für die Nieren ein umfassender Schutz gegen stumpfe Gewalt unterstellt werden, lediglich beim Seitenanprall des Abdomens scheinen Nierenverletzungen überrepräsentiert zu sein. Meist sind jedoch bis zu 90 % aller Nierenverletzungen ohne Penetration von geringer Schwere, sofern die Gewebehaut intakt bleibt [23]. Dabei treten Nieren-Kontusionen (Quetschungen) und leichte Risse unterhalb der umhüllenden Membran auf, die nicht selten von Hämatomen begleitet sind. Verletzungen des Gefäßstiels der Niere resultieren auch hier aus der Relativbewegung während der Beschleunigung des Körpers, dagegen sind Verletzungen der Gewebehaut meist das Ergebnis eines direkten Stoßes gegen die Niere.

Verletzungen der **Bauchspeicheldrüse** (Pankreas) und des **Zwölffingerdarms** (Duo-denum) sind etwa zu 25 % auf stumpfe Gewalt zurückzuführen [23], wobei es sich dabei häufig um die Zusammenpressung zwischen Fahrzeug-Innenraumteilen und der Wirbelsäule handelt. Die Verletzungen der Bauchspeicheldrüse reichen von oberfläch-

lichen Quetschungen bis zur vollständigen Abtrennung und Zerstörung des Organs. Bei Zwölffingerdarm-Verletzungen treten Blutergüsse und Perforationen mit und ohne Bauchspeicheldrüsen-Verletzungen auf. Es können aber auch Kontusionen und Lazerationen aufgrund des Kontakts mit der Wirbelsäule, Risse durch Abscherung bei Relativbewegungen oder Abrisse durch zunehmenden Innendruck bei zweiseitigem Verschluss stattfinden. Verletzungen der **Eingeweide** (Intestinum) lassen sich im Wesentlichen auf die gleiche Verletzungsmechanik wie Zwölffingerdarm-Verletzungen mit den entsprechenden Verletzungsmustern zurückführen, wobei die Mortalität beim Auftreten stumpfer Gewalt in hohem Maße mit der Anzahl und der Schwere begleitender Verletzungen anderer Organe in der Abdominalregion korreliert [23].

Die **Harnblase** (Vesica urinaria) ist durch ihre Lage innerhalb des knöchernen Beckens gegen stumpfe Gewalteinwirkung relativ gut geschützt; daher treten Verletzungen der Harnblase ohne Beckenbrüche selten in Erscheinung. Kommt es allerdings zu Beckenbrüchen, so können diese zu Rupturen und Lazerationen durch knöcherne Fragmente führen.

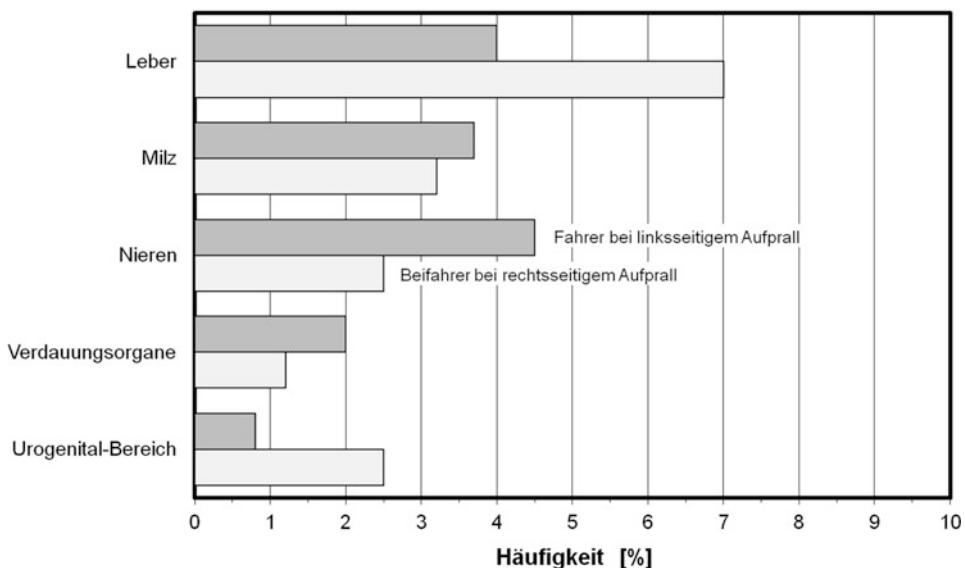
Bei Opfern von Kraftfahrzeugunfällen kommen Verletzungen des **Zwerchfells** (Diaphragma) häufig vor, wobei die Anzahl von Rupturen bei Seitenkollisionen höher ist als bei Frontalkollisionen. Die Verletzungsmechanik des Zwerchfells umfasst Scherbelastungen der gedehnten Membran, Abriss des Zwerchfells von seinen Anbindungen und Übertragung des Flüssigkeitsdrucks innerhalb der Eingeweide.

Verletzungen der großen **Blutgefäße** im Abdominalbereich aufgrund stumpfer Gewalt sind aufgrund ihrer geschützten Lage im rückwärtigen Bereich vor der Wirbelsäule relativ selten. Kommt es allerdings zu Verletzungen, so können sie in Form von Quetschungen, Lazerationen und Abtrennung auftreten und führen dann zu Blutungen, Thrombosen (Blutpfbildung durch Gerinnung), Blutsackbildungen oder arteriovenösen Verbindungen. Eine Traumatisierung der Abdominal-Aorta ist mit hoher Wahrscheinlichkeit tödlich und kann ebenso durch direkte wie indirekte Beanspruchungen hervorgerufen werden.

Der Zusammenhang zwischen den anatomischen Gegebenheiten und der Verletzungsmechanik in der Abdominalregion wird beim Vergleich der Häufigkeit schwerer Verletzungen (AIS > 3) deutlich, die bei **Seitenkollisionen** für den Fahrer bei linksseitigem und für den Beifahrer bei rechtsseitigem Aufprall stattfinden. Die wesentlichen Kontaktstellen dabei waren, einer US-amerikanischen Analyse [24] zufolge, die Fahrzeug-Innenseite (34 %), die Armstütze (29 %) und fahrerseitig das Lenksystem (9 %) bzw. beifahrerseitig das Armaturenbrett mit Handschuhfach (20 %). Die daraus resultierenden Organverletzungen in der Abdominalregion sind in ihrer Häufigkeit in Abb. 3.43 gegenübergestellt. Vergleicht man beispielsweise die Leerverletzungen beim rechtsseitigen mit denen beim linksseitigen Anprall, so lässt sich die nahezu doppelte Häufigkeit auf die anatomische Anordnung der Leber zurückführen.

Dieser Abschnitt wäre ohne eine kurze Darstellung der Abdominalverletzungen aufgrund der Benutzung des **Sicherheitsgurtes** unvollständig. Generell können Abdominalverletzungen durch die Interaktion von Gurtband und Abdomen als stumpfe Gewalteinwirkung aufgefasst werden. Sie lassen sich in Verletzungen durch Submarining, d. h. das Untertauchen des Beckens unter den Beckengurt und dessen Verlagerung in den Abdomi-

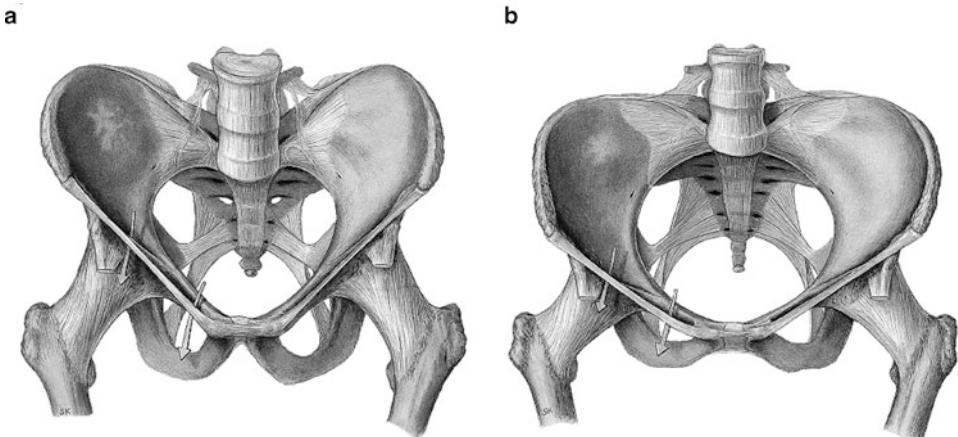
### Belastungsart



**Abb. 3.43** Häufigkeit von schweren Abdominal-Verletzungen (AIS > 3) bei Seitenkollisionen mit links- und rechtsseitigem Aufprall (nach [24])

nalbereich, und in Verletzungen durch Fehlfunktionen bei Gurtbenutzung, wie beispielsweise die Lage des Gurtbandes am Insassen, unterteilen [25]. Die nachlässige Lage des Gurtbandes am Körper, die als **Lage-Anomalie** bezeichnet wird, stellt sich dabei als Hauptursache für Verletzungen angegurteter Insassen bei Kraftfahrzeugunfällen dar [24], während die meisten schweren **Submarining-Verletzungen** erst bei höheren Geschwindigkeitsänderungen (> 50 km/h) auftreten [26]. Dabei soll nicht unerwähnt bleiben, dass angegurtete Insassen zwar ein höheren Risiko für Abdominalverletzungen jedweder Schwere aufweisen, das Risiko für schwere Verletzungen allerdings ist etwa halb so hoch wie bei nicht angegurteten Insassen (vgl. Abschn. 2.4.7).

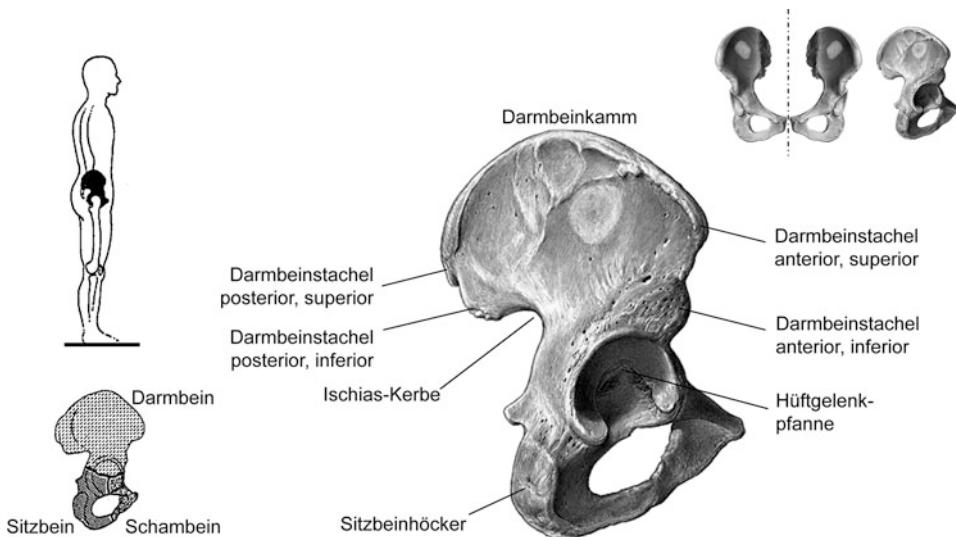
Das **Becken** (Pelvis) ist ein Ringknochen, der als eine die Hauptlast aufnehmende Struktur angesehen werden kann und zwischen dem Oberkörper und den unteren Extremitäten liegt. Daneben trägt das Becken mit seiner nach oben offenen, schüsselartigen Form die Abdominalorgane und bietet ihnen Halt und, zumindest im unteren Bereich, Schutz gegenüber direkter Beanspruchung. Mechanisch gesehen bildet es den einzigen Übertragungsweg des Gewichts von Kopf, Armen und Oberkörper zum Boden. Daher ist die Beckenstruktur auch massiver als die des Kopfes oder des Thorax. Das ringförmige Becken setzt sich aus vier Knochen zusammen: Zwei Hüftknochen (Os coxae) bilden die seitliche und die vordere Begrenzung, das Kreuzbein (Os sacrum) und das Steißbein (Os coccygis) den rückwärtigen Abschluss. Zwischen männlichem und weiblichem Becken bestehen viele Unterschiede, der wesentlichste aber ist in der Form der Beckenöffnung zu sehen,



**Abb. 3.44** Vorderansicht auf ein männliches (a) und ein weibliches Becken (b) (aus [4])

die vollständig von einer knöchernen Struktur umschlossen ist. Abbildung 3.44 zeigt ein männliches und ein weibliches Becken, dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Öffnung beim weiblichen Becken, der Geburtskanal nämlich, annähernd kreisförmig ist, dagegen ist die Öffnung beim männlichen Becken in seinen seitlichen Abmessungen weiter [27].

Der **Hüftknochen** (Os coxae) ist ein großes, relativ flaches und unregelmäßig geformtes, knöchernes Gebilde, das den größten Teil des Beckenrings umfasst. Er besteht aus drei ineinander übergehenden Knochen, dem Darm- oder Weichenbein (Os ilium), dem Sitzbein (Os ischii) und dem Schambein (Os pubis). Die Trennungslinie zwischen diesen verläuft im Bereich der Hüftgelenkpfanne (Acetabulum), sie ist in Abb. 3.45 verdeutlicht. Das **Darmbein** (Os ilium) wird in zwei Bereiche unterteilt, die schräg aufstrebende Schwinge und der Körper, der die Gelenkpfanne des Hüftgelenks bildet. Die meisten der Merkmale und Oberflächeneigenschaften sind von geringer biomechanischer Bedeutung und sollen daher nicht weiter vertieft werden. Allerdings erscheint es hier notwendig, auf eine spezielle Stelle des Darmbeinkamms (Crista iliaca) einzugehen, und zwar den vorderen oberen Darmbeinstachel (Spina iliaca anterior superior). Dieser ist als anatomischer Haltepunkt anzusehen, der verhindern soll, dass der Beckengurt über die Oberkante des Beckens, den Darmbeinkamm also, hinwegrutscht und einen Submarining-Effekt auslöst. Das Darmbein ist an seiner medialen Innenseite durch das Kreuzbein (Os sacrum) verbunden. Diese Innenseite ist mit einer Knorpelschicht überzogen, doch lässt die Verbindungsstelle nur eine begrenzte Relativbewegung zu. Das **Sitzbein** (Os ischii) bildet den unteren rückwärtigen Teil des Hüftknochens und lässt sich in Körper und Ast unterteilen. Zum Sitzbeinkörper zählt das hintere Drittel der Gelenkpfanne. An seiner untersten Stelle geht er in den Sitzhöcker über, der dem unteren Torso beim Sitzen Unterstützung bietet (vgl. Abb. 3.45 und 3.46). Der Sitzbeinast ist ein dünnes, abgeflachtes Teil, das mit dem rückwärtigen Teil des Schambeinastes verbunden ist. Das **Schambein** (Os pubis) selbst ist ein unregelmäßig geformter Knochen,



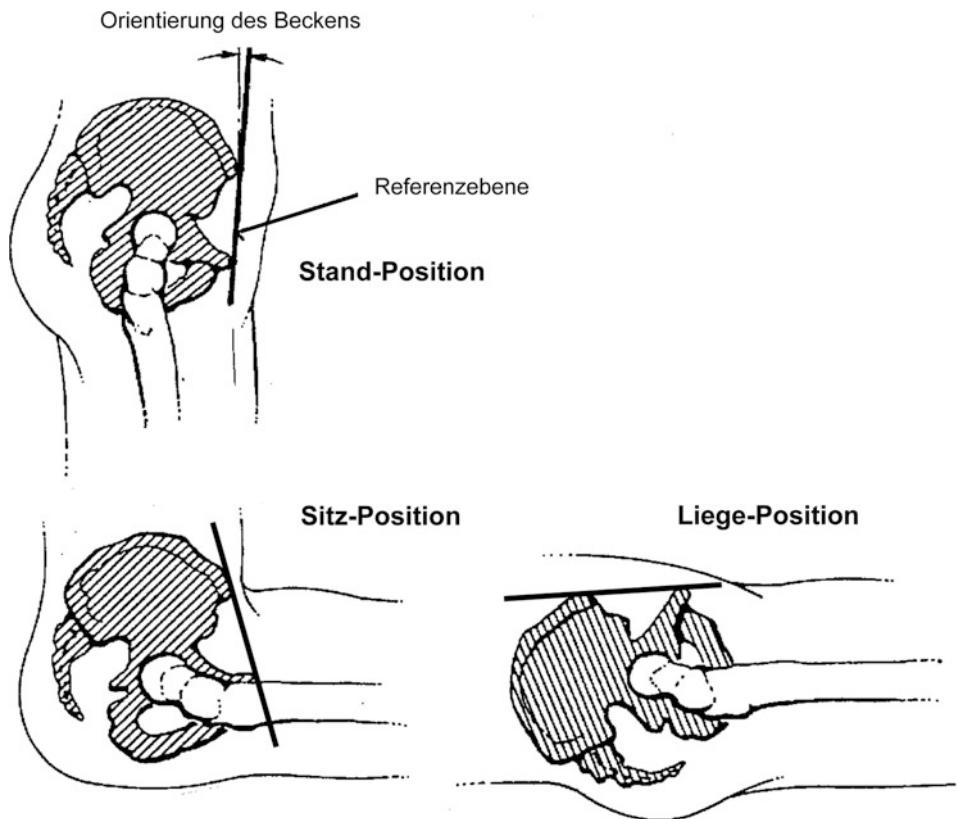
**Abb. 3.45** Der Hüftknochen mit Darmbein, Sitzbein und Schambein (nach [2, 4])

der sich aus einem Körper und zwei Ästen, dem oberen und dem unteren Schambeinast, zusammensetzt. Der Schambeinkörper bildet das vordere Drittel der Gelenkpfanne. Der obere Ast erstreckt sich vom Körper zur mittleren Sagittalebene, wo er sich mit dem Ast der gegenüberliegenden Seite vereinigt. Diese Verbindungsstelle ist die Schambeinfuge (Symphysis pubica), die aufgrund der knorpelartigen Scheibe, die den Spalt zwischen den Knochenenden ausfüllt, ein nur eingeschränkt bewegliches Gelenk bildet. Der untere Schambeinast formt mit dem Sitzbeinast den Bogen zum Sitzbeinhöcker aus, der eine ausgeprägte Öffnung (Foramen obturatum) umschließt, und vereinigt sich an der Schambeinfuge mit dem Ast der gegenüberliegenden Seite [27].

Das Kreuzbein und das Steißbein formen die Rückwand des Beckenrings, wobei das **Kreuzbein** (Os sacrum) ein Zusammenschluss von fünf Wirbeln ist und eine dreieckige Form aufweist. Die seitlichen Flächen bilden ein stabiles Gelenk mit dem Becken und übertragen das Gewicht des unteren Torsos über das Becken je nach Position auf die Beine oder die Sitzhöcker. Das **Steißbein** (Os coccygis) ist ein rudimentärer Schwanz aus drei bis fünf verwachsenen Wirbeln, die allerdings nicht wie normale Wirbelkörper ausgebildet sind, so fehlt ihnen z. B. die rückwärtige Struktur der Dornfortsätze; der letzte Wirbel ist lediglich ein knöchernes Knötchen. Das Gelenk zwischen Kreuz- und Steißbein weist aufgrund der zwischen ihnen liegenden dünnen, knorpeligen Scheibe, die steifer ist als eine normale Bandscheibe, nur eine eingeschränkte Beweglichkeit auf [27].

Die **Orientierung des Beckens** ist aufgrund seiner unregelmäßigen Form schwierig zu quantifizieren. Sie variiert von Person zu Person und zeigt beim Stehen die geringsten Unterschiede gegenüber der Vertikalachse im Vergleich etwa zur Sitz- oder zur liegenden Position auf (Abb. 3.46). Als Referenzebene wird in [27] eine Ebene eingeführt, die sich bei

Seitenansicht als eine Gerade darstellen lässt und durch die vorderen Punkte des oberen Darmbeinstachels und der Schambeinfuge verläuft. Diese insgesamt drei Orientierungspunkte lassen sich leicht abtasten, sodass zu ihrer Ermittlung keine Röntgenaufnahmen erforderlich sind. Bei stehenden Personen beträgt die Orientierung dieser Referenzebene ungefähr  $10^\circ$  (vgl. Abb. 3.46).



**Abb. 3.46** Orientierung des menschlichen Beckens in stehender, aufrecht sitzender und liegender Position (nach [2])

Da der **Oberschenkel** (Regio femoris) mit dem Becken durch das Hüftgelenk verbunden ist und Becken-Verletzungen häufig in diesem Bereich auftreten, soll an dieser Stelle auf die Anatomie des proximalen (oberen) Oberschenkels vorgegriffen werden. Im Einzelnen besteht dieser aus dem Gelenkkopf, dem Hals und der Oberschenkel-Region (vgl. Abb. 3.49). Der Kopf weist eine Kugelform auf und bildet gemeinsam mit der Gelenkpfanne das Hüftgelenk. Die Oberfläche des Gelenkkopfes ist mit einer durchsichtigen Knorpelschicht versehen. Die hohe Beweglichkeit erhalten derartige Gelenke durch die Absonderung von Gelenkschmierse. Die Blutversorgung erfolgt über den Oberschenkelhals, die Struktur unterhalb des Gelenkkopfes. Dieser Hals hat die Form eines Kegelstumpfes und

verbindet den Kopf mit dem restlichen Oberschenkel; seine Achse bildet mit dem Oberschenkelschaft einen Winkel von ungefähr 125 Grad, bei Frauen kann der Winkel weniger als 90 Grad sein [27]. Die obere Region des proximalen Oberschenkelschaftes wird durch die Rollhügel (Trochanter) charakterisiert, den nach außen gerichteten Trochanter (größerer Trochanter oder T. major) und den einwärts liegenden (kleinerer Trochanter oder T. minor).

Der nachfolgende Überblick zur **Verletzungsmechanik des Beckens** und zu den dabei auftretenden Verletzungsmustern ist auszugsweise aus [27] entnommen; er umfasst sowohl Beckenverletzungen als auch Verletzungen des Hüftgelenks und des proximalen Oberschenkels. Die Erweiterung auf das Hüftgelenk und den Oberschenkel ist erforderlich, da deren Verletzungen häufig gleichzeitig mit Verletzungen des Beckens einhergehen.

**Isolierte Beckenverletzungen**, die bei Kraftfahrzeugunfällen vorkommen, lassen sich in drei Bereiche klassifizieren: Singuläre Frakturen des Beckenrings, zwei- oder mehrfache Frakturen des Beckenrings sowie Frakturen des Kreuz- und des Steißbeins. Findet nur eine **einfache Beckenring-Fraktur** statt, so entsteht keine bedeutsame Verlagerung des gebrochenen Segments. Beispiele isolierter Frakturen sind einseitige Brüche des oberen oder des unteren Schambeinastes, aber auch beider Äste; sie erfordern keinen chirurgischen Eingriff. Andere isolierte Frakturen umfassen einfache Brüche des Darmbeins verbunden mit leichter Trennung oder vollständiger Aufspaltung der Schambeinfuge und Verschiebung (Subluxation) des Kreuzbeins. Diese Verletzungen resultieren aus leichteren Anprall-situationen. Bei Seitenkollisionen mit einem Anprall gegen den oberen Außenrand des proximalen Oberschenkels, den größeren Trochanter, treten Frakturen der Schambeinäste häufig auf. Durch **multiple Frakturen** wird der Beckenring instabil, sie sind daher üblicherweise mit großen Verschiebungen der Fragmente verbunden. Die zwei wesentlichen Verletzungsarten sind Frakturen nur des Schambeins oder Brüche des Schambeinknochens in Verbindung mit Frakturen des Darmbeins. Multiple Verletzungen des Schambeins umfassen zwei oder mehr Frakturen des Astes und haben eine Verlagerung der Schambeinfuge zur Folge. Sie treten bei Fußgängern auf, die von Kraftfahrzeugen seitlich am Becken getroffen werden, im Allgemeinen auf der stoßabgewandten Seite. Obwohl chirurgische Eingriffe nicht erforderlich sind, können dabei Verletzungen der Harnwege, z. B. Rupturen der Harnröhre, auftreten, sodass ein künstlicher Ausgang an der Blase notwendig wird. Der am häufigsten auftretende Typ kombinierter Verletzungen des Darmbein- und des Schambein-Segments ist in der Verschiebung der Schambeinfuge mit gleichzeitiger Verlagerung des Kreuz-/Darmbein-Gelenks zu sehen. Daneben kommt es auch zu Frakturen des Darmbeins begleitet durch Verschiebung der Schambeinfuge oder durch Frakturen der beiden Äste bei gleichseitiger Dislokation des Kreuz-/Darmbein-Gelenks. Auch hier sind Verletzungen der Harnwege und der Blase üblich. Derartige Verletzungen werden, im Gegensatz zur Verletzungsmechanik bei der seitlichen Beanspruchung im vorgenannten Fall, durch eine bei Frontalkollisionen typische, von vorn nach hinten gerichtete Belastung hervorgerufen. Ausgedehnte Beckenverletzungen können aus **Frakturen des Kreuzbeins** resultieren, die üblicherweise in der Umgebung der Belastungskonzentration, z. B. quer durch die Foramina, liegen. Da durch diese von knöchernen Bogen umgebene

Löcher die Kreuzbein-Nervenstränge verlaufen, können Kreuzbein-Frakturen mit Verletzungen der Nerven verbunden sein. Eine ausreichend hohe vertikale Beschleunigung kann Kompressionen und eine Einbuße der Höhe des Kreuzbeins zur Folge haben. **Verletzungen des Steißbeins** treten bei vertikalen Beanspruchungen in Sitzposition auf und können Kontusionen, Frakturen oder Dislokationen des Steißbeins zur Folge haben. Obgleich derartige Verletzungen nicht schwerwiegend sind, können sie äußerst schmerhaft sein. Die meisten **Gewebe- und Gefäßverletzungen** in Verbindung mit Beckenfrakturen führen zu Blutungen, die durch große Blutgefäße an der Beckenwand und durch die gebrochene Oberfläche selbst hervorgerufen werden. Das Ausmaß des Blutverlustes kann sehr groß sein und ist nur durch Abbinden der inneren Hüftschlagader möglich. Bei Beckenfrakturen treten üblicherweise weitere Abdominalverletzungen auf, sie wurden aber bereits oben behandelt.

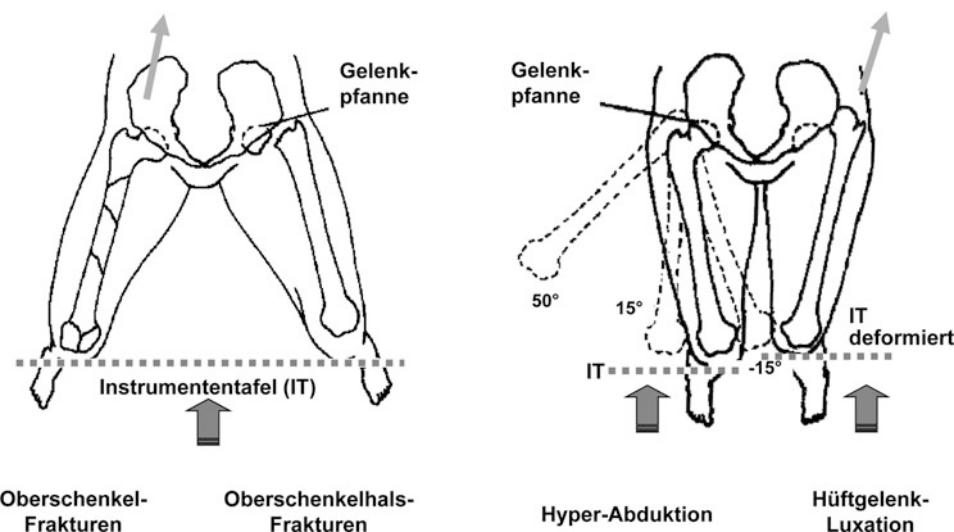
**Verletzungen am Hüftgelenk** treten entweder direkt im Gelenk oder in seiner unmittelbaren Umgebung auf und beeinträchtigen eine oder mehrere der folgenden Strukturen: Gelenkpfanne (Acetabulum), Oberschenkelkopf (Caput femoris) und proximaler Oberschenkel (Regio femoris proximalis). Bei jüngeren Menschen können Beschädigungen am proximalen Endstück des Oberschenkels auftreten, bei älteren dagegen treten Verletzungen häufiger an der Hüfte aufgrund der Knochenversprödung (Spontanverformung) und der abnehmenden Elastizität auf. Bei äußerer Beanspruchung lassen sich Hüftverletzungen in zwei Hauptgruppen unterteilen: Traumatisch bedingte Hüftverrenkungen und Frakturen des Oberschenkelhalses (vgl. Abb. 3.47).

Eine **Hüftverrenkung** (Dislokation) erfolgt relativ häufig in sitzender Position durch eine rückwärtige Beanspruchung entlang des Oberschenkels, da in dieser Position das Hüftgelenk durch keine knöcherne Struktur gehalten wird. Fahrzeuginsassen, die einer Frontalkollision ausgesetzt sind und ihre Beine übereinander geschlagen haben, setzen sich dieser Gefahr aus. Ist hingegen der Beugungswinkel zwischen Hüfte und Oberschenkel etwas größer, können bei vergleichbarer Beanspruchung **Frakturen des rückwärtigen Gelenkpfannenrandes** zusammen mit Dislokationen des Hüftgelenks auftreten. Daneben sind auch Dislokationen in entgegengesetzter Richtung, also nach vorn, denkbar: wird beispielsweise der untere Torso bei einer Frontalkollision im Sitz durch den Beckengurt festgehalten, während sich die Oberschenkel aufgrund der Trägheit weiterbewegen, sind nach vorn (anterior) gerichtete Ausrenkungen des Hüftgelenks möglich. Bei einer lateralen Belastung der Hüfte, z. B. bei Seitenkollisionen, kann es zu einer zentralen Dislokation mit **Frakturen der Gelenkpfanne** kommen. Wird dabei der stoßseitig sitzende Insasse durch die harte Struktur der Tür in Höhe des großen Trochanter am Ende des proximalen Oberschenkels getroffen, so kann daraus folgen, dass der Gelenkkopf die nur dünne Wand der Gelenkpfanne durchstößt. Derartige Verletzungen können allerdings auch in stehender Position, z. B. bei Fußgängerunfällen, auftreten. Bei rückwärts gerichteten Dislokationen des Hüftgelenks, bei denen Frakturen des Gelenkpfannenrandes auftreten, kann auch eine **Fraktur des Gelenkkopfes** erfolgen; dabei besteht die Gefahr einer langfristigen Beeinträchtigung durch eine traumatisch bedingte Gelenkentzündung. Hüftgelenk-Dislokationen, die be-

gleitet werden durch **Verletzungen des Oberschenkelhalses** sind relativ selten und treten in der Regel nur bei älteren Menschen auf. Die Verletzungsmechanik resultiert aus einer hohen Biegedehnungsbeanspruchung des Oberschenkelhalses, die bei Dislokation des Hüftgelenks eine Fraktur des Halses hervorrufen kann. Die Folge derartiger Verletzungen ist häufig Knochenfraß am Gelenkkopf aufgrund unzureichender Blutzufuhr. Dislokationen mit einer **Fraktur des Oberschenkelschaftes** sind ebenfalls selten und ihre Verletzungsmechanik zudem weitgehend unbekannt. Doch lässt der quer verlaufende Bruch häufig auf eine Biegung des Schaftes schließen.

Die isolierten **Frakturen des Oberschenkelhalses** lassen sich in zwei Gruppen unterteilen, innerhalb und außerhalb des fibrösen Gewebes, das das Hüftgelenk umschließt. Diese Hüftgelenk-Kapsel erstreckt sich vom Becken bis zum intertrochantrischen Kamm zwischen den Rollhügeln (Trochanter) am proximalen Oberschenkel. Findet eine Fraktur innerhalb der Kapsel statt, so handelt es sich üblicherweise um eine Fraktur am unteren Rand des Gelenkkopfes oder um eine Fraktur des Oberschenkelhalses. Frakturen außerhalb der Kapsel können entweder zwischen den Trochantern oder an ihnen selbst auftreten.

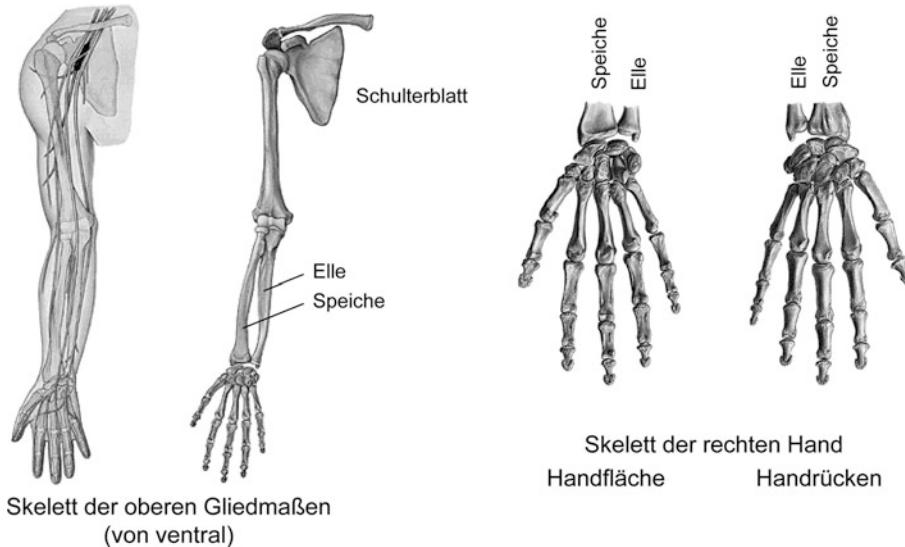
Eine Übersicht zu **Verletzungsmechanismen** des Beckens, des Hüftgelenks und des proximalen Oberschenkels bei sagittal belasteten PKW-Insassen zeigen die Darstellungen in Abb. 3.47. Dabei erfolgt die Beanspruchung durch die Einleitung der Knie/Instrumententafel-Kontaktkräfte in Oberschenkel und Hüftbereich; sie bewirkt bei ausreichend hoher Unfallschwere Frakturen des Oberschenkelschaftes, des Oberschenkelhalses oder der Hüftgelenkregion. Je nach Größe der Oberschenkelspreizung können aber auch Hyper-Abduktionen und Luxationen des Hüftgelenks auftreten.



**Abb. 3.47** Verletzungsmechanismen des Beckens, des Hüftgelenks und des proximalen Oberschenkels bei sagittal belasteten PKW-Insassen (nach [28])

### 3.1.5 Die Extremitäten

Mit Extremitäten werden die äußersten Enden (des Körpers) bezeichnet, beim Menschen sind dies die Gliedmaßen Arme und Beine.

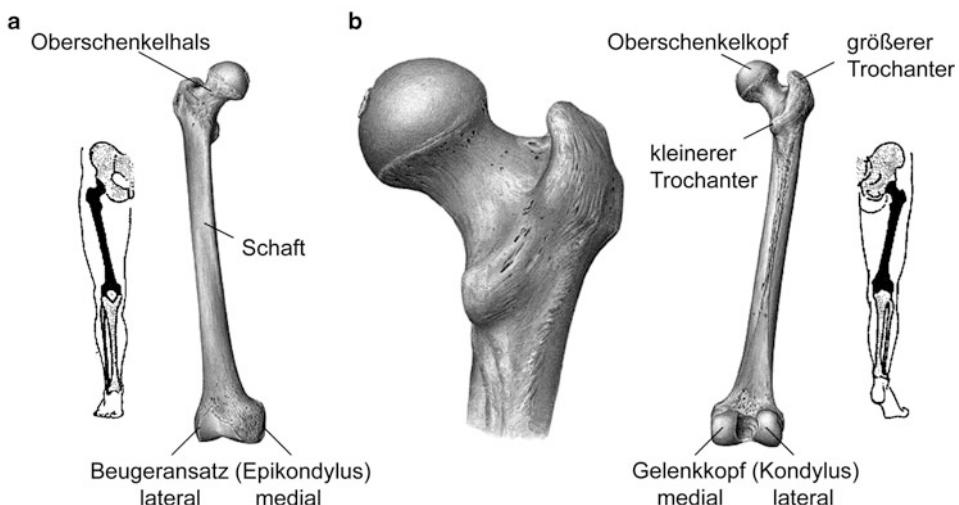


**Abb. 3.48** Arm- und Hand-Skelett (nach [4])

Der **Arm** (Brachium) besteht aus Oberarm, Unterarm und Hand (Abb. 3.48); der Oberarm ist am Schultergelenk (Articulatio humeri) über das Schulterblatt (Scapula) mit dem Rabenschnabelfortsatz (Processus coracoideus) und das Schlüsselbein (Clavica) äußerst flexibel mit dem Torso verbunden. Die knöcherne Grundlage des Oberarms bildet der Oberarmknochen (Humerus), beim Unterarm sind es die Elle (Ulna) und Speiche (Radius) und bei der Hand die aus acht Knochen bestehende Handwurzel (Corpus), die aus fünf Knochen bestehende Mittelhand (Metacarpus) und die beim Daumen aus zwei, bei den übrigen Fingern aus drei Knochen bestehenden Finger (Phalangen). Die Kombination unterschiedlich gebauter Gelenke (Schultergelenk: Kugel-, Ellbogengelenk: Drehscharnier-, Handgelenk: Ei- und Fingergelenk: Scharniergelenk) und die Opponierbarkeit des Daumens geben dem Arm und der Hand ihre einzigartige Bewegungs- und Funktionsfähigkeit. Vom Rumpf kommende Muskeln bewegen den Arm im Schultergelenk (Vor- und Rückwärtsbewegung, Ad- und Abduktion, Rotationsbewegung). Der vorn am Oberarm liegende Beuger (Musculus biceps brachii) und der hinten liegende Strecker (Musculus triceps brachii) wirken auf Schulter- und Ellbogengelenk. Die am Unterarm liegende Muskulatur bewirkt Bewegungen des Unterarms (Drehbewegung: Pronation und Supination) und wirkt auf das Handgelenk und die Daumen- und Fingergelenke (Beugung und Streckung). Die Feineinstellung der Finger und des Daumens erfolgt durch die kurzen, kleinen Handmuskeln. Die großen Nervenstämme und Blutgefäße gelangen durch die Achselhöhle zum

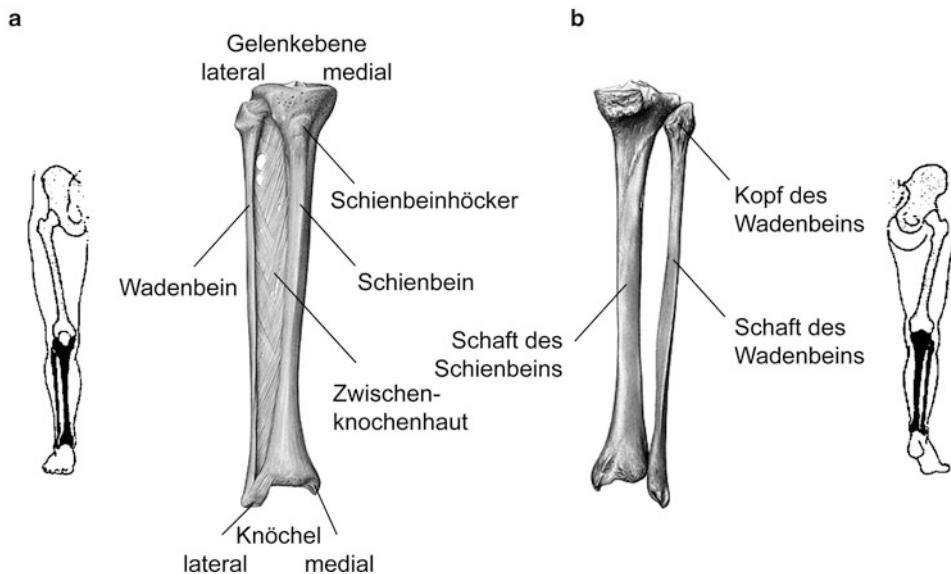
Arm. Die Oberarm-Schlagader (Arteria brachialis) liegt an der Innenseite in der Bizepsfurche und verzweigt sich im Bereich der Ellenbeuge. Zwei große Äste werden entsprechend den Unterarmknochen als Arteria radialis und Arteria ulnaris bezeichnet. Die Pulsationen der Arteria radialis sind am Übergang auf die Hand fühlbar. Die tiefen Armvenen begleiten die Arterien, die oberflächlichen bilden variable Muster und werden häufig bei intravenösen Injektionen oder zur Blutentnahme punktiert. Die Nerven des Arms gehen mit drei großen Stämmen aus dem Armgeflecht (Plexus brachialis) hervor; ihre wesentlichen Äste sind der Mittelnerv (Nervus medianus), der Speichennerv (Nervus radialis) und der Ellen-nerv (nervus ulnaris). Der Nervus radialis umschlingt den Oberarmknochen nach hinten und ist hier sehr verletzungsgefährdet. Ähnlich gefährdet ist der Nervus ulnaris an der Rückfläche des Ellenbogengelenks („Musikantenknochen“), wo er bei Stoß gereizt werden kann [29].

Das Knochengerüst des menschlichen **Beins** besteht aus einem Oberschenkel-, zwei Unterschenkelknochen und den Knochen des Fußes. Der Oberschenkelknochen (Femur) ist der stärkste Röhrenknochen des Körpers (Abb. 3.49). Sein Schaft geht oben in ein winklig abgesetztes Stück, den Schenkelhals, über, der die kugelige Gelenkfläche des Oberschenkelkopfes trägt; dieser bildet zusammen mit der ihn umgreifenden Hüftgelenkpfanne (Acetabulum) das Hüftgelenk. Das untere Ende verbreitert sich zu zwei mächtigen Gelenkkronen, deren überknorpelte Flächen die obere Gelenkfläche für das Kniegelenk bilden.



**Abb. 3.49** Oberschenkelknochen, Ansicht von vorn (a) und von hinten (b) (nach [2, 4])

Die Knochen des Unterschenkels (Abb. 3.50) sind das nach innen liegende, stärkere und mit scharfer Kante unter der Haut der Vorderseite des Unterschenkels vorspringende Schienbein (Tibia) und das schlankere, außen gelegene Wadenbein (Fibula). Beide Knochen werden durch eine als Ursprungsfläche für Muskeln dienende Zwischenhaut verbunden. Der Raum zwischen den Gelenkhöckern des Oberschenkels und den bei-



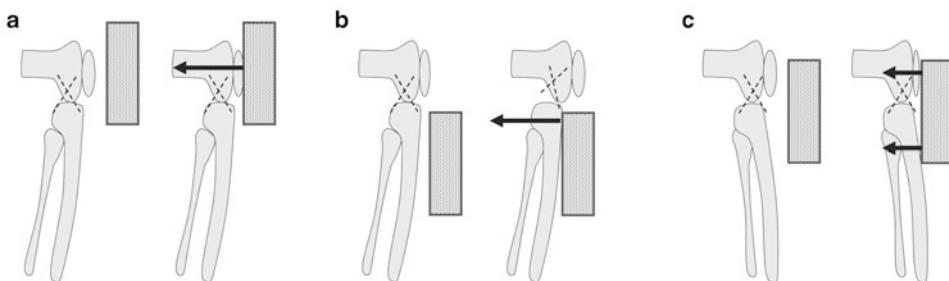
**Abb. 3.50** Unterschenkelknochen mit Schien- und Wadenbein, Ansicht von vorn (a) und von hinten (b) (nach [2, 4])



**Abb. 3.51** Kniegelenk mit Kniescheibe und Bändern, Ansicht von vorn (a), von hinten (b) und von oben (c) (nach [4])

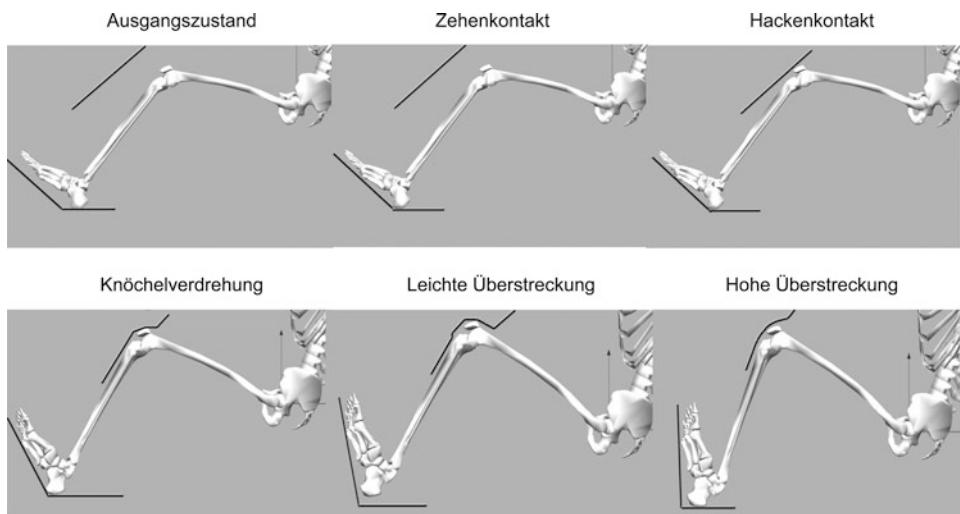
den Gelenkflächen des Schienbeins wird von halbrunden, im Querschnitt keilförmigen Knorpelscheiben (Menisken) ausgefüllt (Abb. 3.51). Von der Rinne zwischen den Gelenkhöckern ziehen zwei sich überkreuzende starke, bei jeder Stellung des Knies sich anspannende und damit dieses sichernde Bänder (Kreuzbänder) nach vorn und hinten zum Mittelrand des Schienbeins.

In die durch Bänder verstärkte Gelenkkapsel ist vorn die Kniescheibe (Patella) eingelassen. In Abhängigkeit von der Krafteinleitung kann sich ein sehr unterschiedliches Verletzungsrisiko für Bänderrupturen einstellen: So wird in [30] von einem geringen Risiko ausgegangen, wenn die Ableitung der Knie-Kontaktkraft in Oberschenkel und Becken nur über die Kniescheibe erfolgt (Abb. 3.52a). Eine erhebliche Verschiebung zwischen Unterschenkel und Kniegelenk resultiert aus einer Krafteinleitung in den Schienbeinhöcker (Abb. 3.52b), da bereits bei geringen Belastungen eine große Gefahr für Bandrupturen besteht. Reduziert wird diese Gefahr wegen der geringeren Relativverschiebung im Kniegelenk, wenn die Kontaktkraft sowohl in die Kniescheibe als auch in das Schienbein eingeleitet wird (Abb. 3.52c). Wird die Betrachtung auf die unteren Extremitäten erweitert, so wird sich mit zunehmender Becken-Verlagerung nach vorn ein Knie-Kontakt mit der unteren Instrumententafel einstellen (Abb. 3.53). Zusätzlich erfolgt durch die Intrusion im Fußraum eine Einschränkung des Bewegungsraumes und es kommt zu einer Hyper-Flexion des Fußgelenks und aufgrund der Fesselung des Kniegelenks an der deformierten Instrumententafel zu einer Druck-/Biege-Bandspruchung des Unterschenkels mit einem hohen Risiko für Frakturen der unteren Extremitäten.



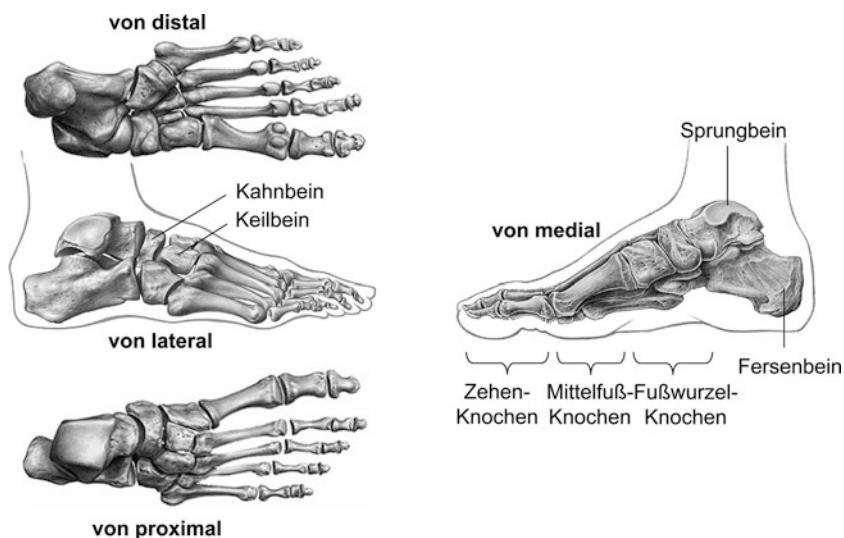
**Abb. 3.52** Verschiebungstendenzen im Kniegelenk in Abhängigkeit von der Art der Krafteinleitung (aus [30, 31])

Die unteren Enden von Schienbein und Wadenbein bilden außen die beiden Knöchel und innen eine Gelenkfläche für das obere Sprunggelenk. Die Fußgelenke (Artikulationes pedis) umfassen ein zwischen den beiden Knöcheln gelegenes oberes Sprunggelenk (Knöchelgelenk, ein Scharniergelenk für das Heben und Senken des Fußes) und ein unteres Sprunggelenk (für drehende Fußbewegungen). Der durch diese Gelenke mit dem Unterschenkel verbundene Fuß (Pes) setzt sich zusammen aus der Fußwurzel (Tarsus) mit den Fußwurzelknochen (Tarsalia), dem Mittelfuß (Metatarsus) mit den lang gestreckten, durch straffe Bänder miteinander verbundenen Mittelfußknochen (Metatarsalia) und den Ze-



**Abb. 3.53** Verletzungskinematik der unteren Extremitäten bei Frontalkollisionen (nach [32])

hen. Die ursprünglich zwölf Skelettelemente der Fußwurzel sind häufig reduziert und verschmolzen; beim Menschen besteht das Fußskelett aus den Knochen der fünf (zwei- bzw. dreigliedrigen) Zehen, den sieben Fußwurzelknochen (Fersenbein, Sprungbein, Kahnbein, Würfelbein sowie äußeres, mittleres und inneres Keilbein) und den fünf Mittelfußknochen (Abb. 3.54). An der Unterseite ist ein Fußgewölbe ausgebildet, das sich an drei durch Ballen

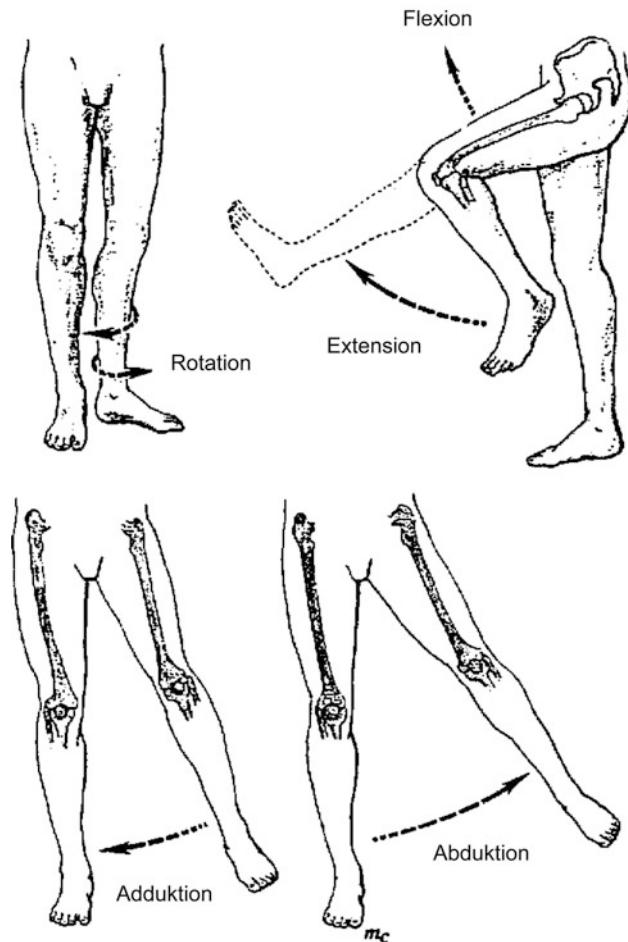


**Abb. 3.54** Fuß-Skelett, von verschiedenen Ansichten aus gesehen (nach [4])

gepolsterten Stellen (Fersenbein und die Enden des inneren und äußeren Mittelfußknochens) vom Boden abstützt.

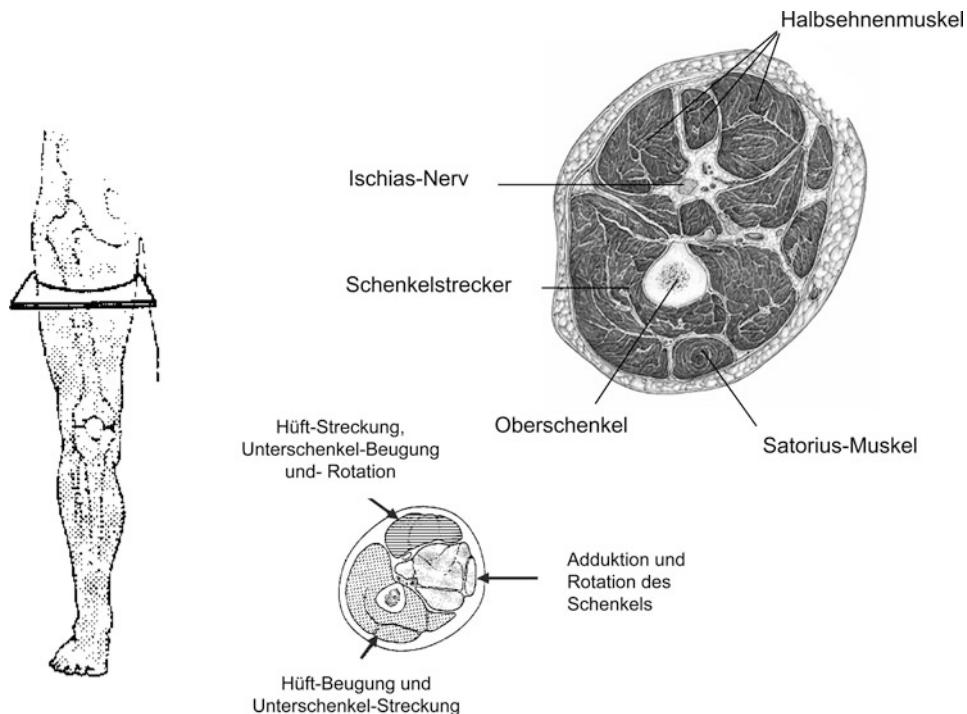
Die einzelnen Bewegungsmöglichkeiten des Ober- und des Unterschenkels, die in Abb. 3.55 dargestellt sind, werden durch die Muskeln hervorgerufen; nach [2] unterscheidet man Flexion, Extension und Rotation sowie Abduktion (Abstrecken) und Adduktion (Anziehen). Die Muskeln, die das Bein im Hüftgelenk bewegen, entspringen aus dem Becken und der Wirbelsäule.

**Abb. 3.55** Bewegungsmöglichkeiten des Ober- und des Unterschenkels (nach [2])



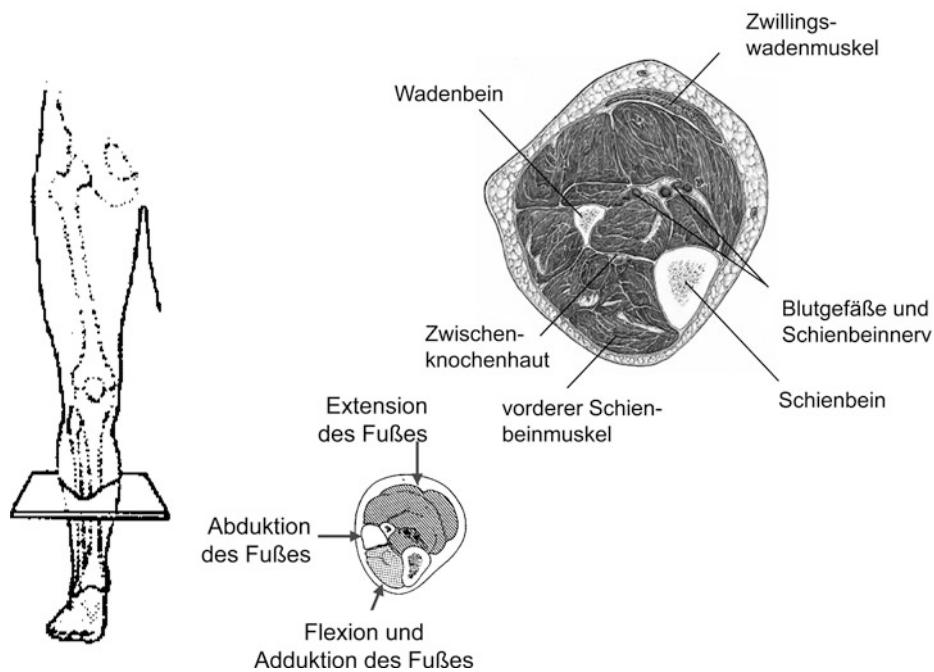
Die Hüftbeuger (für Flexion) liegen vorn, die Hüftstretcher (für Extension), besonders der große Gesäßmuskel, liegen hinten, die Abstretker (Abduktoren) außen und die Anzieher (Adduktoren) innen (Abb. 3.56). Die Strecker des Unterschenkels liegen auf der Vorderseite; die Kniebeuger, deren Sehnen bei gebeugtem Knie in der Kniekehle links und rechts als zwei kräftige Sehnenstränge zu fühlen sind, liegen hinten (Abb. 3.57). Der kräftigste Muskel am Unterschenkel ist der dreiköpfige Wadenmuskel (Musculus triceps surae), der

aus dem zweiköpfigen Zwillingswadenmuskel (Musculus gastrocnemius) und dem Schollenmuskel (Musculus solens) besteht; mit der Achillessehne setzt er am Fersenbein an. Die Beinarterie (Arteria femoralis), gelangt unter dem Leistenband in die Schenkelgegend und verläuft an der Vorderseite des Oberschenkels, tritt dann durch einen Muskelkanal im letzten Viertel des Oberschenkels nach hinten in die Kniekehle und teilt sich in zwei Hauptäste. Die Nerven für Haut und Muskeln des Beins stammen von einem aus Lenden- und Sakralmark hervorgehenden Nervengeflecht. Der größte ist der Ischiasnerv (Nervus ischiadicus); er tritt in der Gesäßmuskelgegend aus dem Beckeninneren heraus, zieht sich auf der Hinterseite des Oberschenkels entlang zur Kniekehle und teilt sich dort in zwei Äste [29].



**Abb. 3.56** Schnittansicht des Oberschenkels mit Knochen, Muskulatur, Blutgefäßen und Nerven (nach [2, 4])

Die Verletzungen der oberen Extremitäten von Verkehrsteilnehmern sind zwar in ihrer Häufigkeit mit ca. 29 % relativ stark vertreten (für PKW-Insassen vgl. Abb. 3.2), wegen ihrer geringen Verletzungsschwere und damit ihrer niedrigen Verletzungsfolgekosten jedoch von untergeordneter Bedeutung [33]. Daneben sind anatomischer Aufbau der Arme, wie die Übersicht zum Skelett der Extremitäten in Tab. 3.1 zeigt, aber auch Verletzungsentstehung und -muster in weitem Umfang vergleichbar mit den Gegebenheiten der Beine, sodass nachfolgend im Wesentlichen auf die **Verletzungsmechanik der unteren Extremitäten** eingegangen werden soll.



**Abb. 3.57** Schnittansicht des Unterschenkels mit Knochen, Muskulatur, Blutgefäßen und Nerven (nach [2, 4])

**Tab. 3.1** Übersicht zum skelettalen Aufbau der Extremitäten

Arm	Bein
Oberarm-Knochen	Oberschenkel-Knochen
entfällt	Kniescheibe
Elle	Wadenbein
Speiche	Schienbein
8 Handwurzel-Knochen	7 Fußwurzel-Knochen
5 Mittelhand-Knochen	5 Mittelfuß-Knochen
5 Finger mit 2 bzw. 3 Finger-Knochen	5 Zehen mit 2 bzw. 3 Zehen-Knochen

Die meisten knöchernen Komponenten der Extremitäten sind durch lange, rohrförmige Knochen gekennzeichnet, bei denen man das Mittelstück (Diaphyse), das proximal oder distal gelegene End- bzw. Gelenkstück (Epiphysen) und die zwischen Mittel- und Endstücke gelegene Längenwachstumszone (Metaphyse) unterscheidet. Diese Knochenabschnitte weisen aufgrund ihres verschiedenartigen Knochengewebes erhebliche Unterschiede in ihren biomechanischen Eigenschaften auf. Die Verletzungsmuster der Mittelstücke glei-

chen dem Schadensbild eines entsprechend beanspruchten zylindrischen Rohres, während die Verletzungsmuster der Endstücke und der Längenwachstumszonen aufgrund ihres variablen Knochenaufbaus schwerer zu systematisieren sind. Eine **Fraktur** ist ein Bruch des Knochengerütes; dabei unterscheidet man Frakturen mit und ohne Verlagerung der Knochenfragmente. Bei einer Fraktur ohne Verlagerung befinden sich die Fragmente noch in ihrer normalen anatomischen Position, so z. B., wenn Risse im Knochen entstehen, der Knochen also angebrochen ist. Diese Frakturen resultieren üblicherweise aus einer **direkten Beanspruchung** mit relativ geringer Energie, während Frakturen mit Fragmentverlagerungen einen höheren Energiebedarf aufweisen. Treten Frakturen in gewisser Entfernung von der Beanspruchungsstelle auf, so spricht man von **indirekter Beanspruchung**; dieser Verletzungstyp ist im Unfallgeschehen relativ häufig vertreten. Eine Zugbelastung des Knochens hat beispielsweise eine quer zur Kraft verlaufende Fraktur (Quer-Bruch) zur Folge. Abriss-Frakturen, bei denen ein Knochenstück durch eine Belastung der Bänder oder Sehnen herausgerissen wird, treten üblicherweise ebenfalls senkrecht zur Wirkrichtung der Kraft auf. Eine Biegungsbeanspruchung an einem langen Röhrenknochen wird eine Doppelfraktur mit dreiecksförmigem Fragment und eine Torsion einen Spiralbruch hervorrufen. Wirkt eine Kompressionsbeanspruchung auf einen Knochen entlang seiner Längsachse, so werden ein Längsriss im Knochen und eine Kompressionsfraktur innerhalb des Gelenks entstehen. Schließlich unterscheidet man noch den schrägwinkligen Bruch, der durch eine kombinierte Beanspruchung aus Biegung und Längsbelastung oder Biegung mit Torsion und Längsbelastung hervorgerufen wird [34]. In Abb. 3.58 sind die verschiedenen Frakturen unter Berücksichtigung der jeweiligen Beanspruchung zusammengefasst.

Knochenbrüche lassen sich aber auch nach klinischen Kriterien unterscheiden, und zwar in **offene oder geschlossene Frakturen** [3]. Eine geschlossene Fraktur liegt vor, wenn Haut und Gewebe in unmittelbarer Umgebung der Fraktur unverletzt bleiben; der Knochen wird keiner äußeren Verunreinigung ausgesetzt. Eine offene Fraktur hingegen liegt vor, wenn ein Objekt die Haut und das Gewebe durchdringt, verletzt und der darunterliegende Knochen bei Kontakt bricht oder wenn der gebrochene Knochen selbst Haut- und Gewebeverletzungen hervorruft; hier besteht also eine Infektionsgefahr. Dabei muss das Fehlen einer Wunde jedoch nicht notwendigerweise bedeuten, dass keine Beschädigung der Haut und des Gewebes erfolgt, vielmehr sind sogar erhebliche Verletzungen zwischen der Haut und dem Knochen möglich, ohne dass eine offene Wunde vorliegt.

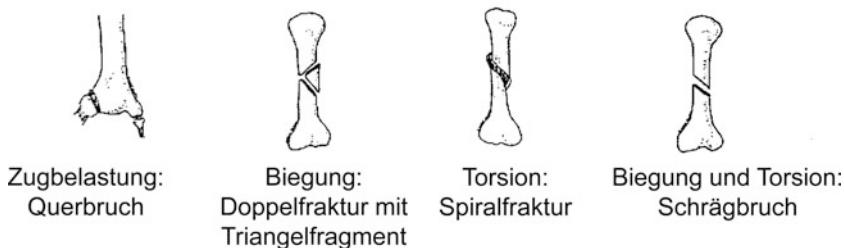
Bei der Verletzung von Extremitäten können Verschiebungen, so genannte **Luxationen**, auftreten, bei denen die Gelenkkenden der Knochen sich vollständig voneinander lösen; es besteht dann kein Kontakt mehr zwischen den Gelenkflächen. Bleiben die Gelenkflächen allerdings zusammen, so spricht man von einer Subluxation. Ähnlich der oben beschriebenen Unterscheidung zwischen offener und geschlossener Fraktur, kann man auch bei der Dislokation offene und geschlossene Luxationen unterscheiden.

Bänder bestehen aus Sehnen und fibrösem Gewebe und dienen dazu, Gelenke zusammenzuhalten und abnormale Gelenkbewegungen zu vermeiden; sie sind üblicherweise eng mit den Gelenkkapseln umgeben. **Verletzungen der Bänder** lassen sich in drei Typen

### Direkte Beanspruchung



### Indirekte Beanspruchung



**Abb. 3.58** Zusammenfassung der Knochenfrakturen nach Verletzungstyp und Beanspruchungsart (nach [34])

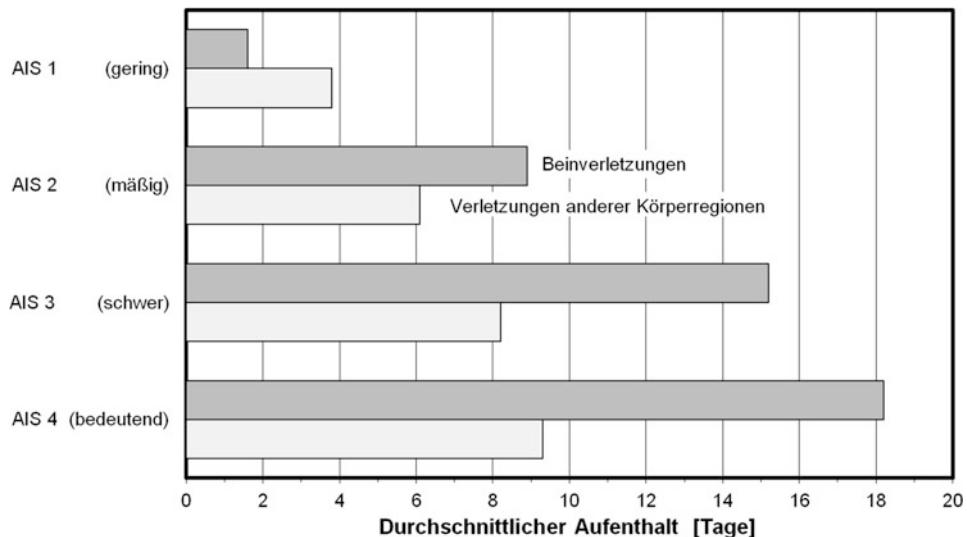
unterteilen: Bänderrisse mit vollständigem Abriss der Sehnen und des Gewebes, Zerrungen, bei denen die Bänder über den elastischen Bereich hinaus gedehnt werden, ansonsten aber intakt bleiben, und leichten Zerrungen, d. h. einer Dehnung innerhalb der elastischen Grenzen. Bänderrisse und Zerrungen führen zu Instabilitäten des Gelenks und gelegentlich zu einer degenerativen Arthritis (Gelenkentzündung) aufgrund abnormer Gelenkbewegungen während einer atypischen Belastung.

Bei den **Verletzungen der Nerven** unterscheidet man zwei Typen: Quetschung der Nerven, wobei die Hülle erhalten bleibt, die Nervenfasern aber unterbrochen sind. Die Nerven regenerieren selbstständig wieder, und zwar ausgehend vom Zellkörper nahe bei oder in der Wirbelsäule in Verletzungsrichtung (etwa 1 mm pro Tag). Die schwerste Form von Nervenverletzungen ist hingegen im vollständigen Abriss der Nerven zu sehen und erfordert eine neurochirurgische Behandlung.

Eine Bemerkung zur Bedeutung der **Verletzungen der unteren Extremitäten** soll den Abschluss dieses Unterkapitels bilden: Verletzungen in dieser Region sind äußerst selten tödlich, und dann entweder in Verbindung mit Verletzung anderer Körperregionen oder beim Eintreten von Komplikationen. Allerdings ist ihre Behandlung und die Dauer des Ausheilungsprozesses, insbesondere bei schweren Verletzungen, länger als dies bei entspre-

chend schweren Verletzungen an anderen Körperteilen der Fall ist; dauernde Beeinträchtigungen lassen sich dabei nicht ausschließen. In Abb. 3.59 sind die Werte für die Dauer des Krankenhausaufenthalts bei unterschiedlicher Verletzungsschwere der unteren Extremitäten der Dauer bei der entsprechenden Verletzung in anderen Körperregionen aus [35] gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass die stationäre Behandlungsdauer bei schweren Beinverletzungen ( $AIS > 2$ ) etwa doppelt so groß ist wie bei vergleichbar schweren Verletzungen an anderen Körperteilen.

#### Verletzungsschwere

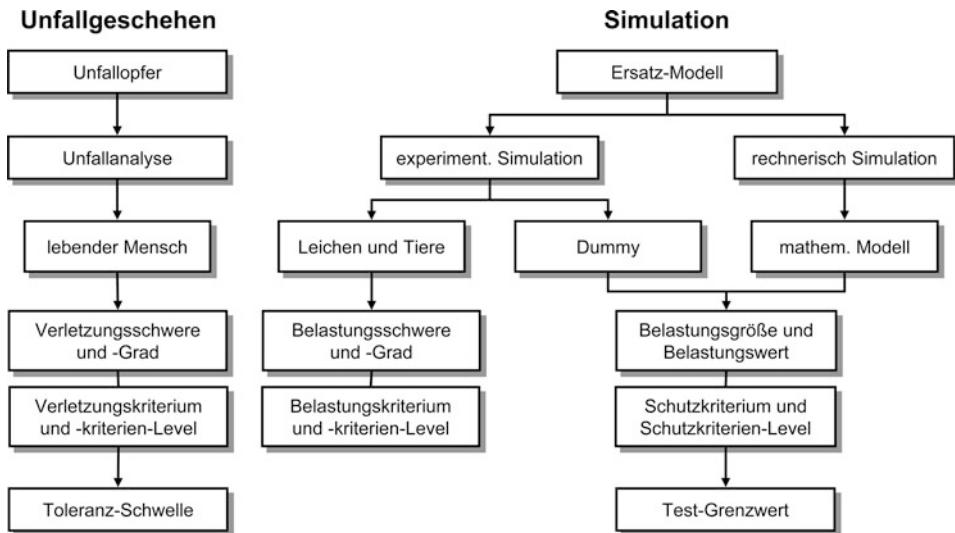


**Abb. 3.59** Durchschnittlicher Krankenhaus-Aufenthalt bei Verletzungen  $AIS > 2$  der unteren Extremitäten im Vergleich zu Verletzungen anderer Körperregionen (nach [35])

---

## 3.2 Verletzungsschwere und deren Monetarisierung

Die Verletzungsschwere kennzeichnet die Größe von Veränderungen physiologischer bzw. struktureller Art am lebenden Menschen (vgl. Abb. 3.60) aufgrund mechanischer Gewalt einwirkung. So ist z. B. ein Splitterbruch des Oberschenkels oder eine Verbrennung 2. Grades eine Charakterisierung der Verletzungsschwere. Sie kann in vollem Umfang jedoch lediglich durch eine klinische Diagnose oder durch eine Obduktion des verstorbenen Unfallopfers abgeschätzt werden. Dem gegenüber erfolgt in den meisten Fällen eine weniger exakte Abschätzung bereits kurz nach dem Unfall, die weder auf einer klinischen Diagnose noch auf einer Autopsie des Opfers basiert. Eine annehmbare, derzeit aber noch unge naue Einschätzung der Verletzungsschwere wird gelegentlich bereits in der Notaufnahme einer Unfallklinik vorgenommen. Diese Einschätzung ist jedoch häufig unzureichend, da



**Abb. 3.60** Struktur der Bereiche Unfallgeschehen und Simulation (nach [33])

aus den verschiedensten Gründen die Symptome mancher Verletzungen erst mehrere Tage nach dem Unfall erkannt werden können, so z. B. Instabilitäten des Kniegelenkes aufgrund eines Bänderrisses oder Schleudertraumata aufgrund einer Überdehnung (Hyperextension) des Halses.

### 3.2.1 Verletzungsschweregrad

Der Grad der Verletzungsschwere kann in der Regel nur durch eine umfassende medizinische Diagnose bestimmt und unter Hinweis auf das Maß der Lebensgefährdung, die Krankenhausaufenthaltsdauer, die Krankheitsdauer, das Risiko bleibender körperlicher Behinderung u. a. Charakteristika abgeschätzt werden. Einige Klassifizierungen sind lediglich von historischer Bedeutung, und es ist daher nicht verwunderlich, dass die Zuordnung des Verletzungsschweregrades von einem Anwendungsort zum anderen variierte, da die eine Institution ein Charakteristikum bei der Verletzungseinschätzung für wichtiger und relevanter hielt als die andere. Die Folge davon war, dass die gleichen Verletzungen in verschiedenen Ländern unterschiedlich klassifiziert wurden. Konsequenterweise wurde daher die so genannte „Vereinfachte Verletzungsskala“ **AIS (Abbreviated Injury Scale)** entwickelt, die ursprünglich auf das Jahr 1959 zurückgeht. Diese mittlerweile international anerkannte Verletzungsschwere-Skala, die die oben genannten Charakteristika in weitem Umfang berücksichtigt, erfuhr in den letzten Jahrzehnten verschiedene Modifikationen; so wurde eine Verletzung 1960 noch mit AIS 3 eingeschätzt, der heute nur ein Verletzungsschweregrad von AIS 2 zugeordnet wird. Die AIS-Klassifizierung kann bei sorgfältiger Anwendung

hilfreich sein, doch kann sie auch zu Konfusionen führen, wenn sie unkorrekt angewandt wird. Neben der AIS-Skala gibt es noch weitere Skalierungen, die zur Bestimmung des Verletzungsschweregrades, insbesondere bei polytraumatisierten Verletzten, vorgeschlagen worden sind, sich jedoch nicht durchgesetzt haben (z. B. [36, 37]).

Zur Beschreibung der Häufigkeit der Verletzungsschweregrade eines bestimmten Kollektivs von Unfallopfern wird die Auftretenswahrscheinlichkeit als Verteilungsfunktion der Schweredegreide in Abhängigkeit von der Unfallschwere oder von der Belastungsgröße dargestellt. Dies ist deshalb erforderlich, da sich unterschiedliche physiologische Merkmale der betroffenen Unfallopfer, aber auch Eigenschaften des Kontaktstystems und der Fahrzeugstruktur bei sonst gleichen äußeren Bedingungen im Unfallgeschehen streuungsverursachend auf die Verletzungsschweregrade auswirken.

### 3.2.2 Verletzungsskalierung nach AIS

Aufgrund der erheblichen Probleme bei der quantitativen Bewertung von Verletzungen wurden mit der Zunahme des Unfallgeschehens im Straßenverkehr, etwa seit den 1940er Jahren, zahlreiche Vorschläge zur Bewertung der Verletzungsschwere veröffentlicht, von denen sich die erstmals 1971 veröffentlichte AIS-Skalierung international durchgesetzt hat [38]. Die ursprüngliche Form umfasste insgesamt zehn Punkte und reichte von 0 bis 9; sie war hauptsächlich ausgelegt für die Anwendung bei Verkehrsunfällen (Anprall oder stumpfe Gewalt). In den vergangenen mehr als 50 Jahren wurde die Skalierung erweitert auf alle denkbaren Verletzungen. In ihrer jetzigen Form [39] umfasst die Skalierung nunmehr sechs Punkte und reicht von AIS 1 (gering) bis AIS 6 (derzeit nicht überlebbar). Die Verletzungsschweregrade AIS 7, 8 und 9 werden nicht mehr benutzt, da beispielsweise AIS 9 mehr als drei tödliche Verletzungen beinhaltet hat. In den zwischenzeitlich durchgeföhrten AIS-Revisionen wurde jede dieser Verletzungen getrennt dem Schweregrad AIS 6 zugeordnet. AIS 9 bedeutet nunmehr, dass die Verletzungsschwere unbekannt ist, während sie in der ursprünglichen AIS-Codierung mit AIS 99 eingestuft wurde. Anhand eines nach sieben Körperregionen (nämlich Kopf, Hals, Thorax, Abdomen und Beckeninhalt, Wirbelsäule, Extremitäten und knöchernes Becken) und der Körperoberfläche gegliederten Kataloges von Verletzungsbeschreibungen wird den beobachteten Verletzungen nach den fünf Kriterien

- Grad der Lebensbedrohung,
- Behandlungsdauer,
- Dauerschäden,
- Energieaufnahme und
- Häufigkeit einer Verletzung

ein Verletzungsschweregrad zugeordnet. Dies erfolgt überwiegend nach dem Grad der Lebensbedrohung, die übrigen Kriterien sind von untergeordneter Bedeutung. Die AIS-

Skalierung würdigt die traumatologische Einschätzung der Verletzungen und berücksichtigt nicht die Folgen der Verletzung wie beispielsweise den Eintritt des Todes. Dieser wird allenfalls gesondert codiert und statistisch durch die Letalitätsrate je AIS-Schweregrad ausgewiesen. In Tab. 3.2 sind beispielhaft AIS-Verletzungsschweregrade mit einigen Verletzungsbeschreibungen zusammengefasst.

**Tab. 3.2** Verletzungsschweregrad nach AIS 2005, Verletzungsbeispiele und Letalitätsrate (nach [39])

AIS	Schweregrad	Beispiele für Verletzungen	Letalitätsrate [%]
0	unverletzt		0,00
1	gering	Schürfung, Schnittwunden, Stauchung, Prellung; Verbrennungen 1. und 2. Grades bis 10 % der Oberfläche	0,00
2	mäßig	Großflächige Schürfung und Prellung, ausgedehnte Weichteilverletzungen, leichte Gehirnerschütterung mit Amnesie; Verbrennungen 2. Grades bis 15 % der Oberfläche	0,07
3	<b>schwer nicht lebensgefährlich</b>	Schädelfraktur ohne Liquoraustritt, Gehirnerschütterung mit Bewusstlosigkeit, Pneumothorax; Verbrennungen 2. Grades bis 25 % der Oberfläche	2,91
4	<b>bedeutend lebensgefährlich, Überleben wahrscheinlich</b>	Schädelfraktur mit Liquoraustritt, Gehirnerschütterung mit Bewusstlosigkeit bis 24 Stunden, Perforation des Brustkorbes; Verbrennungen 2. oder 3. Grades bis 35 % der Oberfläche	6,88
5	<b>kritisch Überleben unsicher</b>	Schädelfraktur mit Hirnstammlösung, Organriß oder -abriß; Verbrennungen 3. Grades bis 90 % der Oberfläche	32,32
6	<b>maximal als praktisch nicht überlebbar gewertet</b>	Massive Kopfquetschung, Hirnstammlazeration, Schädelbasisfraktur, Thoraxquetschung, Aorta-Ruptur u.-Durchtrennung; Trennung zwischen Thorax und Becken	100,00
9	unbekannt		unbekannt

Im AIS-Manual sind die wichtigsten in der Praxis zu beobachtenden Verletzungen in einer alphabetischen Liste verzeichnet und hinsichtlich ihrer Verletzungsschwere bewertet. Diese Liste sollte bei der Verletzungseinstufung unbedingt benutzt werden; sie ist ein wichtiges Hilfsmittel zur Erzielung einer einheitlichen, international vergleichbaren Verletzungsskalierung. Durch die Anwendung der identischen Skalierungsmaßstäbe lassen sich Entwicklungen der Verletzungsschwere – etwa als Folge konstruktiver oder legislativer Maßnahmen – besser erkennen, auch die Effizienzbeurteilung von Behandlungsmethoden findet durch Einführung einer allgemein anerkannten Skalierung eine quantifizierbare Grundlage.

Jeder einzelnen Verletzung kann ein Schweregrad der AIS-Skala zugeordnet werden, er berücksichtigt jedoch jede Verletzung nur so, als ob keine weiteren Verletzungen aufgetreten wären. Da viele Unfallopfer aber mehr als nur eine Verletzung erleiden, wird seit

der 80er AIS-Revision zur Einschätzung der Gesamtverletzungsschwere eines polytraumatisierten Patienten der Schweregrad der schwersten Einzelverletzung als MAIS (Maximal AIS) verwendet.

### 3.2.3 Andere Verletzungsskalierungen

Das Resultat und die Behandlung einer Traumatisierung eines Patienten mit multiplen Verletzungen ist oft unterschiedlich im Vergleich zum Verletzungszustand von Patienten mit nur einem verletzten Körperteil. Zur besseren Bewertung der Sterblichkeit, der Mortalität also, von mehrfach verletzten Unfallopfern wurden auf der Basis der AIS-Skala verschiedene Verfahren entwickelt, von denen im Folgenden zwei vorgestellt werden sollen: Das von Baker et al. in [40] vorgeschlagene ISS-Verfahren (ISS: Injury Severity Score) und der PODS-Wert (PODS: Probability of Death Score) von Sommers nach [22].

Das ISS-Verfahren wird zur Codierung von Mehrfachverletzungen angewandt. Dabei ist der ISS-Wert (3.1) die Summe aus den Quadraten der jeweils höchsten AIS-Werte der drei (I bis III) am schwersten verletzten Körperregionen:

$$\text{ISS} = \text{AIS}_\text{I}^2 + \text{AIS}_\text{II}^2 + \text{AIS}_\text{III}^2 \quad (3.1)$$

Die Körperregionen sind Kopf, Hals, Thorax, Abdomen und Beckeninhalt, Wirbelsäule, Extremitäten und knöcherne Becken sowie Körperoberfläche. Bei der Berechnung des ISS-Wertes wird keine dieser Körperregionen überrepräsentiert. Der Maximalwert kann höchstens 108 betragen, und zwar wenn alle drei berücksichtigten Körperteile einen Verletzungsschweregrad von AIS 6 aufweisen; tritt er hingegen nur bei einem Körperteil auf, so wird der ISS-Wert auf 75 gesetzt. Ist eine Verletzung mit AIS 9 (unbekannt) codiert, so darf der ISS-Wert nicht berechnet werden. Der ISS-Wert korreliert in hohem Maß mit der Mortalität der Unfallopfer.

Die AIS-Codierung ist eine anatomische Verletzungsskala, sie berücksichtigt weder Vorerkrankungen, noch das Alter des Patienten oder dessen physiologische Kondition. Mit der Sterbewahrscheinlichkeitsklassifizierung PODS (Probability of Death Score) wurde 1981 eine Alternative zum ISS-Verfahren eingeführt. Der PODS-Wert kann ohne (3.2) und mit Berücksichtigung des Alters des Verletzten (3.3) errechnet werden:

$$\text{PODS} = 2,2 \cdot (\text{höchster AIS}) + 0,9 \cdot (\text{zweithöchster AIS}) - 11,3 \quad (3.2)$$

und unter Berücksichtigung des Alters

$$\text{PODS}_a = 2,7 \cdot (\text{höchster AIS}) + 1,0 \cdot (\text{zweithöchster AIS}) + 0,6 \cdot (\text{Alter}) - 15,4 \quad (3.3)$$

Die PODS-Werte sollen im Vergleich mit den ISS-Werten besser mit tatsächlich eingetretenen Todesfällen übereinstimmen und eine klarere Interpretation der einzelnen Werte erlauben. Weiterführende Berechnungen (Verletzungsstatistik, Nutzen/Kosten-Analyse)

sollten durchgeführt werden, wenn das Verfahren auf einer noch breiteren statistischen Grundlage abgesichert ist [22].

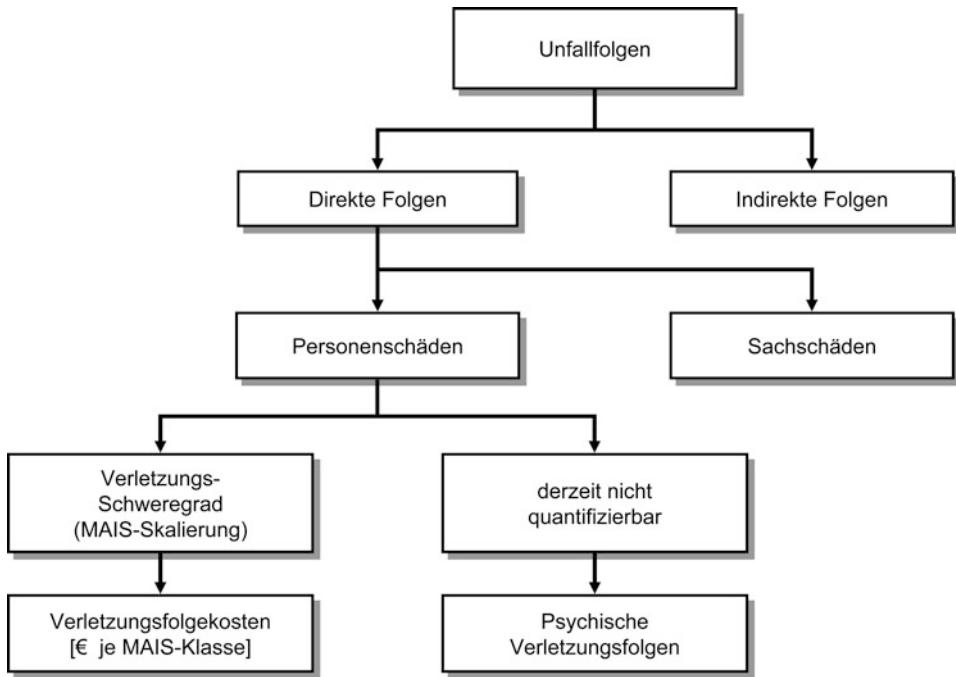
Die Beschreibung eines engen, funktionalen Zusammenhangs zwischen mechanischer Einwirkung und Verletzungsschweregrad ist bisher noch mit keinem vorgeschlagenen Skalierungssystem gelungen. Der wichtigste Grund im Falle der AIS-Skala liegt in der prinzipiellen Eigenschaft dieses Skalierungssystems, nämlich in der Zahl der Bewertungskriterien, die zur Klassifizierung einer Verletzung führen. Der AIS-Wert ist eine Zusammenfassung der oben genannten fünf Kriterien, daher ist mit einer engen statistischen Korrelation zwischen der Verletzungsschwere und einer, wie auch immer gearteten Unfallschwere kaum zu rechnen. In [33] wurden verschiedene Unfallkenngrößen im Hinblick auf körperteilspezifische Verletzungsschweregrade untersucht. Hierbei wurden Korrelationskoeffizienten für Becken-Verletzungsschweregrade unter Anwendung der Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  (2.2) und der spezifischen Unfall-Leistung SPUL (2.3) zwischen 0,74 und 0,92 ermittelt. Neben den AIS-Skalierungseigenschaften sind der Alterseinfluss und andere anthropometrische Faktoren für die relativ niedrige Korrelation zwischen Unfallkenngroße und Verletzungsschweregrad an anderen Körperteilen verantwortlich.

### 3.2.4 Monetäre Bewertung der Verletzungsschwere

Das AIS-Skalierungssystem hat sich in der Vergangenheit zu einer hervorragenden Maßeinheit für die Einschätzung der Verletzungsschwere entwickelt, allerdings ist es nicht hilfreich zur Vorhersage von Folgen der Verletzungen. Bei der Bewertung der Verletzungen stellte sich die Frage nach der Zusammensetzung und Messbarkeit der Unfallfolgen (Abb. 3.61). Zu den direkten Unfallfolgen gehören im weitesten Sinne die Personenschäden (physisch und psychisch) und die Sachschäden (am und im Fahrzeugen und in der Umwelt). Die einzelnen Komponenten der Unfallfolgen werden also in unterschiedlichen Dimensionen gemessen: monetär, verbal oder ordinal skaliert. Im Sinne einer aussagekräftigen und verständlichen Bewertung der Unfallfolgen ist es daher unbedingt erforderlich, eine einheitliche Dimensionierung dieser Folgen zu finden. Auf die Darstellung der Sachschäden kann hier zunächst verzichtet werden, da sie in Kap. 6 (Überprüfung und Bewertung der Sicherheit) behandelt werden sollen; es wird somit als ausreichend angesehen, im Folgenden lediglich auf die Verletzungsfolgekosten einzugehen.

Seit Ende der 1960er Jahre wurden verschiedene Ansätze zu Nutzen/Kosten-Untersuchungen von Verkehrssicherheitsmaßnahmen veröffentlicht (z. B. in [41, 42]), wobei mit der Arbeit von Jäger und Lindenlaub [43] dem Anwender ein Instrument an die Hand gegeben wurde, die Effizienz derartiger Maßnahmen bewerten zu können. Durch Modifikationen in der Berechnung [44, 45, 46] wurden neuere Erkenntnisse aus volkswirtschaftlicher und medizinischer Sicht berücksichtigt, die durch folgende Verbesserungen zu einer widerspruchsfreien monetären Bewertung der Verletzungsschwere geführt haben [45]:

- Überarbeitung des Ertragswertes für Kinder und Jugendliche,
- Einführung der Letalitätsrate,



**Abb. 3.61** Unterteilung der Unfallfolgen (nach [22])

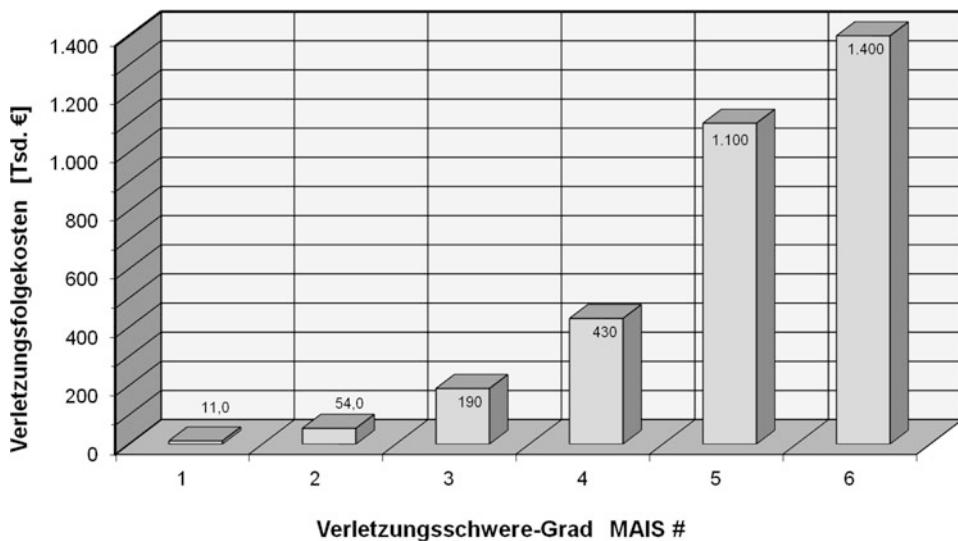
- Ersetzen des Kostenwertes durch den Ertragswert und
- Betrachtung der jüngsten Wirtschaftslage durch Berücksichtigung der gestiegenen Arbeitslosigkeit und des Anwachsens der so genannten Schattenwirtschaft.

Die sich hieraus ergebenden Verletzungsfolgekosten je MAIS-Verletzungsklasse sind (in Euro auf- bzw. abgerundet) für verschiedene Jahre in Tab. 3.3 zusammengefasst und für 2011 in Abb. 3.62 dargestellt. Sie wurden, jeweils auf dem aktuellen Stand, in verschiedenen Forschungsprojekten zur Quantifizierung der Verletzungsfolgen und der Straßenverkehrssicherheit erfolgreich angewandt und veröffentlicht (z. B. [47, 48, 49, 50]).

Die Verletzungsfolgekosten sind für die Gesamt-Verletzungsschweregrade (MAIS) definiert und über Geschlecht, Konstitution und Altersverteilung aller Verkehrsteilnehmer gemittelt. Die Anwendung auf einzelne Schweregrade von körperteilspezifischen Verletzungen ist nicht unproblematisch, da die differierende Ausprägung der genannten Kriterien bei der Einstufung der Verletzungsschwere, insbesondere Lebensbedrohung, Behandlungsdauer und Dauerschäden, bei unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern (z. B. PKW-Insassen im Vergleich zu motorisierten Zweiradfahrern) zu Kostenverschiebungen führen können.

**Tab. 3.3** Verletzungsfolgekosten für verschiedene Jahre (aus [45, 51])

MAIS	Schweregrad	Verletzungsfolgekosten [€] für die Jahre				
		1980 nach [45]	1990 nach [51]	2000 nach [51]	2010 nach [51]	2011 nach [51]
0	unverletzt	0	0	0	0	0
1	gering	3.600	5.900	8.500	10.000	11.000
2	mäßig	18.000	30.000	44.000	53.000	54.000
3	schwer	65.000	110.000	150.000	190.000	190.000
4	bedeutend	150.000	240.000	350.000	420.000	430.000
5	kritisch	360.000	600.000	860.000	1.100.000	1.100.000
6	maximal	470.000	780.000	1.100.000	1.400.000	1.400.000

**Abb. 3.62** Verletzungsfolgekosten für das Jahr 2011

### 3.3 Verletzungs- und Schutzkriterien

Biomechanische Untersuchungen verfolgen u. a. das Ziel, diejenigen Faktoren zu identifizieren und quantitativ zu bestimmen, die für Art und Ausmaß der Verletzungen verantwortlich sind. Ideal wäre also, den funktionalen Zusammenhang zwischen der mechanischen Einwirkung und dem Verletzungsergebnis bestimmen zu können. Die quantitative Beschreibung der mechanischen Einwirkung ist jedoch nicht so unproblematisch, wie häufig angenommen wird. So reicht es für die Beurteilung der Verletzungsfolgen beispielsweise bei einer Fahrzeug/Fahrzeug-Kollision nicht aus, allein die Kollisionsgeschwindigkeit

zu betrachten, vielmehr muss neben der Geschwindigkeit mindestens auch die Schwerpunktverzögerung in einer unfallspezifischen Kenngröße erfasst werden. Doch auch die Formulierung der Unfallkenngröße ist für die Beschreibung der mechanischen Beanspruchung nicht ausreichend, da die Eigenschaften der Kontaktstruktur variieren und unterschiedliche verletzungsinduzierende Kräfte hervorrufen können. Im Folgenden soll daher aufgezeigt werden, welche Wege in der Biomechanik-Forschung beschritten wurden (und weiterhin werden), verletzungsrelevante, mechanische Belastungsgrößen aufzufinden und deren Grenzwerte zu bestimmen. Einige dieser Größen finden in gesetzlichen Sicherheitsstandards ihren Niederschlag, andere wiederum sind bisher nur in wissenschaftlichen Arbeiten und Veröffentlichungen vorgestellt worden und zur Anwendung empfohlen; sie befinden sich in einem Diskussionsstadium. Zunächst jedoch sollen einige der verwendeten Begriffe erläutert werden.

### 3.3.1 Definitionen

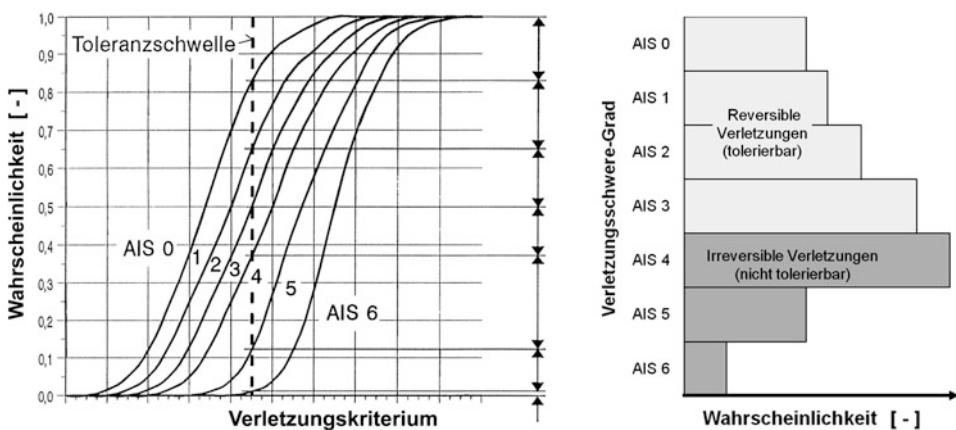
Die Struktur der Bereiche Unfallgeschehen und Simulation ist in Abb. 3.60 dargestellt, wobei die Analogie der Strukturelemente untereinander durch deren Lage in den einzelnen Ebenen zum Ausdruck kommt [33]. Verletzungsschwere und Verletzungsschweregrad wurden bereits im vorstehenden Unterkapitel erläutert, sodass für den am Unfall beteiligten, lebenden Menschen auf die weiteren Strukturierungselemente eingegangen werden kann.

Das **Verletzungskriterium** ist eine physikalische Größe (z. B. eine Kraft, ein Moment oder eine Beschleunigung), die einen bestimmten Bezug zur Verletzungsschwere einer Körperregion herstellt. Diese Größe kann eine Kombination aus verschiedenen Variablen sein (z. B. die Zusammenfassung der translatorischen und der rotatorischen Beschleunigung zu einer Größe für die Charakterisierung von Kopfverletzungen). Erhöht sich beispielsweise der Verletzungsschweregrad für Schädel/Hirn-Traumata, ausgedrückt durch AIS, mit den Beschleunigungen, so ist die physikalische Größe „Beschleunigung“ das Verletzungskriterium für den Kopf. Der Zusammenhang zwischen der physikalischen Größe und der entsprechenden Verletzungsschwere einer bestimmten Körperregion sollte möglichst eindeutig und für alle Belastungen und alle Belastungsfälle gültig sein. Der **Verletzungskriterien-Level** (z. B. 80g) kennzeichnet einen bestimmten Wert des Verletzungskriteriums am lebenden Menschen und wird durch Zahlenwerte physikalischer Parameter wie Kraft, Moment, Beschleunigung, Druck u. a. ausgedrückt. Ist der Wert der Belastung nur groß und seine Dauer lang genug, sodass ein bestimmter Schwellwert überschritten wird, treten definierte Veränderungen bezüglich des physiologischen oder mechanischen Zustandes bestimmter Körperteile auf. In manchen Fällen kann es erforderlich sein, mehrere verschiedene Schwellwerte für eine Belastungsart zu definieren, z. B. beim Viskosekriterium der Brust: einen für die Kompression und einen weiteren für die Kompressionsgeschwindigkeit.

Da unterschiedliche Verletzungsmechanismen für ein und dieselbe Körperregion denkbar sind, existieren auch verschiedene **Toleranzschwellen**. Bei der Verwendung des Begriffes Toleranzschwelle ist daher zunächst der Hinweis auf

- physikalische Parameter oder Funktionen einer Variablen,
- Typ des lebenden Menschen (Alter, Geschlecht),
- Körperteil,
- Art der Verletzung und
- Verletzungsschweregrad

erforderlich. Die Toleranzschwelle für ein bestimmtes Unfallkollektiv kann wegen des bereits angedeuteten Streubandes nur statistisch festgelegt werden. Sie kennzeichnet allerdings nicht die Trennungslinie zwischen lebensbedrohlichen und nicht lebensbedrohlichen Verletzungen, sondern sie gibt einen bestimmten Kriterienlevel an, bei dem ein bestimmter Anteil der Verletzungsverteilung vorliegt, der nicht mehr tolerierbar bzw. noch tolerierbar erscheint (Abb. 3.63).



**Abb. 3.63** Schematische Verteilung der Verletzungswahrscheinlichkeit zur Bestimmung der Toleranzschwelle (nach [33])

Die bisher verwendeten Begriffe beziehen sich bisher ausschließlich auf den **lebenden menschlichen Körper** im Unfallgeschehen. Es ist daher nur folgerichtig, auch für die im Bereich der Simulation angewandten Ersatzmodelle korrespondierende Ausdrücke bereitzustellen (vgl. Abb. 3.60).

Versuche an lebenden Menschen werden lediglich auf freiwilliger Basis durchgeführt; dabei werden Freiwillige jedoch nur in dem Bereich belastet, in dem mit Sicherheit keine Verletzungen zu erwarten sind. Als Ersatz für den lebenden Menschen dienen daher physikalische und theoretische Modelle. Bei der Simulation mit **physikalischen Modellen**

werden menschliche Leichen, anästhesierte oder getötete Tiere im Experiment untersucht. Für Sicherheitstests, aber auch zu reinen Forschungszwecken, werden so genannte Dummies verwendet. Unter **theoretischen Modellen** versteht man elektrische bzw. elektronische Analogien zur experimentellen Simulation und, in weitaus größerem Umfang, mathematische Modelle. Je nach Fragestellung und Untersuchungsziel repräsentieren physikalische und theoretische Modelle entweder den menschlichen Gesamtkörper oder Teile davon. Die als Ersatz des lebenden Menschen in der Simulation verwendeten Modelle werden durch Federsteifigkeiten, Dämpfungskennwerte, Massenverteilung und Trägheitsmomente spezifiziert und sollen, soweit dies möglich ist, die Verteilung von Alter, Geschlecht und Konstitution des damit repräsentierten Unfallkollektivs beinhalten.

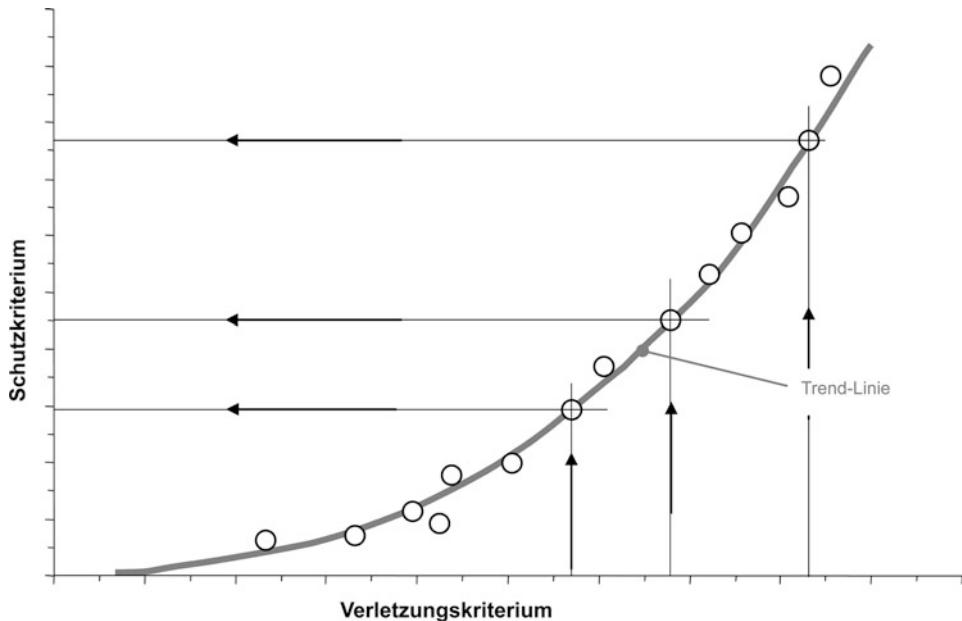
Die **Belastungsschwere** kennzeichnet, ähnlich wie die Verletzungsschwere am lebenden Menschen, die Größe der mechanischen Veränderung in Form eines strukturellen Versagens am toten menschlichen Körper oder am Tierkörper aufgrund mechanischer Einwirkungen. Bei der Verwendung von Dummies oder theoretischen Modellen muss auf die Verwendung des Begriffes „Belastungsschwere“ verzichtet werden, da das Übertragungsverhalten des menschlichen (lebenden oder toten) Körpers und das des Dummies bzw. des mathematischen Modells unterschiedlich ist; der Bruch beispielsweise von „Rippen“ am Dummy weist keine Aussagekraft über die Verletzungsschwere am Brustkorb des Unfallopfers auf. Der **Belastungsschweregrad** findet seine Entsprechung im Verletzungsschweregrad am lebenden Menschen und kann ähnlich skaliert sein. Die Verwendung der AIS-Grade sollte allerdings, um Missverständnissen vorzubeugen, vermieden oder zumindest besonders gekennzeichnet werden.

Das **Belastungskriterium** ist eine physikalische Größe (z. B. eine Kraft, ein Moment, oder eine Beschleunigung), die sich auf die Belastungsschwere einer bestimmten Körperregion des toten menschlichen Körpers bzw. des Tierkörpers bezieht. Diese Größe, vergleichbar dem Verletzungskriterium am lebenden menschlichen Körper, kann eine einzelne Kenngröße, aber auch eine Funktion unterschiedlicher Variablen sein. Der **Belastungskriterien-Level** (z. B. 80g) kennzeichnet einen bestimmten Wert des Belastungskriteriums am Körperteil eines physikalischen Ersatzmodells (Leiche bzw. Tier), der ausreicht, einen entsprechenden Belastungsschweregrad hervorzurufen.

Die Einführung des Begriffes **Belastungsgröße** am Dummy und am Insassenmodell (z. B. als resultierende Beschleunigung des Kopfes) ist erforderlich, da eine strukturelle Zerstörung am Dummy bei wesentlich höheren mechanischen Belastungen und am Modell gar nicht auftritt, sodass die Zerstörung als Maß für eine bestimmte Verletzungsschwere ungeeignet ist. Die Belastungsgröße ist die experimentell gemessene bzw. die rechnerisch ermittelte Ausgangsgröße des jeweils verwendeten Dummies bzw. mathematischen Modells aufgrund mechanischer Einwirkung. Sie findet ihre Entsprechung in der Verletzungsschwere am lebenden Menschen. Die häufig verwendete Bezeichnung „Dummy-Belastung“ ist irreführend, da sie bisher nicht nur die gemessene Belastung der im Experiment verwendeten Dummies kennzeichnete, sondern ebenfalls für die Belastung Anwendung fand, die am mathematisch beschriebenen Insassen berechnet wurde. Der

**Belastungswert** (z. B. 10.000 N für die Oberschenkel-Längskraft) ist der zahlenmäßige Ausdruck der Belastungsgröße.

**Schutzkriterien** sind diejenigen Belastungsgrößen, die am Dummy gemessen bzw. am mathematischen Modell berechnet werden und in Wechselbeziehung zu den Verletzungskriterien des lebenden menschlichen Körpers stehen. Sie können sich auch aus mehreren Belastungsgrößen zusammensetzen, falls eine einzelne Größe zur umfassenden Beschreibung der Verletzungsmechanik nicht ausreicht. So wird in einem der späteren Abschnitte ein Kopf-Schutzkriterium gezeigt, das sich aus der translatorischen und der rotatorischen Kopfbeschleunigung zusammensetzt. Ist der Gesamt-Zusammenhang zwischen dem einzelnen Verletzungskriterium und dem Schutzkriterium bei seiner Anwendung bekannt und eindeutig, so können aus beiden Funktionen bestimmte korrespondierende Werte aufgefunden werden (Abb. 3.64). Dabei kann der Zusammenhang mit Hilfe einer geschlossenen mathematischen Funktion oder statistisch beschrieben werden. Da der Verletzungskriterien-Level mit dem **Schutzkriterien-Level** korrespondiert, haben mehrere mögliche Verletzungskriterien eine gleiche Anzahl von Schutzkriterien zur Folge.



**Abb. 3.64** Hypothetischer Zusammenhang zwischen Verletzungs- und Schutzkriterium (nach [33])

Die **Test-Grenzwerte** sind festzulegende Werte der Schutzkriterien-Levels für definerte Testsituationen. Sie resultieren aus dem Kompromiss des Zielkonflikts zwischen dem Schutzbedürfnis, ausgedrückt durch die Toleranzschwelle, und den technischen und konstruktiven Möglichkeiten. So wurde beispielsweise für den Kopf das HIC (Head Injury Criterion) als Schutzkriterium mit einem Level von  $HIC = 1.000$  entwickelt. Dieser Level ging in die europäische Sicherheitsgesetzgebung ein. Demgegenüber liegt der Test-Grenzwert

deutlich niedriger, bei etwa HIC = 700–750, um den Schutzkriterien-Level bei Abnahmever suchen unter Berücksichtigung der Versuchsstreuung keinesfalls zu überschreiten.

### 3.3.2 Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von Schutzkriterien

Die Belastungsgrenzen des Menschen können durch verschiedene Untersuchungsmethoden unter vereinfachten oder dem realen Unfall entsprechenden Bedingungen ermittelt werden. Die Untersuchung bei simplifizierten Belastungssituationen bietet gut reproduzierbare Versuchsbedingungen und damit eine gute Absicherung der Ergebnisse für den untersuchten Belastungsfall; die Übertragung der Ergebnisse auf das Geschehen beim wirklichen Verkehrsunfall ist jedoch oft schwierig. Der Übergang zu realistischeren Versuchsbedingungen erhöht die Anzahl von Parametern beträchtlich und erschwert damit die Absicherung von Ergebnissen. Die meisten der bis heute definierten Belastungsgrenzen beruhen auf statistisch nur unzureichend gesicherten Ergebnissen, da die Anzahl der Variablen groß, die Menge der durchgeführten Versuche hingegen meist relativ gering ist. Die Untersuchungsmethoden lassen sich nach den verwendeten Versuchsobjekten unterscheiden, und zwar Versuche mit

- lebenden Menschen (Unfallbeteiligten),
- Freiwilligen,
- Sportlern, Artisten und Tänzern,
- menschlichen Leichen und Leichenteilen,
- Tieren und
- anthropometrischen Messpuppen (Dummys).

Beim realen Unfall ist der **lebende Mensch** Belastungen ausgesetzt, die zu mehr oder weniger schweren Verletzungen führen können. Bei Verletzungen, die ohne oder trotz Benutzung von Rückhalteeinrichtungen durch den Kontakt mit Innenraumteilen verursacht werden, können die zur Verformung der Kontaktzonen notwendigen Kräfte zur Ermittlung von Verletzungskriterien herangezogen werden. Die Verletzungen des Insassen werden genau registriert und die zur Verformung der Aufschlagzonen notwendigen Kräfte unter den ermittelten Unfallbedingungen experimentell erfasst. Unter der Voraussetzung, dass die messtechnisch ermittelten und beim Unfall aufgetretenen Kräfte gleich sind (abhängig von der Güte der experimentellen Simulation des Unfalls), kann der Verletzung die verursachende Kraft zugeordnet werden. Aus einer ausreichend großen Anzahl von Untersuchungen können Verletzungskriterien und ihre Grenzwerte für verschiedene Körperregionen abgeleitet werden. Der sich dabei ergebende Streubereich der so ermittelten Verletzungskriterien-Levels wird durch die Verschiedenartigkeit der lebenden Unfallverletzten, des „biologischen Materials“ also, und durch nicht vollständig oder nicht genau bekannte Unfallbedingungen verursacht.

Versuche mit **Freiwilligen** sind sehr problematisch, da bei Annäherung an die mutmaßliche Verletzungsschwelle die Gesundheit eines Menschen gefährdet wird. Bei den meisten Freiwilligen-Versuchen bilden deswegen die ermittelten Werte untere Grenzwerte mit einem sicheren Abstand zur Verletzungsschwelle. Dennoch ist das hohe Risiko bei der Durchführung derartiger Versuche nicht zu unterschätzen. Man gewinnt durch den lebenden Menschen wertvolle Aussagen über den Einfluss von Muskelkräften auf den Bewegungsablauf, wenn man vergleichende Versuche unter ähnlichen Bedingungen mit Leichen durchführt. Die Muskelanspannung als Reaktion auf das Erkennen einer Gefahrensituation kann oftmals die Verletzungsgefährdung beim realen Unfall mildern. Durch den Einfluss von Abstütz- und Reaktionskräften liegt bei Freiwilligen-Versuchen ein ähnlicher Bewegungsablauf vor wie beim tatsächlichen Unfall. Die Messwerte aus Freiwilligen-Versuchen können allerdings nicht als Verletzungskriterien verwendet werden, da die Beanspruchung unterhalb der Gefährdungsschwelle liegen muss, andererseits sind die Versuchsprobanden meist junge Männer, die körperlich höher beanspruchbar sind als der durchschnittliche Mensch.

Bei Versuchen mit **Sportlern, Artisten und Tänzern** wird der Umstand genutzt, dass bei vielen Sportarten oder bei der Ausübung mancher Berufe Teile des Körpers bis an die Grenze der Erträglichkeit beansprucht werden. Als eine noch relativ neue Methode zur Datengewinnung werden diese Belastungen gemessen (direkt oder aus Filmaufnahmen), so z. B. bei Boxern, Football-Spielern, Skiläufern, Tänzern und Artisten. Ähnlich wie bei Freiwilligen-Versuchen liegen die Belastungen auch hier meist unterhalb der Verletzungsgrenze, zudem sind die Versuchsprobanden gut durchtrainiert und damit körperlich hoch belastbar.

Die Verwendung von **Leichen** für Experimente zur Ermittlung von Belastungskriterien stieß in der vergangenen Zeit auf erhebliche ethische und rechtliche Bedenken; heute werden derartige Versuche nur in sehr geringem Umfang durchgeführt, da sie auf Widerstand und Unverständnis in der Öffentlichkeit stoßen und heute nur mit Zustimmung so genannter Ethikkommissionen durchgeführt werden dürfen. Die zur Verfügung stehenden Leichen sind jedoch altersmäßig ungünstig verteilt, da meist nur natürlichen Todes Verstorbene verwendet werden können. Jüngere Tote lassen sich nur mit Einschränkung auswählen, weil sie oftmals bei Unfällen ums Leben gekommen und die Körper dadurch meist vorgeschnitten sind. Im Rahmen der im „Kooperationsverbund Biomechanik“ (KOB) angewandten Einzelfall-Methode wurden spezielle, reale Unfälle sowohl mit Leichen als auch mit Dummys möglichst genau in Fahrzeugversuchen nachgefahrene. Die Verletzungen des jeweiligen Unfallopfers wurden mit den Belastungsschweregraden, d. h. mit den „Verletzungen“ der menschlichen Leiche und den Belastungswerten des Dummys korreliert [52, 53]. Hierbei zielten zwar die Versuche auf realistische Unfallverhältnisse ab, das tatsächliche Unfallgeschehen blieb aber in seiner Gesamtheit auch bei diesen Untersuchungen unberücksichtigt.

Die mit Hilfe von Leichenversuchen gewonnenen Ergebnisse weisen allerdings Unzulänglichkeiten auf, die nachfolgend dargestellt werden sollen: Die Knochenfestigkeit nimmt mit steigendem Alter jenseits des vierten Lebensjahrzehnts stark ab. Gurtversuche mit

kompletten Leichen zeigen, dass mit zunehmendem Alter die Anzahl von Rippenfrakturen zunimmt und wegen der damit zunehmenden Thorax-Instabilität auch innere Organe wie Leber, Milz, Lunge und Zwerchfell beschädigt werden. Gelenkerkrankungen und Knochenschwund, fehlende Abstütz- und Reaktionskräfte, fehlender Muskeltonus, Lungen- und Gefäßdruck, veränderte Gewebeelastizität und meist geringere Körpertemperatur bei der Versuchsdurchführung führen zu Abweichungen der Belastbarkeit gegenüber dem Lebenden. Quetschungen, Abschürfungen, Schnittwunden, Frakturen und Gefäß-Rupturen hingegen sind bei frischen Leichen ähnlich wie beim lebenden Unfallopfer.

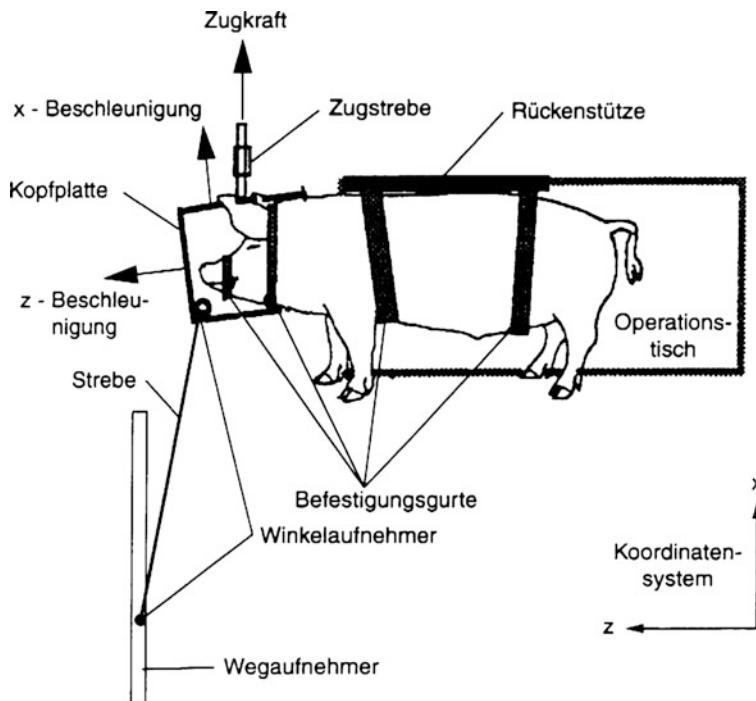
Während Versuche mit vollständigen Leichen meist zur Untersuchung bestimmter Unfallkonstellationen oder zur Rekonstruktion einzelner Unfallsituationen dienen, werden Experimente mit **Leichenteilen** zur Ermittlung von Belastungskriterien für Körperteile durchgeführt. Diese Leichenteile werden meist unter Verwendung spezieller Vorrichtungen quasi-statisch untersucht, wodurch sich gegenüber dem dynamischen Belastungsfall niedrigere ertragbare Kriterienlevels ergeben. Einflüsse benachbarter Körperteile können bei dieser Untersuchungsmethode nur unvollkommen berücksichtigt werden.

Die im Versuch mit kompletten Leichen oder Leichenteilen gewonnenen Belastungskriterien-Levels werden meist auf den Lebenden als Verletzungskriterien-Level übertragen. Dieser vereinfachenden Vorgehensweise liegt folgende Überlegung zugrunde: Wenn bei der Leiche der Belastungskriterien-Level als Grenzwert da angesetzt wird, wo die nicht mehr tolerierbare Verletzung gerade eintritt, so liegt man mit dem Verletzungskriterien-Level beim lebenden menschlichen Körper wegen der günstigeren körperlichen Voraussetzung bei gleicher Belastung „auf der sicheren Seite“.

Versuche mit **Tieren** bieten die Möglichkeit, den lebenden Organismus bis zur Destruktion zu beladen. Auf diese Weise lassen sich besonders die unterschiedlichen Ergebnisse bei lebenden, toten unkonservierten und konservierten Versuchskörpern ermitteln und zur Übertragung von Resultaten aus Leichenversuchen auf den lebenden Menschen benutzen.

In Abb. 3.65 ist ein Versuchsaufbau gezeigt, bei dem unter Verwendung von anästhesierten Schweinen die Verletzungsmechanik der Halswirbelsäule untersucht wurde [54]. Sehr schwierig allerdings ist der Schluss von Belastungsgrenzen des Tieres auf die des Menschen. Verschiedene Tiere (Affen, Schweine) sind zwar in bestimmten Körperregionen dem Menschen ähnlich, aufgrund des verschiedenen allgemeinen Körperbaus und der abweichenden Gewichtsverteilung sind die Belastungskriterien-Levels aus Tierversuchen jedoch nicht direkt als Verletzungskriterien-Level auf den Menschen übertragbar.

Zur experimentellen Simulation von Unfällen werden heute fast ausnahmslos **anthropometrische Messpuppen**, so genannte Dummies, benutzt, die im Kopf, in der Brust, der Hüfte und den Ober- und Unterschenkeln mit Beschleunigungs-, Weg-, Kraft- und Momentaufnehmern ausgerüstet sind. Die Entwicklung und Verbesserung dieser Messpuppen hat inzwischen, ausgehend von einem Sandsack-Dummy, zur fünften Generation von Dummies geführt. Das Problem besteht in der Herstellung einer Puppe, die einerseits dem Menschen möglichst gut nachgebildet und daher kompliziert ist, die andererseits aber reproduzierbare Ergebnisse liefert, also einfach aufgebaut sein muss. Bei der Konstruktion



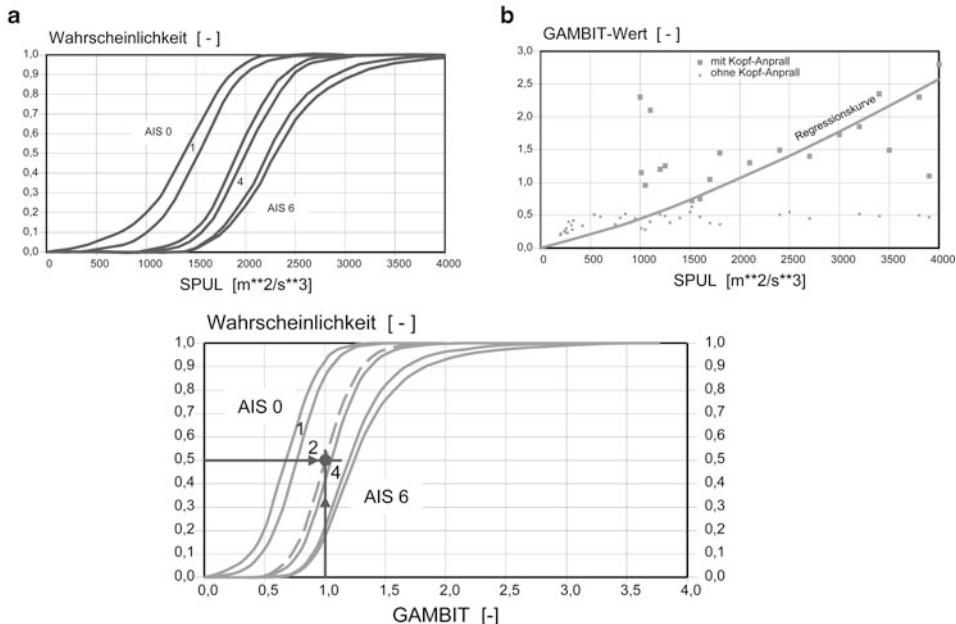
**Abb. 3.65** Versuchsaufbau zur Untersuchung von Traumata der Halswirbelsäule unter Verwendung von anästhetisierten Schweinen (aus [54])

derartiger Messpuppen sind Größe, Form, Massenverteilung, Kinematik und Gelenkcharakteristik des Menschen nachgebildet. Die beim Crash-Versuch am Dummy gemessenen Belastungen werden mit vorgegebenen Schutzkriterien-Levels verglichen, und je nach Über- oder Unterschreiten der Messwerte lässt sich auf „Tod“ oder „Überleben“ schließen. Zur Ermittlung der Schutzkriterien wurde eine Methode angewandt, bei der die Verletzungen von Unfallopfern mit den Belastungswerten von Dummies verglichen wurden, die unter mehr oder weniger vereinfachten Versuchsbedingungen messtechnisch ermittelt worden sind. Dabei wurden jeweils Einzelwerte miteinander verglichen; das reale Unfallgeschehen blieb ansonsten unberücksichtigt [33].

Bereits im Jahre 1978 wurden erstmals die wesentlichen Ansätze zum Verfahren der direkten Kopplung von Ergebnissen aus der Unfallanalyse und aus der rechnerischen Simulation dargestellt [55]. Dieses Verfahren ist in der Folgezeit, nicht zuletzt aufgrund zweier Forschungsprojekte [47, 56], zur so genannten **statistischen Biomechanik** [57] weiterentwickelt worden und in die Ergebnisse der genannten Forschungsprojekte eingeflossen. Mit Hilfe der „Methode der Äquivalenten Unfallkenngroße“ (EAC-Methode; EAC: Equivalent Accident Characteristics) wurden in [33] Risikofunktionen für alle relevanten Körperregionen bei sagittaler Belastung erarbeitet. Diese Methode dient der

Zusammenführung von Verletzungen und Belastungen und basiert auf folgenden Elementen (Abb. 3.66):

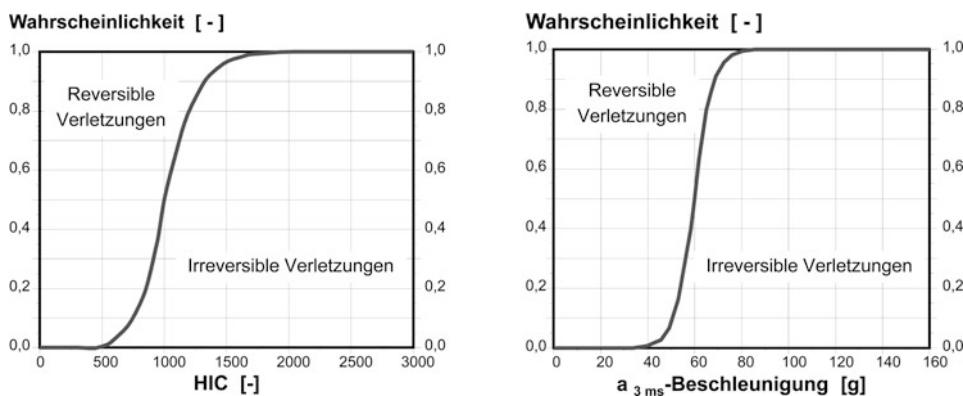
- Mit Hilfe der Analyse des Datenmaterials aus dem Unfallgeschehen werden Verletzungsschweregrade für alle relevanten Körperregionen bereitgestellt,
- die rechnerische Insassensimulation gestattet die Ermittlung von Belastungswerten an verschiedenen, mathematisch beschriebenen Körperteilen und
- die Unfallkenngroße SPUL (spezifische Unfall-Leistung) charakterisiert die Schwere des Frontal-Unfalls und bildet die Bezugsbasis zur Korrelation zwischen den Ergebnissen der Unfallanalyse und der rechnerischen Insassensimulation.



**Abb. 3.66** Bereitstellung der Risikofunktion für Kopfverletzungen aus Ergebnissen der Unfallanalyse (a) und der rechnerischen Insassensimulation (b)

Der in Abb. 3.66 dargestellte Zusammenhang zeigt die Wahrscheinlichkeit von Kopfverletzungen, ausgedrückt durch den Verletzungsschweregrad AIS [39], in Abhängigkeit von der äquivalenten Unfallkenngroße. Diese Unfallkenngroße charakterisiert die Unfallschwere (vgl. Abschn. 2.2.2); für Frontalkollisionen wurde in [33] hierfür die spezifische Unfall-Leistung (SPUL, Gl. 2.3) entwickelt und verwendet. Die Ergebnisse aus der rechnerischen Insassensimulation sind ebenfalls in Abhängigkeit von der spezifischen Unfall-Leistung dargestellt. Der für die Kopfbelastung angewandte GAMBIT-Wert berücksichtigt neben der translatorischen auch die rotatorische Kopfbeschleunigung des Insassenmodells, er wird in Abschn. 3.3.4 näher erläutert. Andere Belastungsgrößen für den Kopf

könnten beispielsweise auch der HIC- oder der  $a_{3\text{ ms}}$ -Wert sein. Bei gleicher Unfallschwere ergibt sich aus den Unfalldaten eine bestimmte Verteilung der Verletzungsschweregrade und aus der Insassensimulation eine bestimmte Kopfbelastung, sodass durch die Elimination der Unfallschwere schließlich ein Zusammenhang zwischen Verletzungswahrscheinlichkeit und Insassenbelastung hergestellt werden kann. Durch die Aufteilung der Verletzungsschweregrade – für den Kopf und die Extremitäten liegt die Grenze zwischen AIS 2 und 3, für die anderen Körperregionen zwischen AIS 3 und 4 – wird eine Grenzkurve bereitgestellt, mit deren Hilfe sich die Wahrscheinlichkeit für reversible und irreversible Verletzungen darstellen lässt. Bei dieser Grenzkurve, die in Abb. 3.66 gestrichelt dargestellt ist, handelt es sich um die Risikofunktion; sie gibt das Risiko für irreversible Verletzungen in Abhängigkeit von der jeweiligen Belastungsgröße an. In Abb. 3.67 sind die Risikofunktionen beispielhaft für Kopf- und Brustbelastung bei Frontalkollisionen gezeigt. Daraus lassen sich bei einer Wahrscheinlichkeit von  $P = 0,5$  die Schutzkriterien-Levels für HIC am Kopf und für  $a_{3\text{ ms}}$ -Beschleunigung der Brust ablesen.



**Abb. 3.67** Risikofunktion für Kopf- und Brustbelastung bei Frontalkollisionen

In allen genannten Verfahren wurde versucht, den lebenden Menschen als Unfallopfer einzubeziehen. Aber nur beim Verfahren der Statistischen Biomechanik wurde das reale Unfallgeschehen, zumindest soweit es für die PKW-Insassen relevant erschien, sowie das gesamte Kollektiv der PKW-Insassen berücksichtigt. Das vorrangige Ziel besteht aber weiterhin darin, die Konformität der bereitzustellenden Schutzkriterien und deren Levels zum lebenden Menschen zu gewährleisten. Dazu müssen im Bereich der Biomechanik, der Versuchs- und der Simulationstechnik noch weitere Anstrengungen unternommen werden, um die Übereinstimmung (Biofidelity) zwischen den verwendeten Dummys bzw. Modellen einerseits und dem lebenden Menschen andererseits zu verbessern. Wesentliche Schritte in diese Richtung sind in der Bereitstellung einer neuen Dummy-Generation (HYBRID III für sagittale und EuroSID für laterale Beanspruchung sowie BioRID für Heckkollisionen) und verbesserter Insassenmodelle zu sehen [33].

**Tab. 3.4** Sicherheitsgesetzgebung und Hinweise (durch Unterstreichung) auf Schutzkriterien

Kontrahentenschutz	StVZO	ECE	EU	USA	Schweden
<b>Fahrzeugaußenform</b>	32	26	74/483	–	117
<b>Radabdeckung</b>	36a	30	78/549	–	146(19)
<b>Radmuttern, -kappen</b>	32	26	74/483	211	–
<b>Kraftstoffversorgungsanlage</b>	45, 46	34	70/221	301	113, 131
<b>Haubenverschlussystem</b>	30	–	–	113	–
<b>Stoßfänger</b>	32	42	–	215	–
Selbstschutz	StVZO	ECE	EU	USA	Schweden
<b>Dacheindrückschutz</b>	30	29	–	216	–
<b>Seitentürfestigkeit</b>	–	95	–	<u>214</u>	–
<b>Türschlösser und Scharniere</b>	35a	11, 32, 33	70/387	206	111
<b>Lenksäulenverschiebung</b>	–	<u>12, 94</u>	74/287	204	107
<b>Windschutzscheibenbefestigung</b>	–	43	–	212	–
<b>Windschutzscheibeneindringung</b>	–	43	–	219	–
<b>Armaturenrettanprall</b>	30	<u>21, 32, 33</u>	<u>74/60</u>	<u>201, 208</u>	108
<b>Lenkradanprall</b>	30	<u>12, 94</u>	<u>74/297</u>	<u>203</u>	107
<b>Sonnenblendenanprall</b>	30	21	<u>74/60</u>	<u>201</u>	108
<b>Sitz, Sitzlehnen</b>	30, 35a	<u>16, 17, 21, 44, 80</u>	<u>74/60, 74/408</u>	<u>201, 207</u>	110
<b>Kopfstützen</b>	30	25, 80	<u>78/932</u>	202	–
<b>Sicherheitsgurte, Insassenschutzsysteme</b>	35a	<u>14, 16, 94, 95</u>	76/115, 77/541	<u>208, 209, 210</u>	109
<b>Kinderrückhaltesysteme</b>	35a	<u>44</u>	–	<u>213</u>	–
<b>Brennbarkeit von Innenraumteilen</b>	30	34	–	302	–
<b>Schutzhelme</b>	–	<u>22</u>	–	–	–

### 3.3.3 Gesetzlich festgelegte Schutzkriterien

Die in der internationalen Sicherheitsgesetzgebung festgelegten Schutzkriterien-Levels gewährleisten nur ein Mindestmaß an passiver Sicherheit, da sie wie alle derartigen gesetzlichen Regelwerke nicht den Stand der Wissenschaft widerspiegeln, sondern vielmehr Ausfluss des zur Zeit der Verabschiedung erzielbaren Konsenses zwischen Forschung, Entwicklung (Stand der Technik) und gesellschaftlichem (oftmals nur nationalem) Anspruch sind.

Die in den geltenden Vorschriften und Regelungen zur passiven Sicherheit enthaltenen Schutzkriterien lassen sich fast ausnahmslos auf die von der US-amerikanischen Verkehrsbehörde (Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration) seit Ende der 1960er Jahre erlassenen Vorschriften (FMVSS = Federal Motor Vehicle Safety Standard) bzw. die ihnen vorausgegangenen Grundlagen-Untersuchungen zurückführen. Diese bezogen sich vornehmlich auf die Insassen bei Frontalkollisionen, sie wurden dann später auf Seiten- und Heckkollisionen erweitert.

In Tab. 3.4 sind die wesentlichen in- und ausländischen Sicherheitsvorschriften den entsprechenden Teilbereichen der passiven Sicherheit zugeordnet. Die in der Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO) geforderten Zulassungsbedingungen beschreiben ledig-

lich allgemeine Anforderungen. Bei den Richtlinien der Europäischen Union (EU) und den Regelungen der Economic Commission for Europe (ECE), die inhaltlich weitgehend gleichlautend sind und teilweise auf US-Vorschriften basieren, liegt der Schwerpunkt auf Untersuchungen von Fahrzeugkomponenten. Mittlerweile werden Integraltests (Versuche mit kompletten Fahrzeugen) unter Verwendung von Dummies durchgeführt. Die frühesten Vorschriften sind in den USA in Form eines Verbraucher-Informationsprogramms durch die Verkehrsbehörde erlassen worden. Sie werden laufend ergänzt und den vermeintlichen Anforderungen angepasst. Im Gegensatz zur Betriebserlaubnis in Deutschland und im europäischen Ausland (teilweise aber auch in außereuropäischen Ländern, die sich den ECE-Regelungen unterwerfen) erfolgt die Zulassung in den USA und in Kanada nach dem Selbstbestätigungsverfahren. In Schweden muss die Zulassung für jedes Modelljahr neu erteilt werden. Die in Tab. 3.4 durch Unterstrichung gekennzeichneten Vorschriften enthalten Schutzkriterien-Levels, die unter Berücksichtigung bestimmter Testbedingungen nicht überschritten werden dürfen. Diese Grenzwerte sind in Tab. 3.5 zusammengefasst und den einzelnen Körperteilen zugeordnet, sie beziehen sich auf Frontal- und Seitenkollisionen.

Als Basis für die **Schutzkriterien-Levels für den Kopf** (vgl. Tab. 3.5) werden die aus den resultierenden, translatorischen Beschleunigungen, die im Kopfschwerpunkt des Dummies gemessen werden, abgeleiteten Schutzkriterien verwendet. Es sind dies das Kopfverletzungskriterium HIC (Head Injury Criterion, Gl. 3.4), das Maximum des zeitlichen Beschleunigungsverlaufs  $a_{\max}$  und der Beschleunigungswert  $a_{3 \text{ ms}}$ , der über einen gemessenen Zeitverlauf von 3 (bzw. bei Schutzhelm-Prüfung sind dies 5) Millisekunden andauert. Der Vollständigkeit halber wird in Tab. 3.5 zudem noch die maximal zulässige Widerstandskraft von hervorstehenden Teilen berücksichtigt. Ihr Maximum entspricht (bei einer angenommenen Kopfmasse von 4,8 kg) etwas mehr als der 8-fachen Erdbeschleunigung (8,4g). Es liegt damit weit unter den als kritisch erachteten Beschleunigungswerten und bleibt daher als Schutzkriterium im Weiteren unberücksichtigt.

Die als Grenzwert anzusehende Schwelle des HIC liegt nach den europäischen Sicherheitsgesetzen bei 1.000 [58, 59] und nach FMVSS 208 bei 390–700 [60], wobei die Formulierung des Ausdrucks

$$\text{HIC} = \max \left\{ \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2,5} \cdot (t_2 - t_1) \right\} \quad (3.4)$$

mit den Einheiten  $a$  [g] und  $t_{1/2}$  [s] der mathematischen Beschreibung der WSU-Kurve entspricht. Die „WSU-Kurve“ steht dabei für Wayne State University Cerebral Concussion Tolerance Curve [61, 62], die als Grenzkurve zwischen lebensgefährlichen und nicht lebensgefährlichen Hirnverletzungen ermittelt wurde (Abb. 3.68). Die bei Verwendung des HIC einzuhaltenden Randbedingungen, wie Anprall des Kopfes im Stirnbereich auf Strukturen, Filtercharakteristik und numerische Behandlung bei der rechnergestützten Datenverarbeitung des gemessenen Beschleunigung/Zeit-Signals u. a., sind vorgegeben (zusammengefasst in [6]). Insbesondere der Umstand des Kopfanpralls wurde jedoch bei

der experimentellen Anwendung und der Interpretation für das Kopf-Verletzungsrisiko häufig unberücksichtigt gelassen. Um diese Unzulänglichkeit zu vermeiden, wurden in den gesetzlichen Anforderungen die Kriterien HIC<sub>15</sub> und HIC<sub>36</sub> eingeführt; hierbei wird der HIC-Wert nach der obigen Formulierung beim HIC<sub>15</sub> nur im Intervall von  $t_2 - t_1 = 0,015$  s, also innerhalb von 15 ms, bzw. beim HIC<sub>36</sub> im Intervall  $t_2 - t_1 = 0,036$  s betrachtet.

Das 15 ms-Zeitintervall repräsentiert nach neuerer Biomechanik-Forschung den steifen, harten Aufprall, während das 36 ms-Intervall den „weicheren“ Kopfaufprall beschreibt. Die Kriterien-Levels HIC<sub>15</sub> = 700 und HIC<sub>36</sub> = 1.000 korrelieren direkt miteinander nach Gl. 3.4 [63]. Es ist also zu erkennen, dass der Schutzbedarf, aber auch die aktuelle Entwicklung bei der Festlegung der biomechanischen Schutzkriterien-Levels eine konsequente, begründete Reduzierung zur Folge hatte. Die Mitte der 1980er Jahre für das ECE-Reglement für Frontalkollisionen [58] zunächst vorgesehene und in verschiedenen Veröffentlichungen [64, 65, 66] diskutierte Anhebung des HIC-Wertes auf 1.250 oder gar auf 1.500 hat sich

**Tab. 3.5** Schutzkriterien und -Levels nach geltender Sicherheitsgesetzgebung

Körperteil	Vorschrift	Schutzkriterien-Level	Bemerkung
Kopf	FMVSS 208	HIC <sup>15</sup> = 390...700	Head Injury Criterion, berechnet aus der resultierenden Kopfbeschleunigung am Dummy
	FMVSS 213	HIC <sup>36</sup> = 1.000	
	ECE-R 94		
	FMVSS 201	HIC <sup>36</sup> = 1.000	Freifliegende Kopfkalotte, SAE J921 und J977. HIC-Wert wird korrigiert durch die Beziehung: HIC(d) = 0,75446 • HIC <sup>36</sup> + 166,4
	EWG 74/60	HIC <sup>36</sup> = 1.000	Kopfform
	EWG 78/932	a <sup>3ms</sup> = 80 g	
	ECE-R 12		
	ECE-R 21		
	ECE-R 22	a <sup>5ms</sup> = 150 g a <sup>3ms</sup> = 300 g	Prüfkörper bei Schutzhelm-Stoßdämpfungsuntersuchungen
	ECE-R 44		Sichtkontrolle: Kopfkontaktestellen
Halswirbelsäule	ECE-R 21	F = 378 N	Anprall auf vorstehende Innenraum-Teile mit Prüfkörper gemessen
	ECE-R 95	HPC = 1.000	Head Protection Criterion bei Seitenkollisionen; Berechnung nach der gleichen Formel wie HIC
	FMVSS 208	NI = 1,0 F <sub>max Zug</sub> = 4.170 N F <sub>max Druck</sub> = 4.000 N	Normalized Neck Injury Criterion; berechnet sich aus Hals-Zug- und -Druckkräften sowie dem Hals-Biegemoment Maximale Hals-Zugbelastung Maximale Hals-Druckbelastung
	ECE-R 94	NIC = 15 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> M <sub>max</sub> = 57 Nm	Neck Injury Criterion bei Frontalkollisionen; berechnet aus der Relativbeschleunigung zwischen Kopf und erstem Thoraxwirbel, Geschwindigkeit aus der Integration Hals-Biegemoment um die y-Achse

**Tab. 3.5** (Fortsetzung)

Körperteil	Vorschrift	Schutzkriterien-Level	Bemerkung
<b>Thorax</b>	FMVSS 208	SI = 1.000	Severity Index; berechnet aus der resultierenden Brustbeschleunigung am Dummy, SAE J885a
	FMVSS 208	s <sub>x</sub> = 50,8 mm	Brustkompression am Sternum relativ zur Wirbelsäule, außer bei Verwendung von Airbag-Systemen ( $s^* = 76,2 \text{ mm}$ )
	ECE-R 94	s <sub>x</sub> = 50,0 mm	Brustkompression am Sternum relativ zur Wirbelsäule
	FMVSS 208	a <sub>3me</sub> = 60 g	Resultierende Brustbeschleunigung am Dummy
	FMVSS 213		Resultierende Brustbeschleunigung am Kinder-Dummy bei dynamischen Untersuchungen von Kinder-Rückhaltesystemen
	ECE-R 94		
	FMVSS 214	TTI = 85 / 90 g	Brust-Traumatisierungsindex bei Seitenkollisionen: 85 g bei vier-türigen, 90 g bei zwei-türigen Fahrzeugen
	ECE-R 44	a <sub>3me</sub> = 55 g	Resultierende Brustbeschleunigung am Kinder-Dummy bei dynamischen Untersuchungen von Kinder-Rückhaltesystemen
	FMVSS 203	F = 11.100 N	Brustkorb des Körperblocks, SAE J944
	EWG 74/297		
	ECE-R 12		
	ECE-R 21	F = 378 N	Anprall auf vorstehende Innenraum-Teile mit Prüfkörper gemessen
<b>Abdominalbereich, Becken</b>	ECE-R 95	RDC = 42 mm	Laterale Eindrückung für alle drei Rippen bei Seitenkollisionen
	ECE-R 94	VC = 1,0 m/s	Viscous Criterion am Sternum bei Frontalkollisionen
	ECE-R 95		Viscous Criterion für alle drei Rippen bei Seitenkollisionen
	FMVSS 209		Beckengurt muss unter allen Testbedingungen einschließlich Kollisionen und Überschlag am Becken verbleiben. Gurtzitz am Becken darf sich nicht in die Bauchgegend verlagern
	FMVSS 214	a <sub>max</sub> = 130 g	Laterale Beckenbeschleunigung bei Seitenkollisionen
<b>Oberschenkel</b>	ECE-R 44		Kinder-Rückhaltesysteme dürfen keinen übermäßigen Druck in den Bauch und den Unterleib ausüben. Sichtkontrolle: Beschädigung des Modellier-Tons in der Bauchgegend
	ECE-R 95	F <sub>max</sub> = 2.500 N	Laterale Kraft auf Abdomen bei Seitenkollisionen
	ECE-R 95	F <sub>max</sub> = 6.000 N	Laterale Kraft gemessen an der Schambeinfuge (Symphysis pubica) bei Seitenkollisionen
	FMVSS 208	F = 10.000 N	Axiale Kraft am Oberschenkel
	ECE-R 94	F = 9.070 N bei 0 ms F = 7.580 N bei > 10 ms	Oberschenkel-Längskraft gemessen mittels Kraftmessgliedern im linken und rechten Dummy-Oberschenkel
<b>Knie</b>	ECE-R 94	s = 15 mm	Zulässige Gleitbewegung der Kniegelenke
<b>Schienbein</b>	ECE-R 94	TCFC = 8.000 N	Tibia Compression Force Criterion, maximale Kompressionskraft in axialer Richtung
		TI = 1,3	Tibia Index berechnet sich aus axialer Druckkraft und Biegemoment

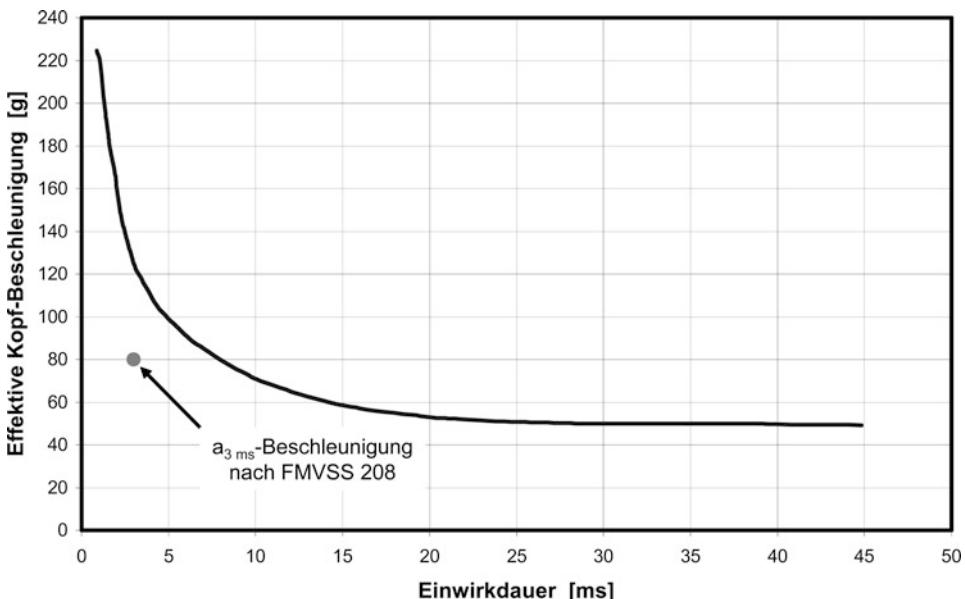
somit überholt und muss mehr sicherheitspolitisch motiviert als durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse getragen angesehen werden.

Das in dem europäischen Reglement ECE-R 95 für Seitenkollisionen [59] vorgeschriebene Kopf-Schutzkriterium HPC (= Head Protection Criterion) wird nach der gleichen

Vorschrift (3.4) berechnet wie das Kriterium HIC und weist den gleichen Level, nämlich HIC = 1.000, auf.

Der HIC-Wert ist bei sonst gleichen Bedingungen stark von der Charakteristik des Beschleunigung/Zeit-Verlaufs abhängig. Abbildung 3.69 zeigt verschiedene Verläufe und Näherungsformeln [67] zur Berechnung des HIC-Wertes, dabei reichen die HIC-Werte bei identischer Maximalbeschleunigung und gleicher Pulsdauer von 423 (Dreieck-Puls) über 712 (Halbsinus-Puls) bis 1.717 (Rechteck-Puls).

Der  $a_{3\text{ ms}}$ -Wert von 80g lässt sich ebenfalls auf die WSU-Kurve zurückführen, bei der allerdings die Dauer der Beschleunigung ebenso wie die „effektive Beschleunigung“ nur unzureichend definiert sind [6]. Unter Verwendung der Ergebnisse von GOT [68] ergibt der Grenzwert  $a_{3\text{ ms}} = 80\text{ g}$  einen Spitzenwert von etwa 125g. Dieser Wert entspricht dem 3 ms-Wert der WSU-Kurve (in Abb. 3.68 gekennzeichnet). Beim Schutzkriterien-Level aus der Schutzhelm-Vorschrift nach ECE R 22 wird als Zeitfenster ein Bereich von 5 Millisekunden vorgeschrieben, zudem wird ein höheres Beschleunigungsniveau, nämlich  $a_{5\text{ ms}} = 150\text{ g}$ , zugelassen; die Unterschreitung des maximalen Spitzenwertes von  $a_{\max} = 300\text{ g}$  wird als erträglich angesehen. Beier hält in [69] das vorgegebene Zeitfenster jedoch für überflüssig, zumindest für fragwürdig, indem er die Spitzenbeschleunigung, gestützt auf verschiedene Arbeiten [68, 70, 71], als geeignetes „Toleranzmerkmal“ für Verletzungen des menschlichen Gehirns ansieht.



**Abb. 3.68** WSU-Grenzkurve (= Wayne State University Cerebral Concussion Tolerance Curve) und der 3 ms-Wert von  $a = 80\text{ g}$

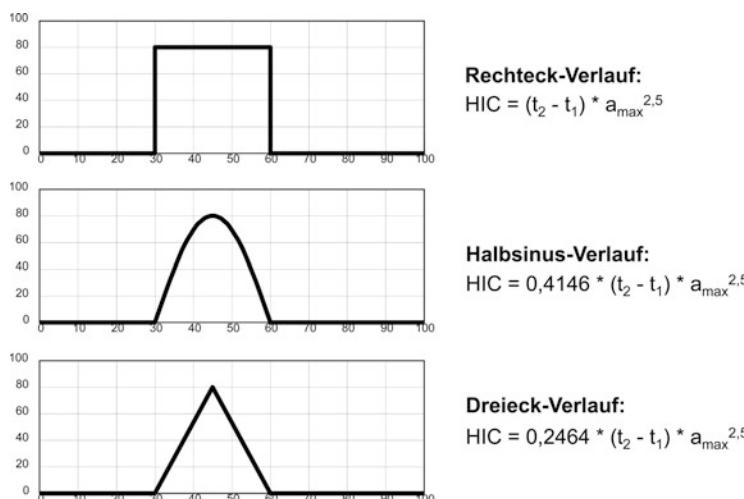
Die Ursache für Verletzungen der Halswirbelsäule sind Kräfte und Momente, die als Basis für den **Schutzkriterien-Level für den Hals** (Neck Injury Predictor) dienen; es lässt sich in vier Quadranten darstellen: Extension/Tension, Extension/Kompression, Flexion/Kompression und Flexion/Tension (vgl. Abb. 3.70). Die Kriterien für Halsverletzungen ergeben sich somit aus den axialen Druck- und Zugkräften am Übergang Kopf/Hals und deren Wirkdauer. Analog wird das Halsmoment aus dem Biegemoment um die Querachse am Übergang Kopf/Hals bei Extension-/Flexion-Bewegungen verwendet.

Als Schutzkriterien für den Hals existieren aber zwei weitere Kriterien: das Hals-Verletzungskriterium NIC (Neck Injury Criterion, nach [72]) und das normierte Hals-Verletzungskriterium  $N_{ij}$  (Normalized Neck Injury Criterion, nach [60]). Als Schutzkriterium wird das Kriterium NIC zur Beurteilung des Verletzungsrisikos der Halswirbelsäule angewandt, und zwar in der Zeitspanne bis 150 ms nach Kollisionsbeginn. Der Schutzkriterien-Level liegt bei  $NIC_{max} = 15 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ; es wird aus der Relativbeschleunigung zwischen Kopf und dem ersten Thoraxwirbel und der daraus integrierten Geschwindigkeit berechnet:

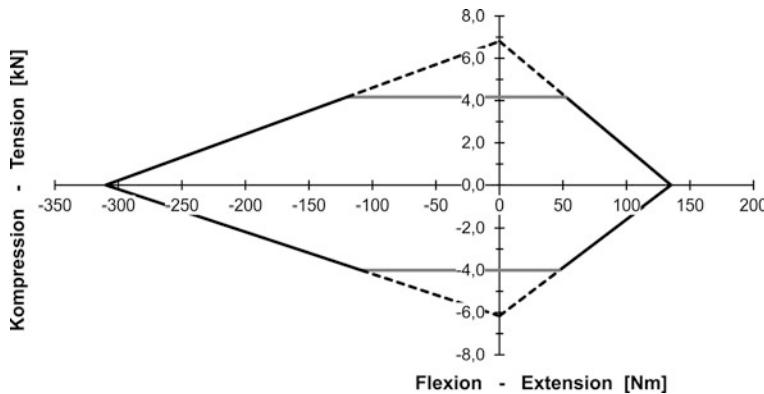
$$NIC(t) = 0,2 \cdot a_{\text{rel}}(t) + [(v_{\text{rel}}(t))^2] \quad (3.5)$$

$$\text{mit } a_{\text{rel}}(t) = a_x^{T1}(t) - a_x^{\text{Kopf}}(t) \quad \text{und} \quad (3.6)$$

$$v_{\text{rel}}(t) = \int a_{\text{rel}}(t) dt \quad (3.7)$$



**Abb. 3.69** Beschleunigung/Zeit-Verläufe und Näherungsformel zur HIC-Berechnung (nach [67])



**Abb. 3.70** Gültigkeitsbereich für Schutzkriterien für die Halswirbelsäule nach FMVSS 208 (Beispiel für den Schutzkriterien-Level, HYBRID III 50 %-Dummy)

Beim normierten Hals-Kriterium  $N_{ij}$  und den kritischen Werten für  $F_{zkrit}$  und  $M_{ykrit}$  wird die Insassengröße (bzw. die Größe des verwendeten Dummy) berücksichtigt, sie sind in Tab. 3.6 neben anderen Kriterien zusammengefasst und beispielhaft für den 50 %-Dummy in Abb. 3.70 dargestellt. Bei Verwendung des 5 %-Dummy sind zudem unterschiedliche Kriterien-Levels beim dynamischen und beim statischen Versuch zu berücksichtigen. Die Kräfte und die Momente werden zum selben Zeitpunkt am Übergang Kopf/Hals ermittelt. Die Berechnung basiert auf gemessenen Kräften und Momenten, die auf festgelegte kritische Werte bezogen werden:

$$N_{ij}(t) = F_{Nz}(t) + M_{Ny}(t) \leq 1,0 \quad (3.8)$$

$$\text{mit } F_{Nz} = F_z/F_{zkrit} \quad \text{und} \quad (3.9)$$

$$M_{Ny}(t) = M_y/M_{ykrit} \quad (3.10)$$

Die **Schutzkriterien-Levels für die Brust** (vgl. Tab. 3.5) beziehen sich zunächst auf die im Brustschwerpunkt des Dummy gemessene resultierende Beschleunigung. Dabei ist der Schwere-Index SI (Severity Index)

$$SI = \int_0^t [a(t)]^{2,5} dt \quad \text{mit } a \quad [g] \quad (3.11)$$

die ursprüngliche, von GADD [73] für den Kopf formulierte Beschreibung der WSU-Kurve, die als Schutzkriterium auch für die Brust mit dem Kriterien-Level 1.000 übernommen wurde [74].

In Abänderung des zulässigen  $a_{3ms}$ -Wertes für den Kopf wird der Grenzwert für die Brust auf 60g reduziert. Die Verwendung der Aufprallkraft sowohl in den europäischen Richtlinien und Reglements als auch in der US-amerikanischen Gesetzgebung bezieht sich eher auf den nicht angegurteten Insassen und ist nur aus der historischen Entwicklung

**Tab. 3.6** Schutzkriterien und -kriterien-Levels nach FMVSS 208 in Abhängigkeit von der Dummy-Größe und der Test-Konstellation

Sicherheits-standard	FMVSS 208 alt	FMVSS 208 – Final rule					
Dummy-Größe	HIII 50 %	HIII 50 %	HIII 5 %		6-jährig	3-jährig	12-monatig
Test-Konstellation		in Position dynamisch	in Position dynamisch	OoP statisch	OoP statisch	OoP statisch	OoP statisch
Schutzkriterien	Schutzkriterien-Level						
Kopf HIC	1.000 <sub>(36)</sub>	700 <sub>(15)</sub>	700 <sub>(15)</sub>	700 <sub>(15)</sub>	700 <sub>(15)</sub>	570 <sub>(15)</sub>	390 <sub>(15)</sub>
Genick-Kriterium N <sub>ij</sub>	—	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Genick F <sub>z krit</sub> [N] Zugbelastung	—	6.806	4.287	3.880	2.800	2.120	1.460
Genick F <sub>z krit</sub> [N] Druckbelastung	—	6.160	3.880	3.880	2.800	2.120	1.460
Genick M <sub>y krit</sub> [Nm] Beugung	—	310	155	155	93	68	43
Genick M <sub>y krit</sub> [Nm] Streckung	—	135	67	61	37	27	17
Genick F <sub>z max</sub> [N] Zugbelastung	—	4.170	2.620	2.070	1.490	1.130	780
Genick F <sub>z max</sub> [N] Druckbelastung	—	4.000	2.520	2.520	1.820	1.380	960
Brust a <sub>3 ms</sub> -Beschleunigung [g]	60	60	60	60	60	55	50
Brust-Eindrückung [mm]	76	63	52	52	40	34	keine Angabe
Oberschenkel-Längskraft [kN]	10,0	10,0	6,8	6,8	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe

der Sicherheitsgesetzgebung verständlich, da der angegurtete Insasse nur bei hoher Unfallschwere oder unsachgemäßer Gurtbenutzung mit der Brust auf das Lenkrad prallt. Bei der vorgegebenen maximalen Belastungskraft von 11.100 N, die gleichermaßen in den US-amerikanischen Sicherheitsstandards und in den EG-Richtlinien bzw. ECE-Reglements vorgegeben ist, entspricht der errechenbare Grenzwert bei einer Prüfblock-Masse von ungefähr 35 kg einer Beschleunigung von ca. 32g und ist somit erheblich niedriger als der 3 Millisekunden-Wert.

Der als zulässig angesehene Schutzkriterien-Level für Kinder-Rückhaltesysteme ist im Reglement ECE-R 44 auf 50g festgesetzt und somit niedriger als für den erwachsenen Insassen. Es gilt für Kinder-Dummys in den Altersstufen 9 Monate, 3, 6 und 10 Jahre, während die US-amerikanischen Standards beim 12-monatigen Kinder-Dummy 50g,

beim Dreijährigen 55g und beim sechsjährigen Kinder-Dummy sowie beim Erwachsenen-Dummy 60g als Kriterien-Level für die Zeitschranke von 3 Millisekunden zulassen. Die genannte ECE-Regelung zur Überprüfung von Kinder-Rückhaltesystemen beinhaltet darüber hinaus eine Besonderheit in Form des Schutzkriteriums für die Longitudinalbelastung der Wirbelsäule: Als Grenzwert dafür ist die vertikal gemessene Beschleunigungsdifferenz zwischen „Unterleib und Kopf“ mit einem Grenzwert von  $\Delta a_{3\text{ms}} = 30\text{g}$  festgelegt. Der Ansatz erscheint allerdings aufgrund der verschiedenen Mess-Zeitpunkte fragwürdig.

Neben den Beschleunigungen bzw. dem daraus abgeleiteten SI-Wert und der Aufprallkraft wird seit 1986 in den US-amerikanischen Standards (FMVSS 208) ein Schutzkriterium in Form des relativen Kompressionsweges zwischen Sternum und Wirbelsäule vorgeschrieben. Der Test-Grenzwert von 50,8 Millimetern (= 2 in) darf für solche Belastungen nicht überschritten werden, die durch den Anprall auf Flächen jedweder Art hervorgerufen werden. Ausgenommen hiervon ist der Kontakt zwischen Insassen und Airbag-Systemen, da hierbei eine großflächige Krafteinleitung in den Rumpf unterstellt wird; in diesen Fällen beträgt der Grenzwert 76,2 mm (= 3 in) [60]. Daraus folgt, dass bei der ausschließlichen Nutzung von Gurtsystemen der kleinere Grenzwert eingehalten werden muss.

Die Kompression der Brust wird auch bei lateraler Belastung in der ECE-R 95 vorgeschrieben [59], dabei darf die maximale Rippeneindrückung einer der drei Dummy-Rippen (EuroSID) relativ zur Wirbelsäule einen Wert von  $RDC = 42\text{ mm}$  (RDC: Rib Deflection Criterion) nicht überschreiten. Als zusätzliches Schutzkriterium wird bei Seitenkollisionen das von Viano et al. in [75] formulierte Viskositätskriterium VC (Viscous Criterion) verwendet. Es setzt sich aus den zwei physikalischen Größen, dem relativen Kompressionsweg  $c(t)$  und der Kompressionsgeschwindigkeit  $v(t)$ , zusammen:

$$VC = \max \{c(t) \cdot v(t)\} = \max \left\{ \frac{s(t)}{\text{halbe Thorax - Breite}} \cdot \frac{d[s(t)]}{dt} \right\}. \quad (3.12)$$

In [76] werden Ergebnisse aus Leichenversuchen gezeigt, bei denen bei Werten  $VC > 1,0\text{ m/s}$  nur noch irreversible Verletzungen mit Verletzungsschweregraden von AIS 4 und 5 aufgetreten sind. Dieses Schutzkriterium wurde im Reglement für Frontalkollisionen ECE-R 94 [58] ebenfalls festgeschrieben und wird als Schutzkriterium für sagittale Thorax-Belastungen angewandt. Die Berechnung des Viskositätskriteriums VC erfolgt jedoch in der Form

$$\begin{aligned} VC &= \max \{c(t) \cdot v(t)\} \\ &= \max \left\{ \frac{D(t)}{0,229} \cdot \frac{8 \cdot [D(t+1) - D(t-1)] - [D(t+2) - D(t-2)]}{12 \cdot \Delta t} \right\} \end{aligned} \quad (3.13)$$

mit  $D(t)$ : Eindrückung [ $\text{m}$ ] zum Zeitpunkt  $t$ ,

$\Delta t$ : Zeitintervall [ $\text{s}$ ] zwischen den einzelnen Messungen, es soll maximal  $\Delta t_{\text{max}} = 1,25 \cdot 10^{-4}\text{ s}$  betragen.

Der von Eppinger et al. in [77] für laterale Brustbelastungen definierte Verletzungsindeks TTI (Thoracic Trauma Index)

$$\text{TTI} = 1,4 \cdot \text{Alter} + 1/2 \cdot (\text{RIB}_y + \text{T12}_y) \cdot \frac{m}{m_{\text{Strd}}} \quad (3.14)$$

basiert auf einer Analyse von Ergebnissen aus mehreren Schlittenversuchsreihen unter Einsatz von Leichen, durchgeführt an der Universität Heidelberg, bei der ein deutlicher Einfluss des Alters der post-mortalen Testobjekte (PMTO) festgestellt werden konnte. Der Beschleunigungsterm beschreibt den Mittelwert der maximalen lateralen Beschleunigungswerte an der vierten, stoßseitigen Rippe  $\text{RIB}_y$  und am zwölften Brustwirbel  $\text{T12}_y$ . Durch die Masse  $m$  des Testobjekts bezogen auf eine Standard-Masse von  $m_{\text{Strd}} = 75 \text{ kg}$  wird der Beschleunigungsterm skaliert [21]. Zur Anwendung beim experimentellen Einsatz am Seiten-Dummy SID (Side Impact Dummy) wurde die obige Beziehung in [78] unter Vernachlässigung des Alterseinflusses in der Form

$$\text{TTI} = 1/2 \cdot (a_{y \max}^{\text{Rippe}} + a_{y \max}^{\text{Wirbel}}) \quad (3.15)$$

abgewandelt und zum Vergleich verschiedener, seitlich belasteter Dummies (US-SID, Euro-SID) verwendet. Die dabei gemessenen Maximalwerte der lateralen Beschleunigungskomponente an einer der Rippen und der an der unteren Wirbelsäule (in Höhe des Wirbels T12) werden als Maß für die wirksame Belastung des Brustkorbes in seitlicher Richtung angesehen. Unabhängig von der Belastungsrichtung ist die Beschleunigungsdifferenzmessung nicht unproblematisch, da sich im Allgemeinen die Phasenlage voneinander unabhängiger Messungen auf die Höhe der absoluten Beschleunigungsdifferenz auswirkt.

Obwohl bei allen sicherheitstechnischen Untersuchungen am Dummy in der Regel die Beckenbeschleunigung gemessen wird, existiert derzeit für die sagittale Belastungsrichtung kein gesetzlich vorgeschriebenes **Schutzkriterium für den Becken-/Bauchbereich** (vgl. Tab. 3.5). Es werden lediglich Sichtprüfungen vorgeschrieben und Hinweise gegeben, dass während der jeweiligen Untersuchung der Beckengurt „am Becken bleiben“ muss und der „Gurtsitz nicht in die Bauchgegend verlagert“ werden darf (nach FMVSS 209). Bei der Überprüfung von Kinder-Rückhaltesystemen nach ECE R 44 wird zur Überprüfung der Gurtverlagerung Modellierton in der Bauchgegend aufgebracht, der nach dem Test nicht beschädigt sein darf. In den Prüfvorschriften ECE-R 94 [58] sind keine Kriterien zur Kontrolle des Submarining-Effekts enthalten.

Für die laterale Belastung wurde mit Einführung der Seitenauftprall-Versuche nach FMVSS 214 im Jahre 1990 die Querbeschleunigung als Schutzkriterium berücksichtigt; sie weist einen Test-Grenzwert von  $130 \text{ g}$  auf. Dem gegenüber werden im europäischen Reglement ECE-R 95 für Seitenkollisionen [59] Maximal-Kräfte als Schutzkriterien vorgesehen: die Grenzwerte liegen für die Abdominalkraft (APF: Abdominal Peak Force) bei  $2,5 \text{ kN}$  und für die Beckenkraft (gemessen an der Schambeinfuge (PSPF: Pubic Symphysis Peak Force) bei  $6,0 \text{ kN}$ .

Als **Schutzkriterium für die Extremitäten** (vgl. Tab. 3.5) existiert die Oberschenkel-längskraft aus den gesetzlich fixierten Anforderungen. Dabei kann dieses Kriterium aufgrund des engen kinematischen Zusammenhangs mit dem Becken auch als Submarining-Kriterium aufgefasst werden. Adomeit stellt in [79] dazu fest, dass Knieverletzungen nur bei allzu großen Beckenvorverlagerungswerten auftreten. Derartig große Beckenvorverlagerungen können aber in der Regel als Folge des Hochrutschens des Beckengurtes in den Abdominalbereich, also ein Untertauchen (Submarining) des Beckens unter der Gurt-schlinge hindurch, angesehen werden [33]. Dieser Zusammenhang gilt allerdings nur in den Fällen, bei denen das Insassenschutz-System ohne den Einsatz eines Kniepolsters wirk-sam ist.

Aufgrund unterschiedlich wirkender Kräfte zwischen Oberschenkel und Schienbein kann eine Verschiebung im Knie (vgl. Abb. 3.52) auftreten, die ein Risiko für Verletzungen im Knie in Form von Bänderrupturen darstellen. Als Schutzkriterium für das Kniegelenk wurde daher die Verschiebung zwischen Ober- und Unterschenkel eingeführt und mit ei-nem maximalen Wert von 15 mm im Reglement ECE-R 94 festgeschrieben [58].

Zur Bewertung des Verletzungsrisikos am Schienbeinknochen (Tibia) wurden zwei Kri-terien entwickelt, die im Reglement ECE-R 94 für Frontalkollisionen festgeschrieben sind und in EuroNCAP auch bei Seitenkollisionen gefordert werden. Sie beurteilen die Wahr-scheinlichkeit einer Fraktur des Schienbeins, die sich in langen Heilungsprozessen und ent-sprechend hohen Verletzungsfolgekosten widerspiegelt. Das Kompressionskraft-Kriterium TCFC (Tibia Compression Force Criterion) am Schienbein bewertet die axiale Druck-kraft, die zwischen dem unteren und oberen Ende des Unterschenkels eingeleitet wird; sie darf den Schutzkriterien-Level von 8,0 kN nicht überschreiten. Dieser Wert wurde von Yamada et al. in [80] als maximal tolerierbare Schwelle aufgrund von Versuchsergebnis-sen festgelegt. Da bei Kontakt mit der Instrumententafel nicht nur Kompressionskräfte sondern vor allem Biegemomente auftreten, wurde von Mertz et al. in [81] der Schienbein-Index TI (Tibia Index) entwickelt, bei dem Schwellenwerte aus kombinierten Biege- und Kompressionsbelastungen auf der Basis einer Regressionsanalyse ermittelt wurden und als Schutzkriterium Eingang in die Bewertung des Verletzungsrisikos fanden. Der Tibia-Index errechnet sich nach Gl. 3.16 und darf den Level von 1,3 – ursprünglich lag der Wert bei TI = 1,0 – nicht überschreiten:

$$TI = \left| \frac{F_z}{F_{z\text{krit}}} \right| + \left| \frac{M_{\text{res}}}{M_{\text{res\,krit}}} \right| \quad (3.16)$$

$$\text{mit } M_{\text{res}} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2} \quad \text{wobei gilt:} \quad (3.17)$$

$F_z$ : axiale Druckkraft [kN] in  $z$ -Richtung,

$F_{z\text{krit}}$ : kritische Druckkraft [kN] in  $z$ -Richtung, vgl. Tab. 3.7,

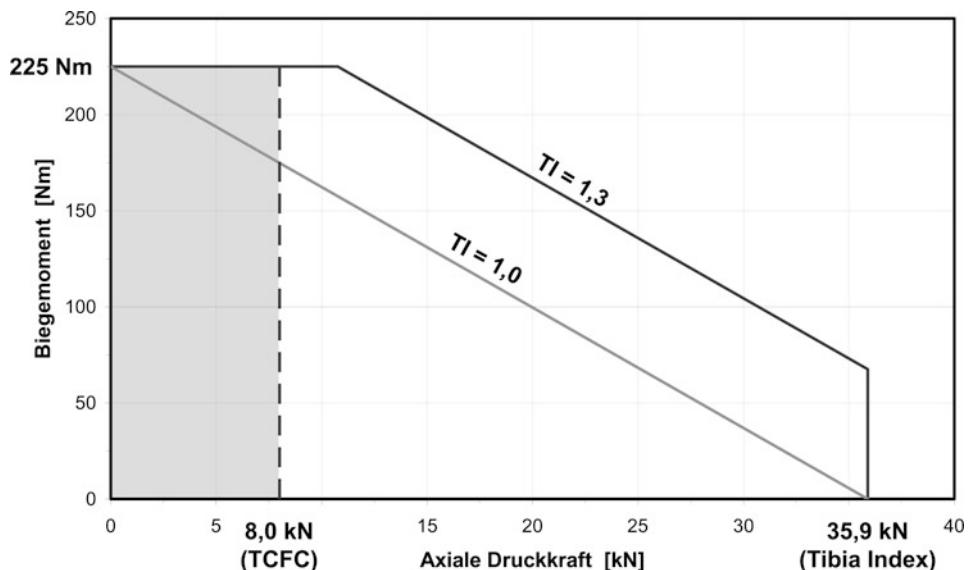
$M_x$ : Biegemoment [Nm] um die  $x$ -Achse,

$M_y$ : Biegemoment [Nm] um die  $y$ -Achse und

$M_{\text{res\,krit}}$ : kritisches Biegemoment [Nm], vgl. Tab. 3.7.

**Tab. 3.7** Kritische Kräfte und Momente zur Berechnung des Tibia-Indexes in Abhängigkeit von der Dummy-Größe

Dummy	Krit. Druckkraft	Krit. Biegemoment
	$F_z \text{ krit}$	$M_{\text{res krit}}$
	[kN]	[Nm]
HYBRID III, male 95 %	44,2	307
HYBRID III, male 50 %	35,9	225
HYBRID III, female 5 %	22,9	115



**Abb. 3.71** Grenzlinien des Schienbein-Indexes TI (Tibia Index), beispielhaft für den 50 %-Dummy

Es fällt auf, dass die in Tab. 3.7 für den Tibia-Index angegebenen Schutzkriterien-Levels deutlich höhere Werte als der maximal erträglichen axialen Druckkraft von 8,0 kN nach dem Kompressionskraft-Kriterium TCFC am Schienbein aufweisen. Folgt man der in Abb. 3.71 (für den 50 %-Dummy) dargestellten Linie für  $TI = 1,3$ , so beträgt bei zunehmender Druckkraft (auch über 8,0 kN hinaus) das maximal mögliche resultierende Biegemoment  $M_{\text{res}} = 225 \text{ Nm}$ , es wird erst ab einer Kraft von  $F_z > 10,8 \text{ kN}$  auf niedrigere Werte reduziert. Bei einer maximal zulässigen Kraft von  $F_z = 35,9 \text{ kN}$ , die für  $TI \leq 1,3$  nicht überschritten werden darf, weist das Biegemoment immerhin noch einen Wert von  $M_{\text{res}} = 67,5 \text{ Nm}$  auf. Es lässt sich anhand der Darstellung in Abb. 3.71 aber leicht

nachvollziehen, dass die parallel im europäischen Reglement ECE-R 94 einzuuhaltenden Schutzkriterien-Levels TCFC und TI widersinnig erscheinen, da das Schutzkriterium  $TI = 1,3$  für eine axiale Druckkraft  $F_{max} > 8,0 \text{ kN}$  gar nicht ausgeschöpft werden darf. Es wäre daher nur folgerichtig, als Schutzkriterium lediglich den Bereich zuzulassen, der durch das Biegemoment  $M_{res \text{ krit}} = 225 \text{ Nm}$  und die axiale Druckkraft  $TCFC = 8,0 \text{ kN}$  begrenzt wird (vgl. den grau hervorgehobenen Bereich in Abb. 3.71).

### 3.3.4 Schutzkriterien in der Diskussion

Die in der Sicherheitsgesetzgebung festgelegten Schutzkriterien unterliegen seit ihrer Etablierung einem fortwährenden Disput, in dessen Verlauf die Höhe der verschiedenen Levels angezweifelt, zumindest aber hinterfragt wird. Darüber hinaus werden aber auch die Kriterien selbst im Hinblick auf ihre Aussagefähigkeit diskutiert und alternative verletzungsrelevante Belastungs- und Schutzkriterien vorgeschlagen. Mit den nachfolgenden Ausführungen soll ohne Anspruch auf Vollständigkeit der derzeitige Diskussionsstand aufgezeigt werden.

Die qualitative Entwicklung der biomechanischen Forschung kann mit den 1970er Jahren im Wesentlichen als abgeschlossen angesehen werden. Aufgrund erheblich verbesselter experimenteller und rechnerischer Möglichkeiten hinsichtlich Versuchs-, Mess-, Auswerte- und Simulationstechnik ist allerdings ein quantitativer Fortschritt zu beobachten. Der Grunddissens jedoch, der in der Problematik der Übertragbarkeit von verletzungsinduzierenden Belastungen an physikalischen und theoretischen Modellen auf den lebenden Menschen gesehen werden muss, besteht nach wie vor.

Bei der **Belastung des menschlichen Kopfes** während eines Unfalls ist von zwei unterschiedlichen Erscheinungsformen auszugehen: Von der translatorischen und der rotatorischen Beanspruchung. Im Falle eines Kopfanpralls dominiert im Allgemeinen die translatorische, beim Schräg- oder Nichtanprall die rotatorische Belastung. Zudem kann tendenziell festgestellt werden, dass ohne Kopfanprall keine Schädelverletzungen auftreten. Findet ein Kontakt zwischen Kopf und Fahrzeugteilen statt, so treten – je nach Intensität – Gehirnverletzungen alleine oder in Verbindung mit Schädelverletzungen auf [6, 82].

Unter Berücksichtigung der Beanspruchungs- und Verletzungsarten lassen sich die Belastungs- und Schutzkriterien unterscheiden. Die in Tab. 3.8 zusammengefassten Kriterien werden nach den Verletzungsarten unterteilt: Beim knöchernen Schädel führt die Kontaktkraft (gemessen wird in der Regel die translatorische Beschleunigung, neuerdings auch ein Kraftäquivalent [83]) zu Verletzungen, d. h. zu Frakturen. Die scheinbare Unabhängigkeit zwischen Kraft und Beschleunigung ist auf die Auswertung voneinander unabhängiger Untersuchungen zurückzuführen, bei denen unterschiedliche Versuchsbedingungen zugrunde gelegen haben [84]. Dabei sind die Parameter Anstoßfläche (Größe, Steifigkeit) und Krafteinleitungsstelle am Kopf (Stirn, Nase, Ober-, Unterkiefer) von grundlegendem Einfluss; die Belastungsgrenzen am Gesichtsschädel liegen deutlich unterhalb der Grenzen des Hirnschädels.

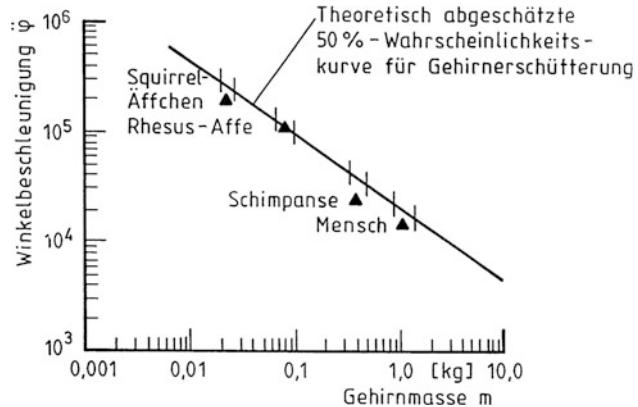
Bei Gehirnverletzungen ist wegen der biomechanischen Gesetzmäßigkeiten gleichermaßen die translatorische wie die rotatorische Beanspruchung von Bedeutung. Für die translatorische Belastung, die Verletzungen sowohl an der stoßzugewandten (Contusio cerebri am Stirnpol) als auch an der stoßgegenüberliegenden Stelle (Contre-coup-Wirkung) zur Folge haben kann, stehen die Beschleunigungen und die daraus abgeleiteten, zeitlich gewichteten Kriterien HIC (Head Injury Criterion) und SI (Severity Index) als Verletzungsindikatoren zur Diskussion; sie gehen auf die im vorstehenden Kapitel erwähnte WSU-Toleranzkurve zurück. Aus einfachen theoretischen Modellen, deren Eigenschaften mit Hilfe von Impedanzmessungen bei Tierversuchen abgeglichen wurden, sind in [85] verschiedene, als tolerierbar erachtete Relativverschiebungen zwischen Gehirn und Hirnschädel (= Neurocranium: Schädelkalotte und -basis) zusammengestellt und mit den „klassischen“ Kriterien verglichen worden. Eine Erweiterung in alle Belastungsrichtungen erfuhr das Kriterium der „zulässigen Verschiebung“ (MSC = Maximum Strain Criterion bzw. NMSC = New Mean Strain Criterion) durch die Ermittlung weiterer mechanischer Kenngrößen mit Hilfe von Tierversuchen, bei denen die Belastungen aus verschiedenen Richtungen aufgebracht wurden. Damit kann das Verschiebungskriterium nicht mehr nur für den sagittalen, sondern auch für den lateralen Aufprall angewandt werden [86].

Die rotatorische Beanspruchung des Kopfes bewirkt meist großflächige Gehirnblutungen aufgrund der trügheitsbedingten Relativbewegung zwischen Schädel und Gehirn. Dabei kommt es bei Überschreitung einer bestimmten Relativverschiebung zum Reißen der Brückenvenen [6]. In den Grundlagenarbeiten zu Belastungskriterien in Form von Winkelbeschleunigungen (z. B. in [87] bis [92]) wurden Laborversuche an Köpfen von Affen durchgeführt, bei denen Versuchseinrichtungen mit und ohne Aufnahmemanschetten zur Fixation der Halswirbelsäule verwendet [89, 91] bzw. in Impaktor-Einrichtungen eingespannten Affen einer gezielten Belastungen ausgesetzt [88, 92] wurden. Die Übertragung der dabei ermittelten Grenzwerte auf den menschlichen Kopf erfolgte durch den Ansatz ähnlichkeitstechnischer Zusammenhänge (Abb. 3.72). Die in Tab. 3.8 angegebene, relativ große Bandbreite des Belastungskriterien-Levels ist auf den zusätzlichen Einfluss verschiedener anderer Parameter wie der translatorischen Beschleunigung, der Winkelgeschwindigkeit und der Einwirkdauer (vgl. Abb. 3.73) zurückzuführen. Zum anderen wurden in den Untersuchungen unterschiedliche Verletzungsarten (Kontusions- bzw. Kommotions-syndrom) und Toleranzschwellen zugrunde gelegt.

Zum Auffinden eines physikalischen Äquivalents für Kopfverletzungen ist die getrennte Betrachtung der translatorischen und der rotatorischen Beanspruchung unzureichend, da Schädelfrakturen in Verbindung mit einer Hirntraumatisierung zwar in der Regel auf die Einwirkung stumpfer Gewalt (etwa beim Kopfanprall) zurückgeführt werden können und damit die translatorische Kopfbeschleunigung ausreichend erscheint, Schädel/Hirn-Verletzungen aber sowohl aus translatorischen als auch aus rotatorischen Relativbewegungen resultieren. Eine Möglichkeit der gemeinsamen Bewertung beider Beanspruchungsarten wurde von Newman in [94] mit dem Beschleunigungsmodell für die Gehirnverletzungsschwelle (GAMBIT: Generalized Acceleration Model for Brain Injury Threshold)

**Tab. 3.8** Schutz- und Belastungskriterien-Levels für den Kopf (nach [33, 84])

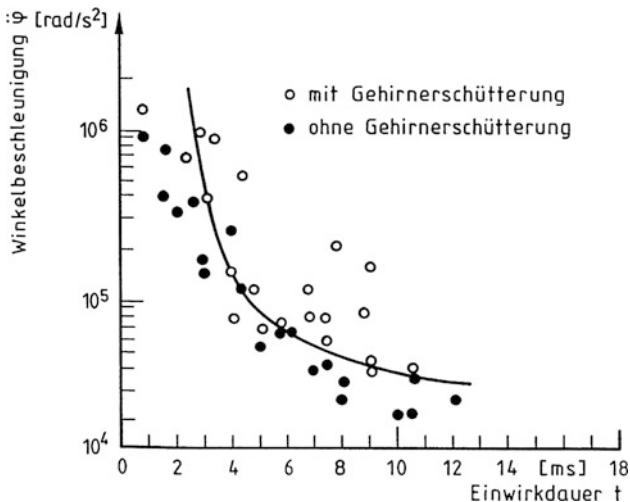
Körperregion	Kriterium	Level	Bemerkungen
Schädelkalotte und-basis	$a_{\max}$	80 g	abhängig von der Größe der Stoßfläche
	$F_{\max}$	930 ... 9.000 N	Frakturen der Schädelknochen
Gesichtsschädel	$F_{\max}$	800 ... 4.500 N	Frakturen des Gesichtsschädels
Gehirn	$a_{\max}$	100 ... 300 g	
	$a(\Delta t)_{\max}$	60 g	Grenzbeschleunigung nach der WSU-Toleranzkurve; für $\Delta t > 45$ ms
	HIC	1.000	
	SI	1.000 ... 1.500	
	$x_{\text{rel}}$	0,9 ... 3,8 cm	Relativverschiebung zwischen Gehirn und Hirnschädel
	$\ddot{\varphi}_{\max}$	1,8 ... 25,0 krad/s <sup>2</sup>	Drehwinkelbeschleunigung, abhängig vom Wert der gleichzeitig wirksamen translatorischen Beschleunigung
	GAMBIT	0,2 ... 3,0	Ergebnis aus rechnerischer Insassensimulation ohne und mit Kopfanprall

**Abb. 3.72** Übertragung der an Affen ermittelten Verletzungsschwellen für Gehirnerschüttungen auf den Menschen (nach [93])

vorgeschlagen:

$$\text{GAMBIT} = \sqrt[k]{\left(\frac{a}{a_c}\right)^n + \left(\frac{\ddot{\varphi}}{\dot{\varphi}_c}\right)^m}. \quad (3.18)$$

**Abb. 3.73** Toleranz-Kurve für Rhesusaffen – Winkelbeschleunigung in Abhängigkeit von der Einwirkdauer (nach [93])

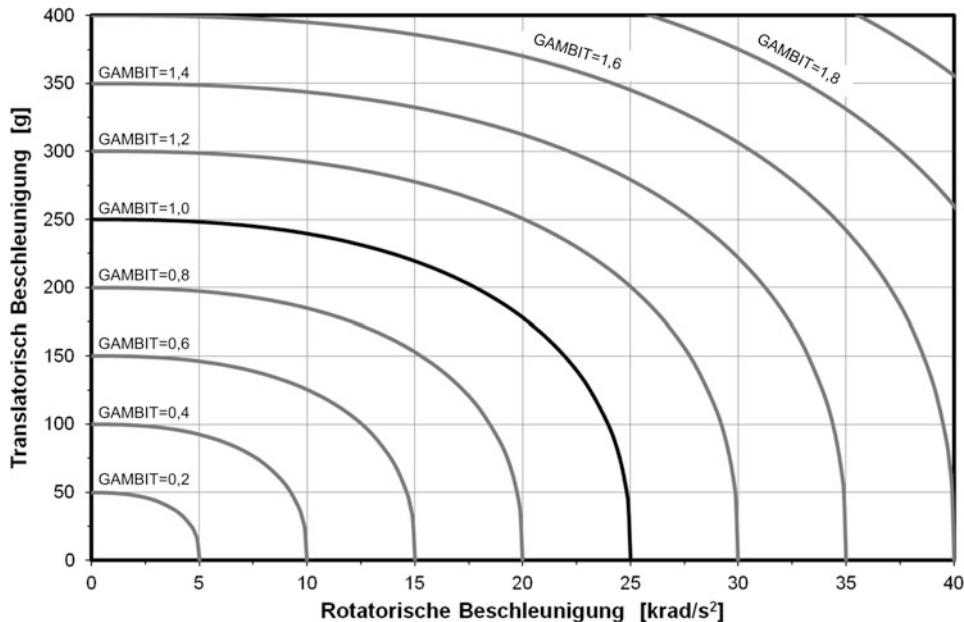


Dabei kennzeichnet  $a$  die translatorische und  $\ddot{\varphi}$  die rotatorische Beschleunigung, die jeweils auf ihre Schwellwerte, mit  $c$  indiziert, bezogen werden. Unter Anwendung der Statistischen Biomechanik, bei der Kopfverletzungen aus der Unfallanalyse und Beschleunigungen aus der rechnerischen Insassensimulation korreliert wurden, konnten in [33] mit Hilfe der Variationsrechnung die unbekannten Variablen der Gleichung so bestimmt werden, dass sie in der Form

$$\text{GAMBIT} = \sqrt[2,5]{\left(\frac{a}{250}\right)^{2,5} + \left(\frac{\ddot{\varphi}}{25}\right)^{2,5}} \quad (3.19)$$

mit den Einheiten der translatorischen  $a$  [ $g$ ] und der rotatorischen Beschleunigung  $\ddot{\varphi}$  [ $\text{krad/s}^2$ ], angewandt werden konnte (vgl. Abb. 3.66). Die GAMBIT-Grenzkurve, die mit einer 50 %-igen Wahrscheinlichkeit ( $P = 0,5$ ) reversible und irreversible Verletzungen voneinander trennt, weist den Wert  $\text{GAMBIT} = 1,0$  auf; ohne Kopfanprall wurden Werte von  $\text{GAMBIT} \leq 0,62$  ermittelt. In Abb. 3.74 sind die Grenzkurve  $\text{GAMBIT} = 1,0$  sowie Kurven mit konstanten GAMBIT-Werten in Abhängigkeit der translatorischen und der rotatorischen Kopfbeschleunigung dargestellt. Die in Gl. 3.19 gezeigten Schwellwerte und die Exponenten konnten durch neuere Arbeiten (z. B. in [95]) im Wesentlichen bestätigt werden.

In verschiedenen Studien zum Einfluss der Belastungsrichtungen konnte festgestellt werden, dass der HIC-Wert nicht für alle Aufprallarten unmittelbar angewandt werden kann. Daher wird zur Zeit ein globales, auf der Aufprallkinetik basierendes Kopf-Schutzkriterium HIP (Head Impact Power) entwickelt [96], das insbesondere bei der rechnerischen Simulation, sowohl bei MKS- (Mehrkörper-System-) als auch bei FEM- (Finite Elemente Methode-) Modellen, einsetzbar ist. Damit können Kriterien-Levels für verschiedene Richtungen unter Berücksichtigung ausgewählter Versagenskriterien bestimmt wer-



**Abb. 3.74** GAMBIT-Kurven zur Bewertung der translatorischen und der rotatorischen Kopfbeschleunigung

den. Die Kopf-Aufprall-Leistung HIP lässt sich berechnen in der Form

$$\begin{aligned} \text{HIP} = & m \cdot a_x \int a_x dt + m \cdot a_y \int a_y dt + m \cdot a_z \int a_z dt \\ & + I_{xx} \cdot a_x \int a_x dt + I_{yy} \cdot a_y \int a_y dt + I_{zz} \cdot a_z \int a_z dt \end{aligned} \quad (3.20)$$

Dabei ist die  $x$ -Achse in posterior/anterior-Richtung, die  $y$ -Achse in lateraler Richtung und die  $z$ -Achse in interior/superior-Richtung definiert; die Einheit entspricht der einer Leistung [ $\text{Nm/s} = \text{W}$ ]. Als Schutzkriterien-Level wird derzeit ein Wert von  $\text{HIP}_{\max} \leq 4,3 \text{ kW}$  diskutiert.

Aufgrund der hohen Beweglichkeit und der komplizierten mechanischen Struktur von **Halswirbelsäule (HWS) und Hals** treten vielfältige Verletzungsmuster und dementsprechend verschiedenartige Belastungskriterien in Erscheinung. Tabelle 3.9 umfasst Kriterien sowohl für HWS-Verletzungen als auch für Verletzungen aufgrund direkt in den Hals eingeleiteter Belastungen. Kriterien für Oberflächen- und Muskel-Verletzungen sind nicht enthalten, da diese entweder nur eine geringe Schwere aufweisen oder in Verbindung mit Kopf-, HWS-Verletzungen oder Schleudertraumata auftreten [97].

Bei den dargestellten Belastungskriterien kann die erste Gruppe in Tab. 3.9 auf die Relativbewegung (anterior/posterior) zwischen Kopf und Brust zurückgeführt werden. Die unterschiedlichen Belastungsgrößen resultieren aus den jeweiligen Testbedingungen und

**Tab. 3.9** Schutz- und Belastungskriterien-Levels für den Hals (nach [33])

Körperregion	Kriterium	Level	Bemerkungen
Halswirbelsäule	$a_{a-p \text{ max}}$	30 ... 40 g	Flexion; anterior in Thorax eingeleiteter Stoß
	$a_{p-a \text{ max}}$	15 ... 18 g	Extension; posterior in Thorax eingeleiteter Stoß
	$\alpha_F \text{ max}$	80 ... 100°	Flexion-Biegewinkel der HWS
	$\alpha_E \text{ max}$	80 ... 90°	Extension-Biegewinkel der HWS
	$M_F \text{ max}$	190 Nm	Flexion, gemessen am Kopfgelenk
	$M_E \text{ max}$	57 Nm	Extension, gemessen am Kopfgelenk
	$M_{\text{max}}$	370 Nm	Biegemoment (Flexion oder Extension), berechnet am Übergang C7/T1
	$F_{\text{Scher}}$	1.800 ... 2.600 N	Scherbelastung
	$F_Z \text{ max}$	1.100 ... 2.600 N	Zugbelastung
Kehlkopf	$F_B$	178 ... 244 N	Bruch des Kehlkopf-Ringknorpels bei anterior eingeleiteter Belastung
	$F_B$	490 N	Zusammenbruch der Kehlkopf-Struktur bei anterior eingeleiteter Belastung

messtechnischen Gegebenheiten; sie sind, wie Ergebnisse aus der rechnerischen Insassen-simulation zeigen [33], jedoch nicht unabhängig voneinander. Zur Messung der Kopfbe-schleunigungen wurden am Thorax anterior und posterior Stöße aufgebracht, ohne dass es zum Kopfanprall kam. Diese Stöße bewirkten flexionale bzw. extensionale Distorsionen. Bei den Untersuchungen von Burow [98] wurden die Beuge- (bzw. der Dehnungs-) Winkel der Halswirbelsäule photogrammetrisch ermittelt. Mertz et al. [99] haben in ihren Labor-tests das am Kopfgelenk auftretende Moment ermittelt, das als hervorragender Indikator für Distorsionen angesehen werden kann. Gegenüber den dabei ermittelten Biegemomen-ten wurden mit Hilfe eines vereinfachten HWS-Modells am Hals/Torso-Übergang (C7/T1) erheblich höhere Biegemomente, nämlich 370 Nm bei 50 %-iger Wahrscheinlichkeit für irreversible HWS-Verletzungen, ermittelt [33]. Die Scherkräfte wurden in [98] indirekt unter einer vereinfachten Modellannahme aus den gemessenen Kopfbeschleunigungen be-stimmt. Sie lassen sich auch aus den an der Halswirbelsäule auftretenden Biegemomenten ableiten.

Zur Ermittlung eines Belastungskriteriums in Form von Zug- und Druckkräften in Richtung der HWS-Achse wurden zahlreiche Untersuchungen angestellt, bei denen die Krafteinleitung entweder direkt in den Hals oder indirekt über den Kopf (superior/inferior)

erfolgte. Die einzige Arbeit zur Bestimmung eines Kriterien-Levels für Longitudinalkräfte bei dynamischem Anprall, bei der die Belastung an elf Leichen gemessen wurde, wird von Culver et al. in [100] beschrieben.

In der letzten Gruppe von Tab. 3.9 wird ein Kriterium für Halsverletzungen diskutiert; dabei wird der Kehlkopf als die am wenigste geschützte Region des Halses angesehen. Während der präparierte Kehlkopf-Ringknorpel bereits bei niedrigen Kräften bricht (ungefähr 150–250 N), ist mit der Zerstörung des Kehlkopfes erst ab etwa 500 N zu rechnen.

Während einer Frontalkollision wirken beim angegurteten Insassen die Kräfte des (im allgemeinen diagonal verlaufenden) Schultergurtes und des Airbags auf den **Brustkorb**; ist der Insasse nicht angegurtet, wird die Brust durch Kontaktkräfte, die vom Lenkrad, vom Airbag, vom Armaturenbrett oder – beim Fond-Insassen – von der vorderen Sitzlehne herrühren, beaufschlagt. Hinsichtlich der Häufigkeit von Einzelverletzungen beim gurtgesicherten Insassen lassen sich Verletzungsmuster aufzeigen, die durch eine direkte oder indirekte Gurteinwirkung charakterisiert werden können: Hautabschürfungen und -quetschungen sowie Brüche des Thorax-Skeletts, insbesondere des Sternum und der Rippen, sind Folgen einer direkten Einwirkung des Gurtbandes (Abb. 3.75). Zu den indirekten Folgen werden Wirbelsäulen-Verletzungen, sowohl an der knöchernen Struktur als auch an der Muskulatur, und Organ-Verletzungen aufgrund der Relativbewegung zwischen knöchernem Thorax und inneren Organen der Brust bzw. des Oberbauches gezählt. Derartige Verletzungen, wie beispielsweise Aorta- oder Herzmuskel-Rupturen, sind mit Zunahme der Gurtbenutzung in ihrer Häufigkeit zurückgegangen [101].

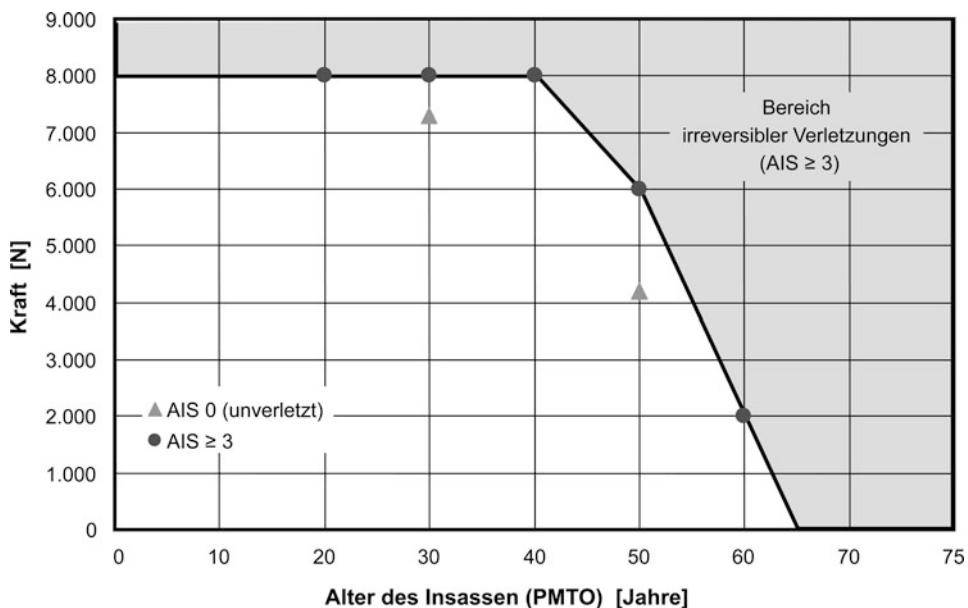
Brustverletzungen sind in hohem Maße vom Alter (Abb. 3.76) und von der Konstitution des Verunfallten abhängig; dies erklärt die relativ große Bandbreite der in Tab. 3.10 angegebenen Belastungskriterien-Levels [103]. Andererseits ist das Bewegungsverhalten der Brust beim angegurteten und durch den Airbag geschützten Insassen während der Kollisionsphase gleichförmiger und die Verletzungsmechanik weniger komplex als beim Kopf, so dass hier weniger Kriterien ausreichend erscheinen. Bei den Brustkriterien handelt es sich um eng miteinander verknüpfte, mechanische Größen wie resultierende Beschleunigung, Belastungskraft, Kompressionsweg und -geschwindigkeit sowie Deformationsenergie des Brustkorbes als Integral der wegabhängigen Kraft. Das Viskositätskriterium VC (Viscous Tolerance Criterion) allerdings geht ab von der Fiktion des starren Thorax und berücksichtigt neben der Elastizität des Brustkorbs auch die Interaktion und Verschiebemöglichkeit der Brustorgane [75]. Dieser Effekt wird durch den Thorax-Traumatisierungsindex TTI (Thoracic Trauma Index) in Form des arithmetischen Beschleunigungsmittelwertes (vgl. Gl. 3.15) ebenfalls einbezogen. Problematisch hierbei ist allerdings der Umstand, dass das Weg- (und Geschwindigkeits-) Kriterium VC für Seitenkollisionen nach dem europäischen Sicherheitsreglement und das auf Beschleunigungen basierende TTI-Kriterium nach dem amerikanischen Standard unterschiedliche Verletzungsrisiken enthält bzw. bei der Zielsetzung gleicher Belastungen verschiedene Sicherheitsmaßnahmen nahe legt.

Für die **Traumatisierung des Abdominalbereichs und des Beckens** sind im Wesentlichen zwei Ursachen verantwortlich: Beckengurt-Syndrome aufgrund des so genannten Submarining-Effekts und Verletzungen der Becken/Hüft-Region aufgrund hoher, direkt



**Abb. 3.75** Deutlich erkennbare Gurt-Prellmarke auf dem Oberkörper eines Unfallopfers (aus [102])

am Becken oder über die Oberschenkel eingeleiteter Belastungen [104]. Der knöcherne Beckengürtel vermag sehr hohe Belastungen aufzunehmen, ohne seine Stabilität zu verlieren. Voraussetzung dafür ist jedoch eine großflächige Krafteinleitung (wie dies in der Regel durch den Beckengurt erfolgt) sowie eine gleich bleibende Kraftangriffsstelle während der Kollisionsphase unterhalb des Beckenkamms (Crista iliaca). Gelegentlich kommt es bei Frontalkollisionen in Verbindung mit einer weichen Sitzpolsterung, bei ungünstiger Gurtgeometrie oder bei handhabungsbedingten Fehlern bei der Gurtbenutzung zum Untertauchen des Beckens unter die Beckengurtschlinge (daher Submarining) bzw. zum Hochrutschen des Beckengurtes über die Beckenkämme. Die dabei auftretenden Kräf-



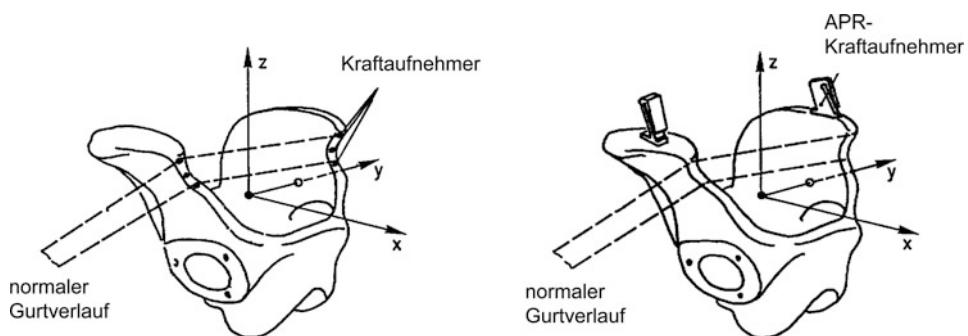
**Abb. 3.76** Thorax-Verletzungen bei Schultergurt-Kräften in Abhängigkeit vom Alter (nach [103])

te wirken auf die Bauchdecke und führen zu Rupturen und Lazerationen von Beckenorganen, also intra-abdominellen Verletzungen, sowie – allerdings nur bei relativ hoher Unfallschwere – zu Brüchen an der Lendenwirbelsäule [104]. Die Abdominalverletzungen induzierenden Kräfte liegen auf wesentlich niedrigerem Niveau als die Kräfte, die zu Verletzungen des knöchernen Beckens führen können. In Tab. 3.11 sind Kriterien zu Abdominalverletzungen zusammengestellt, die den derzeitigen Diskussionsstand widerspiegeln. Dabei sei darauf hingewiesen, dass die Beckengurtkraft, deren zeitliche Änderung und der Beckendrehwinkel weniger eine erträgliche Belastung des Unterbauchs charakterisieren als vielmehr das Auftreten oder Vermeiden des Submarining-Effekts und daraus resultierende Verletzungen. Die direkte Messung der Kräfte am Becken als Indikator für das Hochrutschen der Gurtschlinge erfolgt mit Hilfe zweier konkurrierender Methoden; sie sind in Abb. 3.77 schematisch dargestellt. Die paarweise an den Beckenkämmen montierten APR-Kraftaufnehmer können mittlerweile ergänzt werden durch die ebenfalls beidseitig verwendeten Messaufnehmer SWING (= Sensor Iliac Wing), die in die Aluminiumstruktur der geschlitzten Beckenschaufeln eingelassen sind (Abb. 3.78). Mit Hilfe dieser Dehnmessstreifen-Aufnehmer wird das auf den Beckenknochen wirkende Moment gemessen, das in charakteristischer Weise auftritt, wenn der Beckengurt vom Darmbeinkamm (Crista iliaca) in den Abdominalbereich rutscht. Diese Messmöglichkeit erlaubt die präzise Untersuchung von Submarining-Effekten [105].

Adomeit dagegen schlägt in [79] kinematische Größen zur Beurteilung des Submarining-Effekts im Sinne eines ja/nein-Kriteriums vor. Dies wurde mit Hilfe der statistischen

**Tab. 3.10** Schutz- und Belastungskriterien-Levels für Thorax und Wirbelsäule (nach [33])

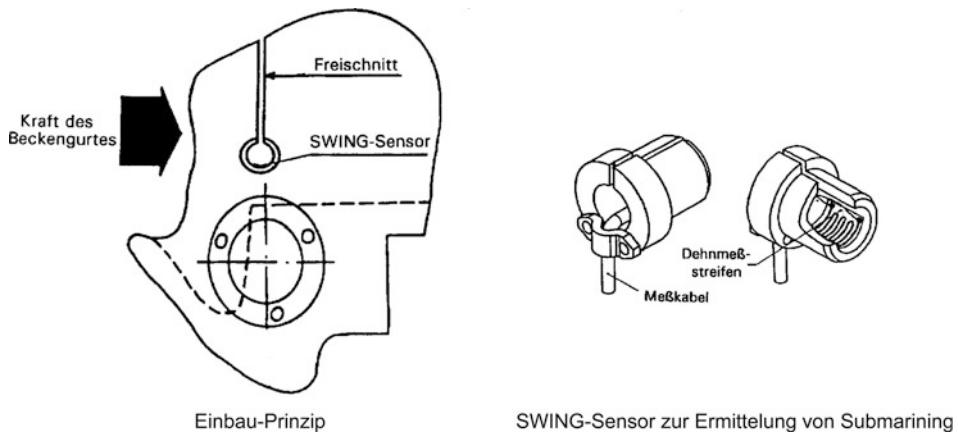
Körperregion	Kriterium	Level	Bemerkungen
Thorax	$a_{\max}$	60 g	$t > 3$ Millisekunden
	$a_{\max}$	80 g	$t < 3$ Millisekunden
	$F_{\max}$	5.000 ... 9.080 N	bei sagittaler Stoßkörperbelastung
	$F_{\max}$	4.750 N	Schultergurtkräfte
	$s_{\max}$	40 mm	Eindrückung bei 50 % Wahrscheinlichkeit für irreversible Verletzungen aus der statistischen Biomechanik
	$s_{\max}$	50 mm	Eindrückung; 1986 in FMVSS 208 mit 76,2 mm für Airbag, ansonsten 50,8 mm
	$E_{\text{pot}}$	350 Nm	Brust-Kompressionsenergie
	VC	1,00 m/s	Viscous Tolerance Criterion $[v \cdot c]_{\max}$ ; 39 Leichenversuche, Thorax-Verletzungen AIS > 4
Wirbelsäule	$a_{z\max}$	$\pm 45$ g, $\Delta t < 40$ ms	Senkrecht zur Rückenlehne
	$a_{x\max}$	$\pm 16$ g, $\Delta t < 40$ ms	In Rückenlehnenrichtung

**Abb. 3.77** Messverfahren zur Ermittlung des Submarining-Effekts (aus [33])

Biomechanik in [33] konsequent weiterverfolgt: Durch die Zusammenführung unfallanalytischer Daten und Ergebnissen aus der rechnerischen Insassensimulation konnte ein Vorhersage-Modell für Becken- und Abdominalverletzungen (Abb. 3.79) entwickelt

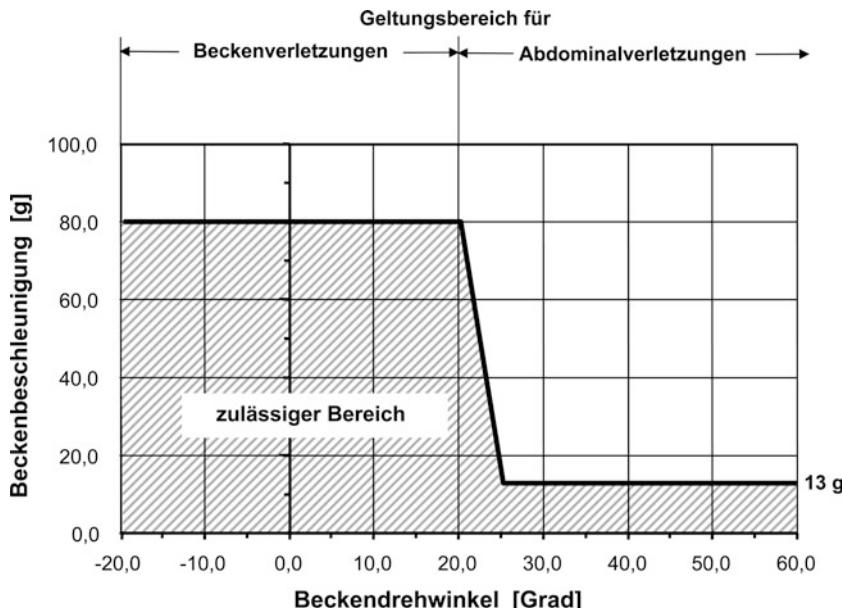
**Tab. 3.11** Schutz- und Belastungskriterien-Levels für den Abdominalbereich und das Becken (nach [33])

Körperregion	Kriterium	Level	Bemerkungen
Abdominalbereich	$F_{\max}$	500 ... 1.700 N	Belastungskraft von Niere und Leber
	$p_{\max}$	35 N/cm <sup>2</sup>	Flächenpressung
	$F_{BG\ max}$	800 N	Beckengurtkraft, gemessen mit APR-Messaunehmer am Dummy-Becken
	$\Delta F_{SIP}$	80 %	Änderung des am SIP-Becken gemessenen Kraftverlaufs innerhalb einer Zeit von 5 ms
	$\alpha_{\max}$	40°	Beckendrehwinkel bei vertikaler Thorax-verlagerung von max. 40 mm
	$\alpha_{krit}$	> 20°	Beckendrehwinkel als Unterscheidungskriterium für Abdominalverletzungen
	$a_{\max}$	13 g	Result. Beckenbeschleunigung bei $\alpha > \alpha_{krit}$ (statistische Biomechanik)
Lendenwirbelsäule rel. zum Becken	$F_{\max}$	6,67 kN	Belastungsgrenzwert zwischen Becken und Lendenwirbelsäule
Becken	$a_{\max}$	60 g	Korrelation zwischen Unfallverletzungen und Simulationsergebnissen
	$a_{\max}$	80 g	Result. Beckenbeschleunigung bei $\alpha \leq \alpha_{krit}$ (statistische Biomechanik)
Hüftbereich	$F_{\max}$	6.400 ... 12.500 N	Krafteinleitung am Knie



**Abb. 3.78** SWING-Sensor und prinzipieller Einbau am Dummy-Becken des 50 %-Dummy, HYBRID III (aus [105])

werden, bei dem der kritische Beckendrehwinkel von  $\alpha_{krit} = 20^\circ$  als Unterscheidungsmerkmal zwischen stabiler Beckenkinematik und dem Submarining-Effekt ermittelt wurde. Ist der Beckendrehwinkel gegenüber der Ausgangslage kleiner als der kritische



**Abb. 3.79** Modell für Becken- und Abdominalverletzungen bei einer 50 %-igen Wahrscheinlichkeit für irreversible Verletzungen

Winkel ( $\alpha_{\max} \leq \alpha_{\text{krit}}$ ), kann von einer Beanspruchung des Beckenringknochens ausgängen werden, die mit einer 50 %-igen Wahrscheinlichkeit für irreversible (in der Regel knöcherne) Verletzungen eine resultierende Beckenbeschleunigung von  $a_{\max} = 80\text{g}$  erträglich erscheinen lässt. Ist der Beckendrehwinkel dagegen größer als der kritische Winkel ( $\alpha_{\max} > \alpha_{\text{krit}}$ ), muss tendenziell von Submarining ausgegangen werden. Die zulässige Toleranzschwelle liegt dann erheblich niedriger, nämlich bei einer resultierenden Beckenbeschleunigung von  $a_{\max} = 13\text{g}$  (vgl. Tab. 3.11). Die Ermittlung des Beckendrehwinkels erfolgt durch die zweimalige Integration des Messsignals eines im Becken montierten Drehwinkelbeschleunigung-Aufnehmers. In zahlreichen Versuchen konnte mittlerweile der Einsatz und die Zuverlässigkeit dieser relativ einfachen Messmethode nachgewiesen werden [106].

Wie bereits oben festgestellt, ist der Beckenringknochen hoch belastbar, sodass die in Tab. 3.11 angegebene Beschleunigungsgrenze nicht nur als Belastungskriterien-Levels für das knöcherne Becken selbst zu verstehen ist, sondern auch einen Level für innere Verletzungen aufgrund von Relativverschiebungen und daraus folgenden Organ-Rupturen darstellen. Bei der Belastung des Beckens infolge eines Knieanpralls und der damit einhergehenden Verletzung im Hüftbereich können Beckenverletzungen nur schwer von Verletzungen der unteren Extremitäten getrennt werden. So ist bei einer Krafteinleitung im Knie nicht vorhersehbar, an welcher Stelle der Beanspruchungskette Kniescheibe – Kniegelenk – Oberschenkel – Schenkelhals – Hüftbereich eine Beschädigung auftritt. Für Brüche

des Beckens im Bereich der Hüftgelenk-Pfanne wird eher – in starkem Maße auch hier altersabhängig – der höhere Belastungswert des in Tab. 3.11 angegebenen Kriterien-Levels angenommen.

Die **oberen Extremitäten** erfahren bei Frontalkollisionen am häufigsten eine Belastung, die durch Abstützen oder Anprallen am Lenkrad bzw. am Armaturenbrett über die Hände auf Unter- und Oberarm in die Schulter eingeleitet wird. Der in Tab. 3.12 angegebene breite Bereich für derartige, erträgliche Belastungen erklärt sich durch den großen Einfluss der Parameter Muskelanspannung, aktueller Armbeugewinkel und Knochensprödigkeit (aufgrund des Insassen-Alters). Bei Untersuchungen mit Freiwilligen wurden Abstützkräfte von 3,2 kN ohne jegliche Verletzungen gemessen [107], sodass das Belastungskriterium im Bereich über 3 kN liegen dürfte. Eine Scherbelastung des Armes wird beim Frontalaufprall nur selten beobachtet. Die dafür in Tab. 3.12 dargestellten Kriterien sollen daher mehr einen Einblick in die Belastbarkeit des Ellbogen- und Handgelenks vermitteln. Als Äquivalent für die Belastung der oberen Extremitäten beim Aufprall auf Innenraumteile können diese Kriterien direkt nicht herangezogen werden. Hierzu wurde mit Hilfe der statistischen Biomechanik in [33] durch die Korrelation von Arm- und Handverletzungen und errechneten Kontaktkräften eine erträgliche Hand-Kontaktkraft von  $F_{\max} = 3,8 \text{ kN}$  ermittelt.

**Tab. 3.12** Schutz- und Belastungskriterien-Levels für die Extremitäten (zit. nach [33])

Körperregion	Kriterium	Level	Bemerkungen
Arm, gesamt	$F_{\max}$	150 ... 6.400 N	Abstützkraft
Ellbogen	$F_{\text{Scher}}$	180 ... 220 N	Scherbelastung des Ellbogens
Handgelenk	$F_{\text{Scher}}$	100 ... 180 N	Scherbelastung des Handgelenks
Hand	$F_{\max}$	3.800 N	Hand-Kontaktkraft aus der statistischen Biomechanik
Bein bzw. Oberschenkel	$F_{\max}$	8.000 ... 13.000 N	in starkem Maße abhängig von der Belastungsdauer
Knie	$F_{\max}$	5.000 ... 11.300 N	
Unterschenkel	$F_{x\max}$	3.700 ... 4.300 N	Biegebeanspruchung durch Querkraft
	$F_{y\max}$	$\leq 16.000 \text{ N}$	Longitudinal-Belastung
Fuß	$F_{\max}$	$\leq 20.000 \text{ N}$	Freiwilligen-Versuche
	$F_{\max}$	10.000 N	Fuß-Kontaktkraft aus der statistischen Biomechanik

Gegenüber den Untersuchungen zur Belastbarkeit der Arme existieren erheblich mehr Ergebnisse zu den **unteren Extremitäten**. So ist der Streubereich der Belastbarkeit für Oberschenkel nicht nur enger, auch zur Belastungsdauer als Einflussgröße lassen sich Werte angeben [108, 109]. Das höhere Kraftniveau wird durch Untersuchungen an herauspräparierten Oberschenkelknochen gestützt und ist durch die stärkere Ausbildung der Kno-

chenstruktur im Vergleich zur Ausbildung der oberen Extremitäten erklärbar. Kniescheibe und -gelenk verlieren ihre Stabilität bei einer gegenüber der Oberschenkellängskraft um ca. 15 % niedrigeren Beanspruchung [109, 110] und bei einer eher kurzzeitigen Belastungsdauer von weniger als 6 Millisekunden [108]. Die Belastungskriterien-Levels für die Querbelastung der Unterschenkel resultieren vornehmlich aus Untersuchungen zum Fußgänger-Unfall; sie können aber, z. B. für das Eindringen der Spritzwand oder des Fußhebelwerks in den PKW-Fußraum, auf den Fahrzeug-Insassen übertragen werden. Von größerer Bedeutung dürfte allerdings das Kriterium für die Longitudinalbelastung sein, da bei Frontalkollisionen eine hohe Längskraftkomponente zu beobachten ist. Angesichts des hohen Kraftniveaus ist allerdings zu berücksichtigen, dass es sich bei den in Tab. 3.12 angegebenen Werten um sehr kurzzeitige Messwerte handelt. Während der Unterschenkel dieses Kraftniveau aufzubringen vermag, führen die eingeprägten Kräfte häufig zu Zerstörungen des Kniegelenks [111].

Für die häufig auftretenden und langwierigen Verletzungen am Fuß und am Fußgelenk existieren nur wenige Untersuchungsergebnisse. Ohne Verletzungen zu erleiden, wurden an Freiwilligen Kräfte von 20 kN gemessen [112]. Über die Versuchsbedingungen sind keine näheren Angaben gemacht. In [33] konnte eine hohe Korrelation zwischen Bein- und Fußverletzungen einerseits und der Fuß-Kontaktkraft andererseits nachgewiesen werden. Bei einer 50 %-igen Wahrscheinlichkeit für irreversible Verletzungen der unteren Extremitäten kann für die Fuß-Kontaktkraft als Schutzkriterium ein Level von  $F_{max} = 10 \text{ kN}$  angenommen werden (vgl. Tab. 3.12).

---

## Literatur

1. Schmidtke, H.: Lehrbuch der Ergonomie. Bearbeitete und ergänzte Auflage. Carl Hanser Verlag, München Wien (1981).
2. Huelke, D.F.: Anatomy of Lower Extremity – An Overview. Biomechanics of Impact Trauma. Seminar in Orlando, FL (USA) (1990).
3. Pschyrembel, W.: Klinisches Wörterbuch, 255. Aufl. Walter de Gruyter, Berlin, New York (1986).
4. Putz, R., Pabst, R.: Sobotta – Atlas der Anatomie des Menschen, 21. Aufl. Urban & Fischer, München (2002). CD-ROM-Service, Version 2.
5. Melvin, J.W., Lighthall, J.W., Ueno, K.Nahum, A.M., Melvin, J.W. (Hrsg.): Brain Injury Biomechanics in Accidental Injury – Biomechanics and Prevention. Springer-Verlag, New York (1993).
6. Kramer, F.: Über die Anwendung mechanisch-mathematischer Belastungskriterien als Äquivalent zu Kopfverletzungen. Bericht über die Tätigkeit als Gastwissenschaftler bei der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Forschungsbericht Nr. 201/86. Technische Universität Berlin (1985).
7. Hodgson, V.R., Brinn, J., Thomas, L.M., Greenberg, S.W.: Fracture Behavoir of the Skull Frontal Bone Against Cylindrical Surfaces. SAE Paper No. 700909, Proceeding of the 14th Stapp Car Crash Conference (1970).
8. Melvin, J.W., Evans, F.G.: A Strain Energy Approach to the Mechanics of Skull Fracture. SAE Paper No. 710871, Proceeding of the 15th Stapp Car Crash Conference (1971).

9. Sellier, K.: Das Schädel-Hirn-Trauma. Rechtsmedizin **68**, 239–252 (1971). Springer-Verlag Berlin New York.
10. Jennett, B.: Some Medicolgal Aspects of the Management of Acute Head Injury. British Medical Journal **1**, 1383–1385 (1976).
11. Cooper, P.R.: Skull Fracture and Traumatic Cerebrospinal Fluid Fistulas. In: Cooper, P.R. (Hrsg.) Head Injury. S. 65–82. Williams and Wilkins, Baltimore/London (1982).
12. Gennarelli, T.A.: Mechanistic Approach to Head Injuries: Clinical and Experimental Studies of the important Types of Injury. Ommaya, A.K. (Hrsg.) Head and Neck Injury Criteria: A Consensus Workshop. U.S. Department of Transportation, NHTSA, Washington, DC (1981).
13. Schmitt, K.-U., Niederer, P., Walz, F.: Trauma Biomechanics – Introduction to Accident Injury. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (2004).
14. Walz, F.: Biomechanische Aspekte der HWS-Verletzungen. Der Orthopäde **23**(4), 262–267 (1994).
15. Walz, F., Muser, M.: Biomechanical Aspects of Cervical Spine Injuries. SAE 950658 in SP-1077. SAE International Congress and Exhibition, Detroit, Michigan (USA) (1995).
16. McElhaney, J.H., Myers, B.S.: Biomechanical Aspects of Cervical Trauma. In: Nahum, A.M., Melvin, J.W. (Hrsg.) Accidental Injury – Biomechanics and Prevention. Springer-Verlag, New York (1993).
17. Mendelsohn, R.A., Huelke, D.F.: Anatomy, Injury and Biomechanics of the Cervical Spine. AAAM Conference: Crash Performance Standards and the Biomechanics of Impact: What are the Relationships? Seminar in Orlando, FL (USA) (1990).
18. Svenson, M.Y.: Neck Injuries in Rear-end Car Collisions – Sites and Biomechanical Causes of the Injuries, Test Methods and Preventive Measures. Department of Injury Prevention, Chalmers University of Technology, Göteborg (Schweden) (1993).
19. Walz, F., Muser, M.: Biomechanical Assessment of Soft Tissue Cervical Spine Disorders and Expert Opinion in low Speed Collisions. Accident Analysis & Prevention **32** (2000).
20. Viano, D.C.: Chest: Anatomy, Types and Mechanisms of Injury, Tolerance Criteria and Limits, and Injury Factors. AAAM Conference: Crash Performance Standards and the Biomechanics of Impact: What are the Relationships? Seminar in Orlando, FL (USA) (1990).
21. Cavanaugh, J.M.: The Biomechanics of Thoracic Trauma. In: Nahum, A.M., Melvin, J.W. (Hrsg.) Accidental Injury -Biomechanics and Prevention. Springer-Verlag, New York (1993).
22. Kramer, F.: Passive Sicherheit/Biomechanik I/II. Vorlesungsskript zur gleichnamigen Lehrveranstaltung an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden (2012).
23. Rouhana, S.W.: Biomechanics of Abdominal Trauma. In: Nahum, A.M., Melvin, J.W. (Hrsg.) Accidental Injury-Biomechanics and Prevention. Springer-Verlag, New York (1993).
24. Rouhana, S.W., Foster, M.E.: Lateral Impact – an Analysis of the Statistics in the NCSS. SAE Paper No. 872203, Proceeding of the 29th Stapp Car Crash Conference (1985).
25. Niederer, P., Walz, F., Zollinger, U.: Adverse Effects of Seat Belts and Causes of Belt Failures in Severe Car Accidents in Switzerland during 1976. Proceedings 21st Stapp Car Crash Conference, New Orleans, LA (USA) (1977).
26. Leung, Y.C., Tarriere, C., Lestrelin, D.: Submarining Injuries of 3pt. Belted Occupant in Frontal Collisions – Description, Mechanism and protection. SAE Paper No. 821158, Proceeding of the 26th Stapp Car Crash Conference (1982).

27. King, A.I.: Injury to the Thoraco-Lumbar Spine and Pelvis. In: Nahum, A.M., Melvin, J.W. (Hrsg.) Accidental Injury -Biomechanics and Prevention. Springer-Verlag, New York (1993).
28. Wykowski, E.: Use of Human lower Leg Model for Frontal Impact. EuroPam-User Meeting. Heidelberg (2001).
29. Brockhaus Enzyklopädie in 24 Bänden, 19., völlig neu bearbeitete Auflage. F.A. Brockhaus GmbH Mannheim (1987).
30. Viano, D. C.: Bolster Impacts to the Knee and Tibia of Human Cadavers and an Anthropomorphic Dummy. SAE Paper No. 780896, Proceeding of the 22nd Stapp Car Crash Conference, Ann Arbor, MI (USA) (1970).
31. Glatter, J.: Nutzwert- und Risikobetrachtung eines Knieairbags aus Sicht der Unfallforschung. Diplomarbeit an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden (2005).
32. Ramsis Aircraft – Ergonomie Tool, Version: 3.8.16. Human Solutions. Kaiserslautern (2005).
33. Kramer, F.: Schutzkriterien für den Fahrzeug-Insassen im Falle sagittaler Belastung. Dissertation an der Technischen Universität Berlin. Fortschritt-Berichte, VDI-Reihe 12. Bd 137. (1989).
34. Levine, R.: Injury to the Extremities. In: Nahum, A.M., Melvin, J.W. (Hrsg.) Accidental Injury – Biomechanics and Prevention. Springer-Verlag, New York (1993).
35. Huelke, D.F., O'Day, J., States, J.D.: Lower Extremity Injuries in Automobile Crashes. AAAM Conference: Crash Performance Standards and the Biomechanics of Impact: What are the Relationships? Seminar in Orlando, FL (USA) (1990).
36. Marsh, J.H.: Existing Traffic Accident Injury Causation – Data Recording Methods and Proposal of an Occupant Injury Classification Scheme. Proceeding of the American Association for Automotive Medicine. (1972).
37. Committee on Medical Aspects of Automotive Safety: Rating the Severity of Tissue Damage: II. The Comprehensive Scale. The Journal of the American Medical Association **220**, 717–720 (1972).
38. Committee on Medical Aspects of Automotive Safety: Rating the Severity of Tissue Damage: I. The Abbreviated Injury Scale. The Journal of the American Medical Association **215**, 277–280 (1971).
39. Association for the Advancement of Automotive Medicine: The Abbreviated Injury Scale – AIS, Rev. 2005. Association for the Advancement of Automotive Medicine, Des Plaine, IL (USA) (2005).
40. Baker, S.P., O'Neill, B., Haddon Jr., W., Long, W.B.: The Injury Severity Score: A Method for Describing Patients with Multiple Injuries and Evaluation Emergency Care. Journal of Trauma **14**, 187–196 (1974).
41. Helms, E.: Ökonomische Grundlagen zur Erfassung der Unfallkosten im Straßenverkehr. Dissertation. Bonn (1971).
42. Niklas, J.: Nutzen-Kosten-Analysen von Sicherheitsprogrammen im Bereich des Straßenverkehrs. Schriftenreihe des Verbandes der Automobilindustrie e.V. (VDA). Bd 7. VDA, Frankfurt/Main (1970).
43. Jäger, W., Lindenlaub, K.-H.: Nutzen/Kosten-Untersuchungen von Verkehrssicherheitsmaßnahmen. FAT-Schriftenreihe. Bd 5., Frankfurt/Main (1977).
44. Fechner, H.: Ermittlung volkswirtschaftlicher Kosten von Verletzungsfolgen aus Straßenverkehrsunfällen. Diplomarbeit an der Technischen Universität Berlin (1983).

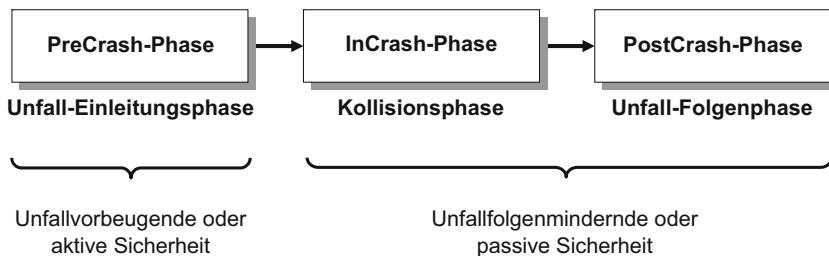
45. Kramer, F., Melz, T.: Nutzwertbetrachtung bei der Entwicklung von Kraftfahrzeugen. Vortrag im Rahmen des VDI-Seminars „Kraftfahrzeuge“ an der Technischen Universität Berlin (1983).
46. Melz, T.: Nutzen/Kosten-Untersuchung alternativer Konzeptionen zum Insassenschutz. Diplomarbeit an der Technischen Universität Berlin (1984).
47. Richter, B., Appel, H., Hoefs, R., Langwieder, K.: Entwicklung von PKW im Hinblick auf einen volkswirtschaftlich optimalen Insassenschutz. Abschlußbericht des vom Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) geförderten Forschungsprojekts (TV 8036). (1984).
48. Appel, H., Kramer, F., Glatz, W., Lutter, G., Baumann, J., Weller, M.: Quantifizierung der passiven Sicherheit für PKW-Insassen. Bericht zum Forschungsprojekt FP 8517/2 der Bundesanstalt für Straßenwesen. BASt (Hrsg.), Bergisch Gladbach (1991).
49. Kramer, F., Deter, T.: Zur Quantifizierung der Straßenverkehrssicherheit. Verlag Information Ambs GmbH, Kippenheim. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **30**, (1992).
50. Kramer, F., Fruck, K., Bigi, D.: Sicherheitsindex – Eine Möglichkeit zur objektiven Bewertung von Insassenschutzsystemen. Tagung „Rückhaltesysteme“ im Haus der Technik e. V. in Essen (1995).
51. Kramer, F.: Volkswirtschaftlicher Schaden aufgrund der Verletzungsfolgekosten. Nicht veröffentlichtes Arbeitspapier und Auswertungsprogramm AUSWERT (Version 3.8 – angewandt am 11.7.2012). Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden (Januar 2008).
52. Lenz, K.-H., Appel, H., Cesari, D., Tarriere, C.: Joint Biomechanical Research Project (KOB). Final Report. (1981).
53. Heger, A., Appel, H.: Korrelationsmöglichkeiten von Unfallgeschehen und Versuch am Beispiel des Fußgängerunfalls. Jahrestagung 1982 der Deutschen Gesellschaft für Verkehrsmedizin e. V. Berlin (1982).
54. Svensson, M.Y.: Neck Injuries in Rear-end Car Collisions – Sites and Biomechanical Causes of the Injuries, Test Methods and Preventive Measures. Dissertation an der Chalmers University of Technology, Göteborg (S) (1993).
55. Hofmann, J., Kramer, F., Dausend, K.: Side Collisions, Comparison of Dummy Loadings with Injuries of Real Accidents. III. IRCOBI Conference. Lyon (F) (1978).
56. Danner, M., Appel, H., Schimkat, H.: Entwicklung kompatibler Fahrzeuge. Abschlußbericht des Forschungsprojekts TV 7661 des Bundesministers für Forschung und Technologie. (1980).
57. Zobel, R.: Volkswirtschaftlich optimaler Insassenschutz – Ergebnisse der Simulationsrechnung. 11. BMFT-Statusseminar „Kraftfahrzeuge und Straßenverkehr“. Münster (1984).
58. ECE-R 94, 2003-02-13 Aufprallschutz: Frontalaufprall, Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeuge hinsichtlich des Schutzes bei einem Frontalaufprall (Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regard to the Protection of the Occupants in the Event of a Frontal Collision). (2003).
59. ECE-R 95, 2005-02-21; Aufprallschutz: Seitenauftprall; Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeuge hinsichtlich des Schutzes der Insassen bei einem Seitenauftprall (Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regard to the Protection of the Occupants in the Event of a Lateral Collision). (2005).
60. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Admin. Docket No. 571.208, Occupant Crash Protection – Frontal Barrier Crash. (2004).
61. Gurdjian, E.S., Lissner, H.R., Latimer, F.R., Haddad, B.F., Webster, J.E.: Quantitative Determination of Acceleration and Intercranial Pressure in Experimental Head Injury. Neurology **3**, 417–423 (1953).

62. Gurdjian, E.S., Roberts, V.L., Thomas, L.M.: Tolerance Curves of Acceleration and Intercranial Pressure and Protective Index in Experimental Head Injury. *Journal of Trauma*, 600 (1964).
63. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA): Advanced Airbag SNPRM Preliminary Economic Assessment – Injury Criteria. <http://www.nhtsa.dot.gov/cars/rules/rulings/AirbagSNPRM/pea-III.n.html>. Veröffentlichung: 2002.
64. Walfisch, G., Fayon, A., Tarriere, C., Chamouard, F., Guillon, F., Got, G., Patel, A., Hureau, J.: Human Head Tolerance to Impact: Influence of the Jerk (Rate of Onset of Linear Acceleration) on the Occurrence of Brain Injuries. VI IRCOBI Conference. Salon de Provence (F) (1981).
65. Färber, E., Kramer, F.: On the Application of the HIC as Head Protection Criterion. International IRCOBI/AAAM Conference. Göteborg (S) (1985).
66. Sievert, W.: Kenntnisstand der biomechanischen Grenzwerte. Innere Sicherheit im Kraftfahrzeug. Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln (1979).
67. Weissner, R.: Bewertung und Erprobung von Gurtsystemen beim Frontalstoß. Dissertation. Technische Universität Berlin (1976).
68. Got, C., Patel, A., Fayon, A., Tarriere, C., Walfisch, G.: Results of Experimental Head Impacts on Cadavers: The Various Data Obtained and their Relation to some Measured Physical Parameters. 22. Stapp Car Crash Conference. (1978).
69. Beier, G., Schuller, E.: Verletzungsmechanische Anmerkungen zum Schutzhelm. Jahrestagung 1986 der Deutschen Gesellschaft für Verkehrsmedizin e. V. Hannover (1986).
70. Slobodnik, B.A.: SPH-4 Helmet Damage and Head Injury Correlation. Fort Rucker, AL, United States Army Aeromedical Research Laboratory, USAARL Report No. 80-7. (1980).
71. Stalnaker, R.L., Melvin, J.W., Nusholtz, G.S., Alem, N.M., Benson, J.B.: Head Impact Response. 21. Stapp Car Crash Conference. (1977).
72. Boström, O., Bohmann, K., Håland, Y., Kullgren, A., Krafft, M.: New AIS1 Long-term Neck Injury Criteria Candidates based on real Frontal Crash Analysis. IRCOBI Conference. Montpellier (F), (2000).
73. Gadd, C.W.: Use of the Weighted-Impuls Criteria for Estimating Injury Hazard. 10. Stapp Car Crash Conference. (1966).
74. SAE J 885: Human Tolerance to Impact Conditions as Related to Motor Vehicle Design. SAE Handbook, Vol IV (1994).
75. Viano, D.C., Lau, I.V.: Thoracic Impact: A Visous Tolerance Criterion. Proceedings at the X. Experimental Safety Vehicle Conference. Oxford (UK) (1985).
76. Viano, D.C.: Cause and Control of Automotive Trauma. Bulletin of the New York Academy of Medicine **64**(5), (1988). New York.
77. Eppinger, R.H., Marcus, J.H., Morgan, R.M.: Development of Dummy and Injury Index for NHTSA's Thoracic Side Impact Protection Research Program, SAE technical paper series 840885, Government/Industry Meeting and Exposition. Washington D.C. (USA) (1984).
78. Decoo, A.C.M., Versmissen, E.G., Wismans, J.: Evaluation of European and USA Draft Regulations for Side-Impact Collisions. 11. International ESV Conference. Washington D.C. (USA) (1987).
79. Adomeit, D.: Neue Bewertungsgrößen für die Frontalaufprallsicherheit des gurtgesicherten Insassen. Dissertation. Technische Universität Berlin (1980).
80. Yamada, H.: Mechanical Properties of Tendinous Tissue. In: Yamada, H. (Hrsg.) Strength of Biological Materials. Williams & Wilkins, Baltimore, MD (1970).

81. Mertz, H.J.: Anthropomorphic test devices. Accident injury in Biomechanics and Prevention. Springer Verlag, New York, S. 66–84 (1993).
82. Kramer, F.: Analyse des Unfallgeschehens zur Ermittlung der Unfallkenngroße für Frontalkollisionen und der Verletzungsschwere sagittal belasteter PKW-Insassen. Forschungsbericht Nr. 325/88. Technische Universität Berlin (1988).
83. Grösch, L., Kassing, L., Katz, E., Stecher, J., Zeidler, F.: Die Beurteilung der Wirksamkeit von Airbag-Systemen mit Hilfe neuer Schutzkriterien. Automobil-Industrie **87**(2) (1987).
84. Allsop, D.L.: Skull and Facial Bone Trauma: Experimental Aspects. In: Nahum, A.M., Melvin, J.W. (Hrsg.) Accidental Injury – Biomechanics and Prevention. Springer-Verlag, New York (1993).
85. McElhaney, J.H., Stalnaker, R.L., Roberts, V.L.: Biomechanical Aspects of Head Injury. Proceeding of the Symposium on Human Impact Response. Held at the GM Research Laboratory, Warren, Michigan (USA) (1972).
86. Stalnaker, R.L., Lin, C.A., Guenther, D.A.: The Application of the New Mean Strain Criterion (NMSC). International IRCOBI/AAAM Conference. Göteborg (Schweden) (1985).
87. Abel, J.M., Gennarelli, T.A., Segawa, H.: Incidence and Severity of Cerebral Concussion in the Rhesus Monkey Following Sagittal Plane Angular Acceleration. 22. Stapp Car Crash Conference. Warrendale (1978).
88. Gennarelli, T.A., Thibault, L.E., Ommaya, A.K.: Pathophysiologic Responses to Rotational and Translational Accelerations of the Head. 16. Stapp Car Crash Conference. Detroit (1972).
89. Hirsch, A.E., Ommaya, A.K., Mahone, R.M.: Tolerance of Subhuman Primate Brain to Cerebral Concussion. Report 2876, Dep. of the Navy, Naval Ship Research and Development Center. Washington, D.C. (1968).
90. Holbourn, A.H.S.: Mechanics of Head Injuries. *The Lancet*. (Oct. 1943).
91. Rockoff, S.D., Ommaya, A.K.: Experimental Head Trauma Cerebral Angiographic Observations in the Early Post-Traumatic Period. *American Journal of Roentgenology*. (1964).
92. Unterharnscheidt, F., Higgins, L.S.: Traumatic Lesions of Brain and Spinal Cord Due to Non-Deforming Angular Acceleration of the Head. *Texas Report on Biology and Medicine* **27**(1) (1969).
93. Ommaya, A.K., Yarnell, P., Hirsch, A.E., Harris, Z.H.: Scaling of Experimental Data on Cerebral Concussion in Sub-Human Primates to Concussion Threshold for Men. 11. Stapp Car Crash Conference. (1967).
94. Newman, J.A.: A Generalized Acceleration Model for Brain Injury Threshold (GAMBIT). International IRCOBI Conference. Zürich (Schweiz) (1986).
95. Newman, J.A.: The Biomechanics of Head Trauma and the Development of the modern Helmet. How far have we really come? Bertil Aldman Memorial Lecture, IRCOBI Conference. Prague (CR) (2005).
96. Kleiven S.: Influence of Direction and Duration of impacts to the human head evaluated using the Finite Element Method. International IRCOBI Conference (2005).
97. States, J.D.: Soft Tissue Injuries of the Neck. *The Human Neck – Anatomy, Injury Mechanisms and Biomechanics*. Congress and Exposition SAE SP-438. Detroit (1979).
98. Burow, K.: Zur Verletzungsmechanik der Halswirbelsäule. Dissertation. Technische Universität Berlin (1974).

- 
- 99. Mertz, H.J., Patrick, L.M.: Strength and Response of the Human Neck. 15. Stapp Car Crash Conference. (1971).
  - 100. Culver, R., Bender, M., Melvin, J.W.: Mechanisms, Tolerances and Responses Obtained under Dynamic Superior/Inferior Head Impact – A Pilot Study. UM-HSRI-78-21. (Mai 1978).
  - 101. Schmidt, G., Kallieris, D., Barz, J., Mattern, R., Schulz, F., Schüler, F.: Belastbarkeitsgrenzen des angegurteten Fahrzeuginsassen bei der Frontalkollision. Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.. Bd 15. FAT, Frankfurt/Main (1980).
  - 102. Gurt- bzw. Prellmarken aus <http://notarztkurs.tripod.com/techrett.htm> Stand: Juli 2005.
  - 103. Kramer, F.: Ermittlung der maximal zulässigen Gurtkräfte an unterschiedlichen Gurtstraffern. Bericht Nr. SD2/9403-02 über Ergebnisse der Systemanalyse. TRW Repa, Alfdorf (1994).
  - 104. Otte, D., Suren, E.G.: Gutachterliche und verkehrsmedizinische Aspekte zur Sitzposition und Gurtbenutzung in Unfallfahrzeugen. Jahrestagung 1984 der Deutschen Gesellschaft für Verkehrsmedizin e. V. Köln (1984).
  - 105. Uriot, J., Page, M., Tarriere, C., Bendjellal, F., Loiseleur, F., Saloum, M., Fournier, P.: Measurement of Submarining on HYBRID III 50 & 5 Percentile Dummies. 14. International ESV Conference. München (D) (1994).
  - 106. Kramer, F.: Experimental Determination of the Pelvis Rotational Angle and its Relation to a Protection Criterion for Pelvic and Abdominal Injuries. International IRCOBI Conference. Lyon (France) (1994).
  - 107. Wagner, R.: A 30 mph Front/Rear Crash with Human Test Persons. 23. Stapp Car Crash Conference. (1979).
  - 108. Appel, H., Färber, E., Heger, A.: Biomechanische Belastungsgrenzen. Forschungsbericht Nr. 194 im Auftrag der Volkswagenwerk AG. Technische Universität Berlin (1975).
  - 109. Brun-Cassan, F., Leung, Y. C., Tarriere, C., Fayon, A., Patel, A., Got, C., Hureau, J.: Determination of Knee-Femur-Pelvis Tolerance from the Simulation of Car Frontal Impacts. VII. IRCOBI Conference. Köln (1982).
  - 110. Viano, D.C.: Femoral Impact Response and Fractures. V. IRCOBI Conference. Birmingham (1980).
  - 111. Tarriere, C., Stcherbachoff, G., Duclos, P., Fayon, A.: The Influence of the Shape of the Vehicle on the Severity of Pedestrian Injuries. International Congress of Automotive Safety. (1974).
  - 112. Reidelbach, W., Zeidler, F.: Comparison of Injury Severity Assigned to Lower Extremity Skeletal Damages Versus Upper Body Lesions. 27. Annual Proceedings, American Association for Automotive Medicine (AAAM). San Antonio (USA) (1983).

Unter Sicherheitsmaßnahmen lassen sich grundsätzlich all diejenigen Maßnahmen subsumieren, die geeignet sind, Unfälle zu vermeiden und Unfallfolgen zu minimieren. Die Maßnahmen zur Verbesserung der aktiven Fahrzeugsicherheit lassen sich zeitlich der so genannten PreCrash-Phase, d. h. der Zeitspanne vor der Kollision, zuordnen. Die in dieser Zeitspanne generierten Informationen zum Erkennen der Wahrscheinlichkeit und der Schwere einer Kollision werden allerdings auch oder ausschließlich in der Kollisionsphase, d. h. in der InCrash-Phase, zur Aktivierung geeigneter Schutzmaßnahmen verwendet. Daher ist die zeitlich enge Abgrenzung zwischen der aktiven und der passiven Sicherheit in PreCrash- und InCrash-Phase nicht mehr zutreffend. Im Folgenden jedoch soll lediglich der Ausschnitt des Maßnahmenkatalogs abgehandelt werden, der auf die Unfallfolgenminderung abzielt (Abb. 4.1). Die hierauf ausgerichteten Maßnahmen zur Verbesserung der passiven Sicherheit greifen in der InCrash-Phase und in der PostCrash-Phase, wobei die Maßnahmen im Zeitbereich nach der Kollision wie Sicherung der Unfallstelle, Rettungswesen, Versicherungsschutz u. a. hier im Wesentlichen unberücksichtigt bleiben.



**Abb. 4.1** Zeitlicher Ablauf des Unfallereignisses und Sicherheitsbereiche [1]

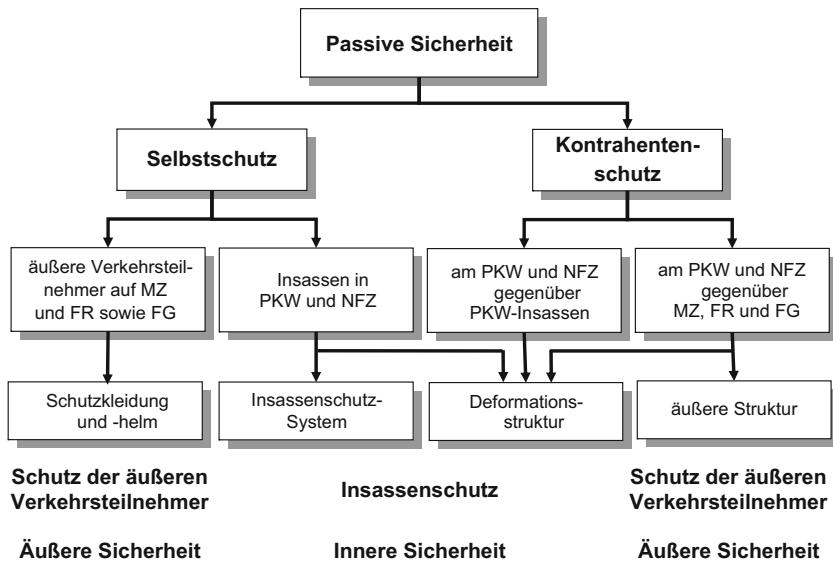
## 4.1 Zielsetzung und Definitionen

Die Unfallfolgenminderung, auch unter dem Begriff der passiven Sicherheit bekannt, umfasst diejenigen Schutzmaßnahmen, die Verletzungen vermeiden oder die Unfallfolgen für alle in Unfälle verwickelten Personen – also sowohl Fahrzeuginsassen als auch äußere Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger und Zweiradfahrer – vermindern helfen. Genau genommen müssten bei den Maßnahmen zur Verbesserung der passiven Sicherheit auch diejenigen behandelt werden, mit deren Hilfe Sachschäden minimiert werden können (vgl. Abb. 3.61), z. B. Reparaturtechniken zur Herabsetzung der Instandsetzungskosten. Es sollen hier jedoch nur die Maßnahmen erläutert werden, die auf die Gewährleistung der Überlebenschancen und die Verringerung der Verletzungsschwere abheben. Dabei unterscheidet man üblicherweise die Maßnahmen, die dem Selbstschutz oder dem Kontrahentenschutz dienen. Da bei Kollisionen zwischen mehreren Beteiligten jedoch von einer gegenseitigen „Partnerschaft“ nicht die Rede sein kann, wird die immer noch übliche Verwendung des Begriffs „Partner“-Schutz nachfolgend ersetzt durch die zutreffendere Charakterisierung des „Kontrahenten“-Schutzes.

### 4.1.1 Selbst- und Kontrahentenschutz

Der Selbstschutz umfasst die Sicherheitseinrichtungen und -maßnahmen, die dem eigenen Sicherheitsbedürfnis dienen. So sind Insassenschutzsysteme auf die Insassen in Personenkraftwagen (PKW) und in Nutzfahrzeugen (NFZ) ausgerichtet. Schutzkleidung und -helme zielen auf den Selbstschutz äußerer Verkehrsteilnehmer ab; dies sind Fahrer von motorisierten Zweirädern (MZ) und Fahrrädern (FR) sowie Fußgänger (FG). Im Gegensatz dazu ist der

Kontrahentenschutz ausgerichtet auf das Sicherheitsbedürfnis des Unfall-„Partners“ oder besser des Kollisionskontrahenten. Eine Maßnahme in diesem Bereich kann beispielsweise die Optimierung des Deformationsverhaltens der Frontstruktur an Personenkraftwagen oder Nutzfahrzeugen sein, soweit es sich auf die Insassen im gegnerischen Personenkraftwagen auswirkt. Durch die Gestaltung und Eigenschaft der äußeren Struktur an Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen lässt sich aber auch die Sicherheit der äußeren Verkehrsteilnehmer beeinflussen. Es ist leicht einzusehen, dass die Auslegung der Deformationsstruktur eine gewisse Sonderstellung einnimmt, da sie sich sowohl auf den Selbstschutz als auch auf den Kontrahentenschutz, sowohl auf die innere als auch auf die äußere Sicherheit auswirkt. In Abb. 4.2 sind übliche Begriffe der passiven Sicherheit und Beispiele dazu angegeben; daneben erfolgt die Zuordnung zu anderen Unterteilungsmöglichkeiten wie dem Insassenschutz und dem Schutz der äußeren Verkehrsteilnehmer sowie der inneren und äußeren Sicherheit.



**Abb. 4.2** Begriffe und Zusammenhänge im Bereich der passiven Sicherheit

### 4.1.2 Wirkrichtung der Schutzmaßnahmen

Die Wirkrichtung von Schutzmaßnahmen kennzeichnet zum einen die innere Sicherheit durch beispielsweise Gurtsystem, Airbag und Polsterung; diese Maßnahmen wirken nach innen. Nach außen wirkende Schutzmaßnahmen sind demgegenüber die Gestaltung der Außenfläche sowie Bauform und Deformationsverhalten der Kontaktstruktur von PKW und NFZen; diese Maßnahmen werden unter dem Begriff der äußeren Sicherheit zusammengefasst (Abb. 4.2).

Während Mittelklasse- und größere PKW über einen mehr oder weniger ausreichend großen Deformationsweg verfügen, muss bei der Auslegung kleinerer PKW, insbesondere bei den so genannten Kompakt-Fahrzeugen, aufgrund ihrer geringen Außenabmessungen auf eine adäquate Vorbaustruktur verzichtet werden. Zudem wird die Fahrgastzelle zur Sicherstellung des Überlebensraumes steifer ausgelegt. Dies führt zwangsläufig zu einem Abbau der äußeren Sicherheit, die sich durch eine erheblich höhere Verzögerung des Fahrzeugs während des Unfalls bzw. beim Versuch bemerkbar macht. Dieser Abbau an äußerer Sicherheit muss durch eine Erhöhung der inneren Sicherheit kompensiert werden. Dies geschieht durch die Bereitstellung besserer Gurtsysteme in Verbindung mit Airbags, ohne die ein befriedigendes Maß an Sicherheit nicht realisiert werden kann. Durch den Verzicht auf eine nachgiebige, energieabsorbierende Deformationsstruktur und die Verwendung eines verbesserten Insassenschutz-Systems kommt es zu einer Verlagerung der Sicherheitsmaßnahmen von außen nach innen [2].

## 4.2 Schutzprinzipien

Unter Schutzprinzip wird das Phänomen verstanden, das bei Kollisionen das Fahrzeug und den oder die Insassen dazu bringt, von einem Bewegungszustand mit einer bestimmten Geschwindigkeit zum Stillstand zu gelangen oder bei Fußgängerkollisionen den Fußgänger auf die Kollisionsgeschwindigkeit des Fahrzeugs zu bringen; die Mittel dazu sind die später zu betrachtenden Sicherheitsmaßnahmen. Hierzu sollen im Folgenden verschiedene Betrachtungsweisen diskutiert werden.

### 4.2.1 Energetische Betrachtung

Die Überprüfung der passiven Sicherheit für Frontalkollisionen von PKW erfolgt heute weitgehend durch den Wandaufpralltest nach den europäischen oder US-amerikanischen Sicherheitsstandards (ECE-R 94 bzw. FMVSS 208). Würde alleine danach die Sicherheit von PKW ausgelegt, so verhielten sich – lineare Deformationskennung vorausgesetzt – bei gleichem Deformationsweg (0,5 m) und gleicher Verzögerung (39g) die Struktursteifigkeiten proportional zu den Fahrzeugmassen (Abb. 4.3a), wobei die Aussage auf der Gleichsetzung zwischen kinetischer Energie  $E_{\text{kin}}$  und Deformationsarbeit  $W_{\text{def}}$  beruht.

Vereinfacht ist die kinetische Energie

$$E_{\text{kin}} = \frac{m}{2} \cdot v^2 \quad (4.1)$$

und die Deformationsenergie

$$W_{\text{def}} = \frac{1}{2} \cdot F \cdot s = \frac{1}{2} \cdot c \cdot s^2, \quad (4.2)$$

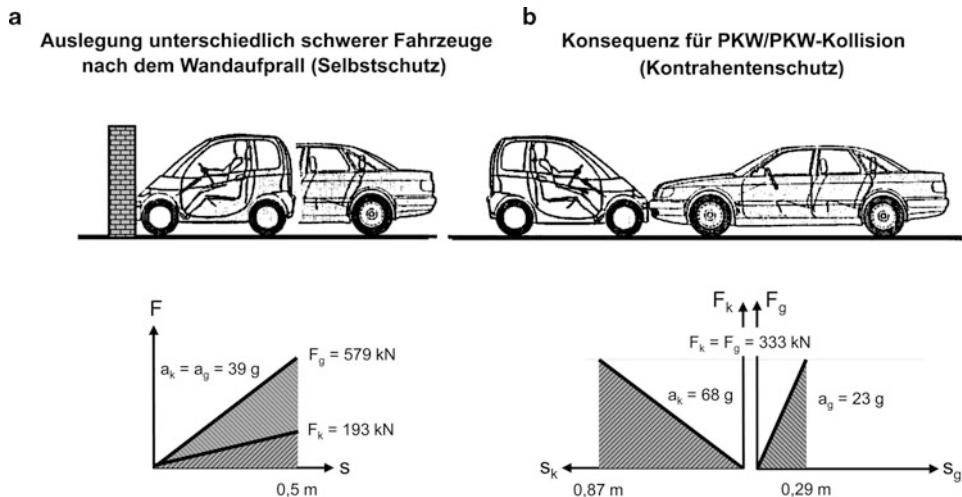
und durch Gleichsetzung der verschiedenen Energieformen (Gl. 4.1 und 4.2) erhält man

$$m \cdot v^2 = c \cdot s^2. \quad (4.3)$$

Da die Wandaufprallgeschwindigkeit des kleineren und des größeren PKW (hier:  $v_k = v_g = 50 \text{ km/h}$ ) und die entsprechenden Deformationswege ( $s_k = s_g = 0,5 \text{ m}$ ) gleichgesetzt werden können, ergibt sich bei Auflösung der Gleichung nach der Steifigkeit  $c_i$  (mit  $i = k$  für das kleinere bzw.  $i = g$  für das größere Fahrzeug)

$$\frac{c_k}{c_g} = \frac{m_k \cdot v_k^2}{s_k^2} \cdot \frac{s_g^2}{m_g \cdot v_g^2} = \frac{m_k}{m_g}. \quad (4.4)$$

Da jedoch der weitaus größere Anteil an Unfällen und Verletzungsfolgekosten (vgl. Abb. 2.14 und 2.15) auf PKW/PKW-Kollisionen und nicht auf PKW/Hindernis-Unfälle



**Abb. 4.3** Energieaufnahmevermögen unterschiedlich schwerer Fahrzeuge beim Wandaufprall (a) und bei PKW/PKW-Kollisionen (b)

entfällt, stellt sich die Frage nach dem jeweiligen Energieaufnahmevermögen bei PKW/PKW-Kollisionen. Auf beide Fahrzeuge wirkt (wegen Aktion gleich Reaktion) die gleiche Deformationskraft  $F_{\max}$  ein. So erklärt sich, dass, während das Energieaufnahmevermögen des kleineren PKW aufgezehrt ist, beim größeren PKW nur ein geringer Anteil der zur Verfügung stehenden Deformationsenergie ausgeschöpft wird. Das Verhältnis der aufgenommenen Deformationsarbeit ist ebenso wie das der Deformationswege, der Geschwindigkeitsänderungen und der Verzögerungen umgekehrt proportional dem Verhältnis der Fahrzeugmassen (Abb. 4.3b).

Die gesamte Deformationsenergie beträgt

$$\begin{aligned} W &= W_{\text{def } k} + W_{\text{def } g} = \frac{1}{2} (F_k \cdot s_k + F_g \cdot s_g) \\ &= \frac{1}{2} (c_k \cdot s_k^2 + c_g \cdot s_g^2) ; \end{aligned} \quad (4.5)$$

daraus kann abgeleitet werden, dass gilt

$$F_{\max} = c_k \cdot s_k = c_g \cdot s_g \quad (4.6)$$

bzw.

$$F_{\max} = m_k \cdot a_k = m_g \cdot a_g . \quad (4.7)$$

Die Gleichung der Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$ , auf deren Herleitung hier verzichtet werden kann (siehe dazu z. B. [3] oder [4]), zeigt, dass sie mit der Relativgeschwindigkeit

$$\Delta v_{\text{rel}} = v_k - v_g , \quad (4.8)$$

dem elastischen Anteil (ausgedrückt durch die Stoßzahl oder den Restitutionskoeffizienten  $\varepsilon$ ) und der Masse des Kollisionskontrahenten ansteigt, denn es ist

$$\Delta v_k = -\frac{m_g \cdot (1 + \varepsilon)}{m_k + m_g} \cdot v_{\text{rel}} = -v_{\text{rel}} \cdot \frac{1 + \varepsilon}{\frac{m_k}{m_g} + 1}. \quad (4.9)$$

Setzt man die Geschwindigkeitsänderungen zweier unterschiedlich schwerer PKW unter der vereinfachenden Annahme eines vollplastischen Stoßvorganges ( $\varepsilon = 0$ ) ins Verhältnis zueinander, so ergibt sich die Beziehung

$$\frac{\Delta v_k}{\Delta v_g} = \frac{m_g \cdot v_{\text{rel}}}{m_k + m_g} \cdot \frac{m_k + m_g}{m_k \cdot v_{\text{rel}}} = \frac{m_g}{m_k}. \quad (4.10)$$

Somit kann gezeigt werden, dass mit Hilfe dieser simplifizierten Beziehungen gilt

$$\frac{m_k}{m_g} = \frac{c_k}{c_g} = \frac{s_g}{s_k} = \frac{\Delta v_g}{\Delta v_k} = \frac{a_g}{a_k}. \quad (4.11)$$

Es konnte dargestellt werden, dass die Steifigkeit  $c$  bei einer ausschließlich nach den Kriterien des Wandaufprall-Tests ausgelegten Vorbaustuktur proportional mit der Fahrzeugmasse  $m$  steigt. Andererseits erfährt das kleinere Fahrzeug bei PKW/PKW-Kollisionen nicht nur eine größere Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  und damit eine höhere Verzögerung  $a$ , sondern auch die größere Deformation  $s$ . Je nach Auslegungsziel kann hier durch eine oder mehrere der im Folgenden aufgeführten Maßnahmen das Verletzungsrisiko der Insassen, insbesondere in kleineren PKW, nachhaltig reduziert werden [5]:

- Längere, weichere Deformationsstruktur des schwereren Fahrzeugs,
- Auslegung der Fahrzeuge auf eine masse-abhängige Wandaufprallgeschwindigkeit, d. h. schwerere PKW auf eine Geschwindigkeit kleiner 50 km/h, so dass sich für diese gleich lange, aber weichere Strukturen realisieren lassen,
- Vorverlegung der Motor/Getriebe-Blocks in leichteren PKW, Rückverlegung in schwereren PKW und
- überproportionale Anstrengungen für das Rückhaltesystem im leichteren Fahrzeug.

## 4.2.2 Wechselwirkung zwischen Frontal- und Seitenkollision

Aufgrund der Steifigkeitsverhältnisse zwischen Front- und Seitenstruktur existiert eine Wechselwirkung zwischen der Auslegung bei Frontalkollisionen und der Wirkung bei Seitenkollision, die durch die heute üblichen isolierten Tests nicht berücksichtigt wird. So verlangen schwerere Fahrzeuge aufgrund ihres steiferen Vorbaus dem seitlich getroffenen PKW ein höheres Energieaufnahmevermögen ab als leichtere und in ihrem Vorbau weichere Fahrzeuge, d. h. bei Seitenkollisionen wird das getroffene Fahrzeug durch schwerere PKW stärker deformiert. Inwieweit dies allerdings zu höheren Insassenbelastungen führt,

kann weder eindeutig noch allgemein gültig festgeschrieben werden, da z. B. kleinere, leichtere Fahrzeuge sich aufgrund der geometrischen Gegebenheiten weniger an der A- und der B-Säule abstützen können und daher im allgemeinen punktuell und tiefer in die Seitenstruktur eindringen.

Während bei der Frontalkollision das Fahrzeug eine Verzögerung erfährt und der Insasse zunächst seine Bewegung beibehält bis er durch das Insassenschutz-System abgefangen wird, herrscht bei der Seitenkollision eine völlig andere Kollisionsmechanik vor: Der Insasse wird von der seitlich durch das stoßende Fahrzeug beschleunigten Tür und der Seitenstruktur beaufschlagt bevor der gestoßene PKW eine merkliche Beschleunigung erfährt. Die Erhöhung der Seitensteifigkeit führt nur in vergleichsweise engen Grenzen zu einer Verringerung des Verletzungsrisikos. Bei unendlich hoher Steifigkeit nämlich kommt es zu einer Kollisionsmechanik ähnlich der bei Frontalkollisionen, allerdings sind die geometrischen Bedingungen (Abstand Insassen/Tür im Vergleich zum Abstand Insasse/Lenkrad) ungleich problematischer als bei Frontalkollisionen.

### 4.2.3 Kompatibilität

Im Straßenverkehr kollidieren unterschiedlich schwere Fahrzeuge unter allen denkbaren Unfallbedingungen. Es ist also aufgrund der statistischen Wahrscheinlichkeit selten, dass gleich schwere Fahrzeuge zusammenstoßen. Dabei reicht das Intervall der Fahrzeug-Leermassen von 540 bis ungefähr 2.400 kg (Abb. 4.4). Ähnlich unterschiedlich sind die Steifigkeiten der kontaktierenden Deformationsstrukturen, insbesondere wenn nicht nur die Front- sondern auch die Seiten- und Heckstruktur berücksichtigt werden. Schließlich

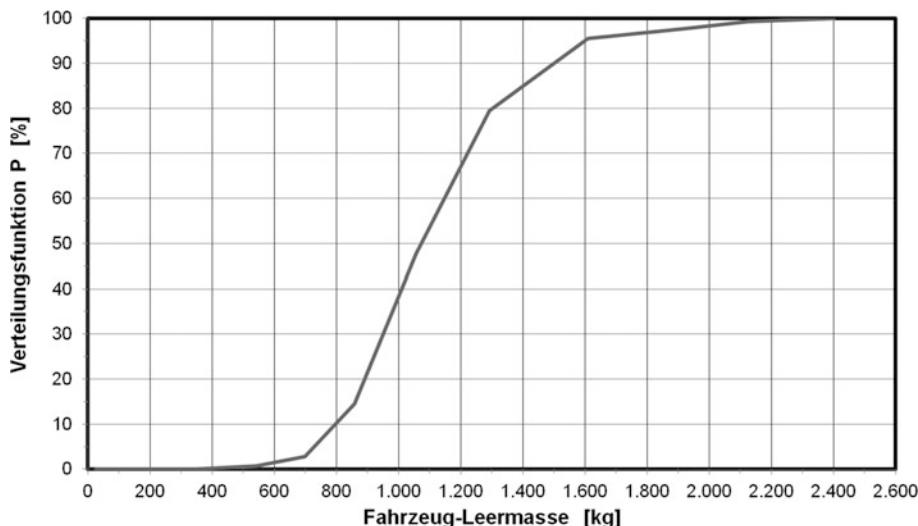
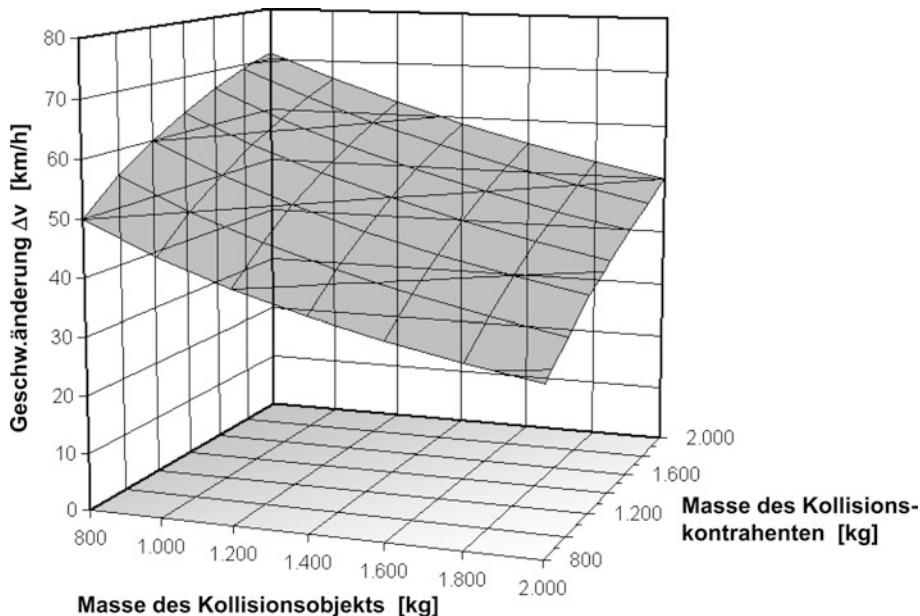


Abb. 4.4 Verteilung der Masse zugelassener Fahrzeuge [1]

weist die Geometrie der Kontaktstellen bei Kollisionen einen nicht unerheblichen Einfluss auf den Energieabbau auf. Strategien, Auslegungskonzepte und Maßnahmen, die geeignet sind, diese Einflussfaktoren bei Kollisionen unterschiedlicher Fahrzeuge verträglich zu gestalten, lassen sich unter dem Begriff der „Kompatibilität“ (= Verträglichkeit bei Unfällen) subsumieren. Man spricht daher von der Kompatibilität hinsichtlich

- der Massenaggressivität,
- der Steifigkeitsaggressivität und
- der geometrischen Aggressivität.

Bei der Unfallschwere von Frontalkollisionen lässt sich ein nicht unerheblicher Einfluss aufzeigen, der bei PKW/PKW-, anders als bei PKW/Hindernis-Kollisionen, maßgeblich auf die Masse der beteiligten Fahrzeuge zurückgeführt werden kann. Als Maß für die Unfallschwere kann die Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  des betrachteten Fahrzeugs, des Kollisionsobjekts, verwendet werden. Sie hängt nach den Newtonschen Stoßgesetzen von den beteiligten Fahrzeugmassen, von der Relativgeschwindigkeit und vom Restitutionskoeffizienten zur Kennzeichnung des elastischen/plastischen Deformationsverhaltens ab (vgl. Gl. 4.9). Je größer die Masse des Kollisionsobjekts bei Frontalkollisionen zwischen zwei unterschiedlich schweren PKW ist, desto geringer wird seine Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  sein (Abb. 4.5). Anhand des Diagramms kann daneben aber auch gezeigt werden, dass

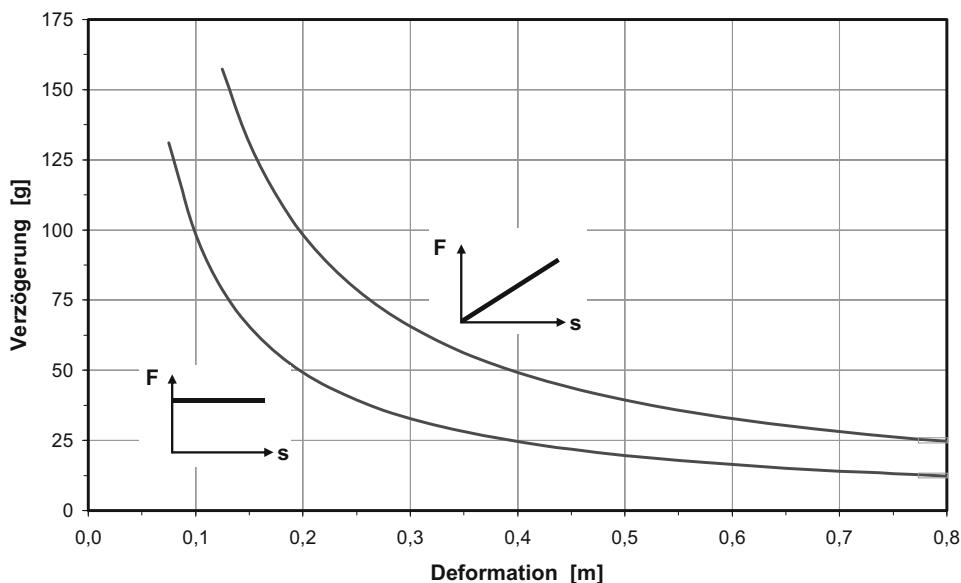


**Abb. 4.5** Geschwindigkeitsänderung in Abhängigkeit von der Masse des Kollisionsobjekts bei PKW/PKW-Kollisionen

bei der Kollision eines (z. B. 1.000 kg schweren) PKW mit einer Relativgeschwindigkeit von 100 km/h die Geschwindigkeitsänderung ja nach Massenverhältnis um bis zu 45 % zunimmt [2], wenn er statt mit einem leichteren PKW mit einem schweren zusammenstößt (statt 12,3 m/s bei 800 kg, 17,9 m/s bei 1.800 kg).

Eine weitere Größe zur Charakterisierung der Unfallschwere ist die

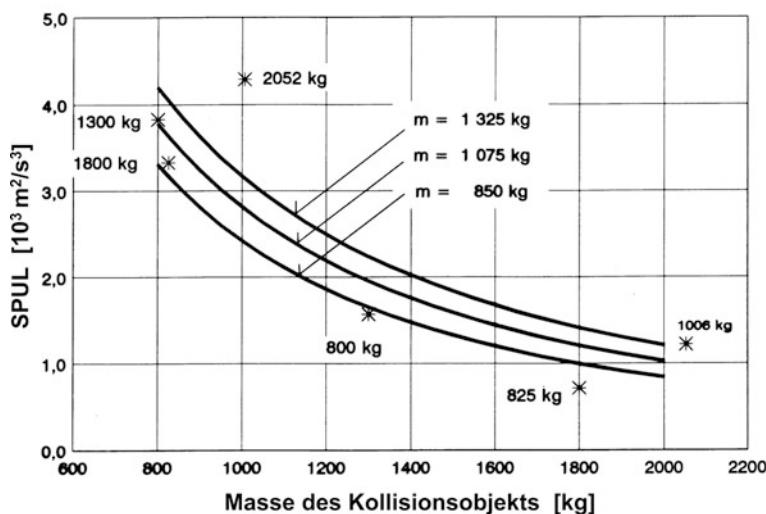
Fahrzeugverzögerung [6], die in starkem Maße vom Deformationsweg abhängt. Mit der vereinfachenden Gleichsetzung der kinetischen und der Deformationsenergie kann gezeigt werden, dass sich die Zellenverzögerung von der heute üblichen Verzögerung bis auf 100g (1g ist gleich der Erdanziehung, 100g die 100-fache) erhöht, wenn die Deformationsstruktur sehr viel steifer ausgelegt wird und der Eindringweg statt bei 50–60 cm nur noch bei 10–20 cm liegt (Abb. 4.6).



**Abb. 4.6** Verzögerung vs. Deformationsweg, schematisch aus der Energiebetrachtung beim Wandaufprall [1]

Derart harte Strukturen, die eine Deformation von nur 15 Zentimetern beim 50 km/h-Wandaufprall zulassen, werden mit der Bezeichnung „Stoßgürtel“ im Zusammenhang mit Leichtbau-Fahrzeugen untersucht [7, 8]. Eine Unfallkenngroße, die beide Parameter gleichermaßen umfasst, wurde in [4] eingeführt und als spezifische Unfall-Leistung (SPUL) zur Charakterisierung der Unfallschwere verwendet (vgl. Abschn. 2.2.2). Sie ist das Produkt aus Geschwindigkeitsänderung und der mittleren Zellenverzögerung und beschreibt die Bewegungsverhältnisse des Fahrzeugs, nicht hingegen mögliche Intrusionen, die Wirksamkeit des Rückhaltesystems u. a.m. Diese Unfallkenngroße ist gekennzeichnet durch die am Kollisionsobjekt wirksame Änderung der Bewegungsenergie während des Stoßvorganges.

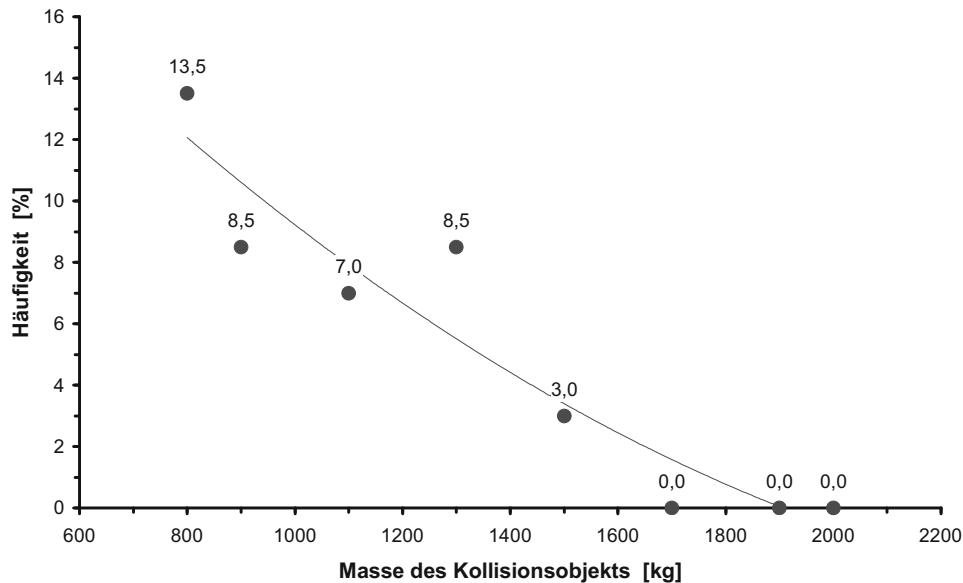
Wird die Energie durch die Crash-Dauer geteilt, so entspricht dieser Quotient einer am Kollisionsobjekt umgesetzten Leistung, der Unfall-Leistung. Wird diese nun auf die Masse des betrachteten Fahrzeugs bezogen, erhält man bis auf einen Faktor die spezifische Unfall-Leistung, die proportional zur Bewegungsenergie, zum reziproken Wert der Crash-Dauer und zum reziproken Wert der Fahrzeugmasse ist. Der Einfluss der Masse des Kollisionsobjekts, also des betrachteten Fahrzeugs, auf die spezifische Unfall-Leistung ist in Abb. 4.7 dargestellt. Dabei wurde eine Relativgeschwindigkeit von 100 km/h und drei verschiedenen schweren Kollisionskontrahenten (850, 1.075 und 1.325 kg) zugrunde gelegt. Zum Nachweis der Zulässigkeit dieser Betrachtung sind entsprechende Wertepaare (symbolisiert mit Stern) aus Versuchen von PKW/PKW-Frontalkollisionen in das Diagramm eingezeichnet [9]. Bei einer Frontalkollision zwischen zwei unterschiedlich schweren PKW nimmt die spezifische Unfall-Leistung je nach Masse der beteiligten Fahrzeuge um ca. 30–40 % zu, wenn es statt mit einem leichteren PKW mit einem schwereren zusammenstößt ( $2.425 \text{ m}^2/\text{s}^3$  bei 850 kg und  $3.174 \text{ m}^2/\text{s}^3$  bei 1.325 kg bei einem Kollisionsobjekt von 1.000 kg).



**Abb. 4.7** Spezifische Unfall-Leistung SPUL in Abhängigkeit von der Masse des Kollisionsobjekts bei PKW/PKW-Kollisionen

Bisher konnte gezeigt werden, dass die Unfallschwere in leichteren PKW bei PKW/PKW-Kollisionen größer ist als in schwereren. Anhand einer Auswertung von Unfalldaten soll nachfolgend dargestellt werden, wie sich das Verletzungsrisiko in Abhängigkeit von der Fahrzeugmasse ändert: Bezieht man die Zahl der tödlich verletzten Insassen auf die Gesamtzahl aller verunfallten Personen, so erhält man die Mortalitätsrate, die ein Sterblichkeitsrisiko zum Ausdruck bringt. Auf der Basis von 718 PKW-Insassen bei

PKW/PKW-Unfällen ist die Mortalität in Abhängigkeit von der Masse des Kollisionsobjekts in Abb. 4.8 dargestellt. Die Mortalitätsrate, d. h. das Risiko, tödliche Verletzungen zu erleiden, nimmt mit zunehmender Masse deutlich ab [2]. Sie liegt bei schwereren PKW (Massenklasse 1.600 kg) etwa viermal niedriger als bei leichteren Fahrzeugen (Massenklasse bis 800 kg).

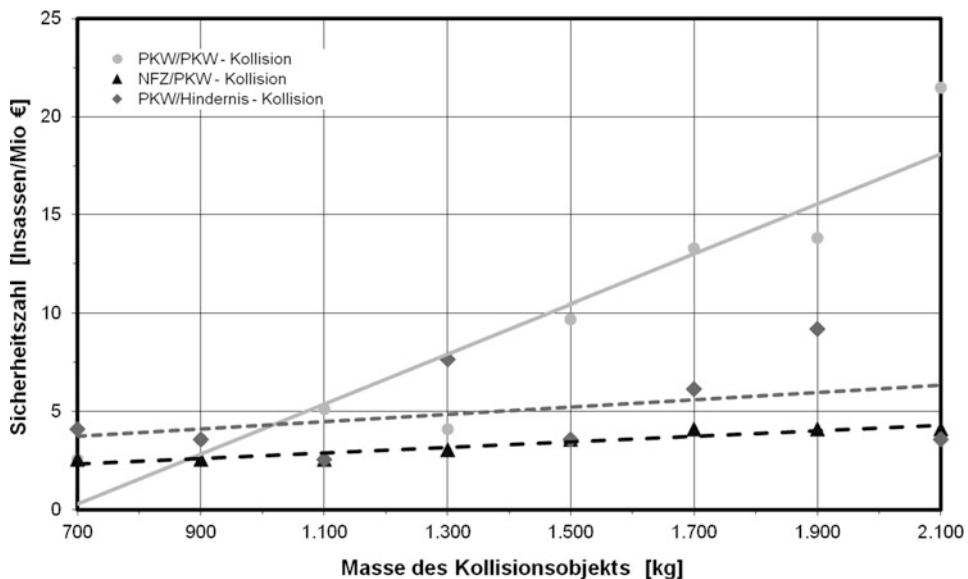


**Abb. 4.8** Mortalitätsrate bei PKW/PKW-Frontalkollisionen ( $n = 718$  Insassen)

Durch die Einführung einer Sicherheitszahl [10] als Quotient aus der Anzahl der beteiligten Insassen und den Verletzungsfolgekosten (in Mio. €), die nicht nur tödliche, sondern auch leichte und schwere Verletzungen berücksichtigen, kann das mit Verringerung der Fahrzeugmasse zunehmende Verletzungsrisiko noch umfassender gezeigt werden (Abb. 4.9), da zum einen Werte auch dann existieren, wenn keine tödlichen Verletzungen auftreten. Zum anderen kennzeichnet eine steigende Sicherheitszahl die Zunahme der Sicherheit (bzw. die Abnahme des Verletzungsrisikos). Die Sicherheit in einem PKW der Kompaktklasse ist auch hierbei etwa viermal niedriger als in einem schwereren PKW der gehobenen Mittelklasse. Daneben ist in Abb. 4.9 der Verlauf der Sicherheitszahl bei PKW/PKW-Kollisionen den Verläufen bei PKW/ Hindernis- und PKW/NFZ-Kollisionen in Abhängigkeit von der Masse des Unfallfahrzeugs gegenübergestellt. Die sich durch Anwendung der Regressionsanalyse ergebenden Ausgleichskurven lassen erkennen, dass – im Gegensatz zu PKW/PKW-Kollisionen – beim Frontalaufprall von PKW auf Hindernisse und auf Nutzfahrzeuge die Masse des Kollisionsobjekts keinen Einfluss auf das Verletzungsrisiko der Insassen aufweist; beide Kurven (gestrichelt und gepunktet)

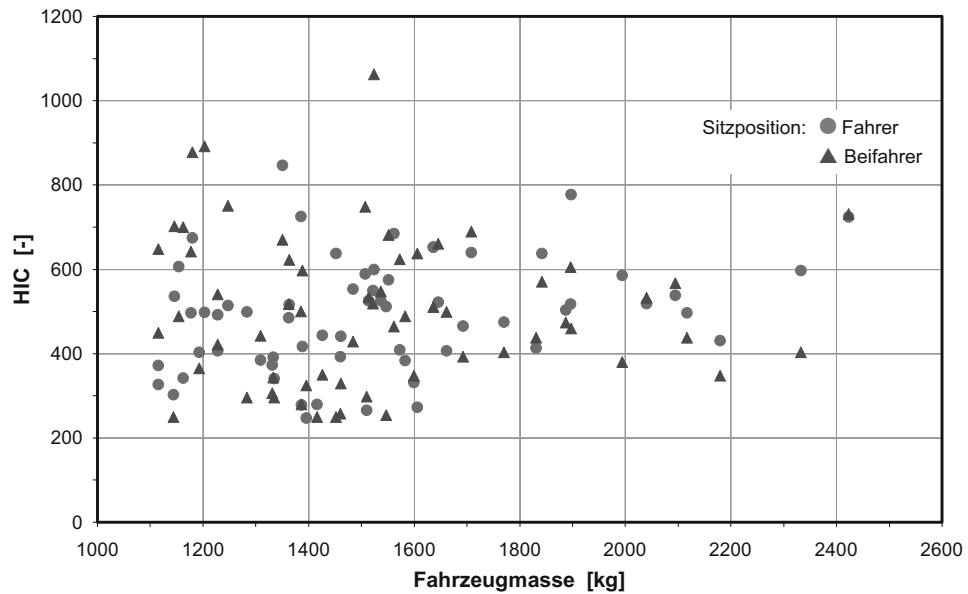
verlaufen weitgehend konstant und weisen Werte unter zehn auf. Daraus lässt sich schließen, dass

- die Sicherheit für Insassen in unterschiedlich schweren PKW beim Aufprall auf Hindernisse und Nutzfahrzeuge etwa so niedrig ist wie das Sicherheitsniveau für Insassen in kleineren PKW bei Kollisionen mit anderen, schwereren PKW und dass
- PKW-Kollisionen mit Nutzfahrzeugen etwa das gleiche Verletzungsrisiko für die PKW-Insassen aufweisen wie bei Kollisionen mit Hindernissen unabhängig vom Gewicht des betrachteten PKW.

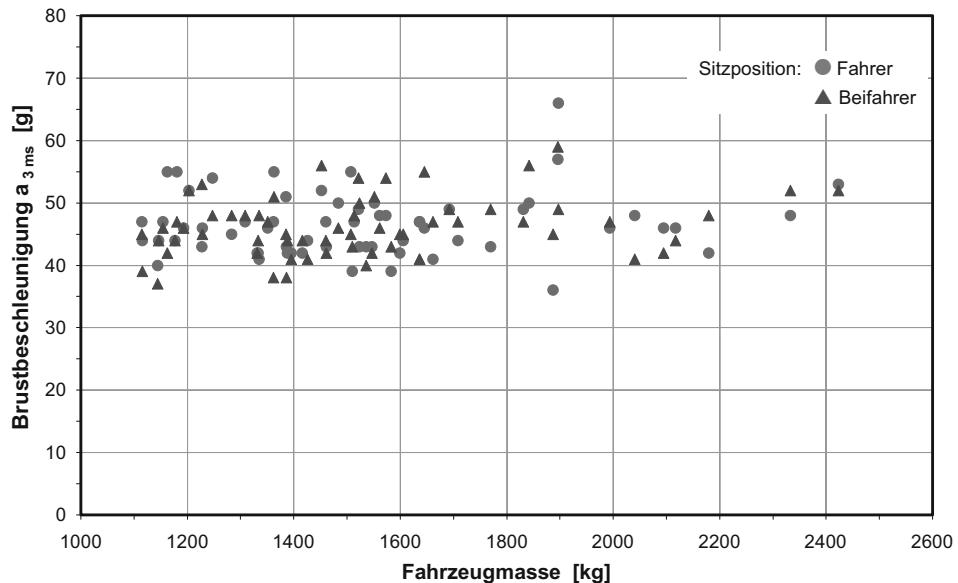


**Abb. 4.9** Sicherheitszahl in Abhängigkeit von der Fahrzeugmasse des Kollisionsobjekts bei unterschiedlichen Kollisionsarten

Die Begründung für die Unabhängigkeit des Verletzungsrisikos von Insassen bei PKW/Hindernis-Unfällen von der Masse des betrachteten Fahrzeugs liefert die Unfallmechanik, mit deren Hilfe gezeigt werden kann, dass die Masse des Kollisionsobjekts keinen Einfluss auf die Unfallschwere hat. Diese Unabhängigkeit des Verletzungsrisikos von der Masse lässt sich im Übrigen auch experimentell anhand von Dummy-Belastungswerten bei Wandaufprall-Versuchen zeigen. In Abb. 4.10 und 4.11 sind die bei NCAP-Tests [11] ermittelten HIC- und  $a_{3\text{ ms}}$ -Werte von Fahrer- und Beifahrer-Dummies bei Aufprallgeschwindigkeiten von 56 km/h in Abhängigkeit von der Masse des Testfahrzeugs dargestellt. Es zeigt sich dabei ein unterschiedlich breites Streuband (bei HIC-Werten größer als bei  $a_{3\text{ ms}}$ -Werten), das weitgehend horizontal verläuft und damit als invariant gegenüber der Fahrzeugmasse angesehen werden kann. Interessant erscheint in diesem Zusammenhang,



**Abb. 4.10** HIC-Werte gemessen am Kopf des Fahrers und des Beifahrer ( $n = 63$ ) aus dem NCAP-Programm 2004 [11]



**Abb. 4.11** Brustbeschleunigungswerte gemessen an der Brust des Fahrers und des Beifahrer ( $n = 63$ ) aus dem NCAP-Programm 2004 [11]

dass bei den neueren NCAP-Versuchen der Anteil der Belastungswerte, der gleich oder größer als die Schutzkriterien-Level sind, im Vergleich zu den Versuchsserien 1992 und 1995 deutlich geringer ist: HIC-Werte überschritten im 2004-Programm den Level in nur 1,6 % verglichen mit 13 % im Jahr 1995 und gar 24 % im Jahr 1992. Der Level bei der  $a_{3\text{ ms}}$ -Brustbeschleunigung wurde bei den NCAP-Versuchen 2004 ebenfalls in nur 1,6 % aller Fälle übertroffen, hingegen im Jahr 1995 in 8 % und 1992 in 10 % aller Tests. Der über die Zeit gesehen geringer werdende Anteil an Wertüberschreitungen kennzeichnet von 1992 über 1995 bis 2004 einen deutlich erkennbaren Zuwachs an passiver Sicherheit.

Es konnte gezeigt werden, dass sich die Massenaggressivität im Wesentlichen auf das Verletzungsrisiko der Insassen bei PKW/PKW-Kollisionen auswirkt, nicht hingegen auf das Verletzungsrisiko bei PKW/Hindernis-Kollisionen. Bei PKW/PKW-Kollisionen ist die Sicherheit in schwereren Fahrzeugen (ca. 1.600 kg) etwa viermal höher als in leichteren PKW (ca. 800 kg). Eine Nivellierung des Verletzungsrisikos etwa durch einen Angleich der Fahrzeugmassen ist aus Gründen des verschiedenartigen Verwendungszwecks und der unterschiedlichen Anforderungen durch die Fahrzeugbenutzer nicht möglich, so dass eine Erhöhung des Selbstschutzes kleinerer Fahrzeuge verbesserte Insassenschutz-Systeme erfordert.

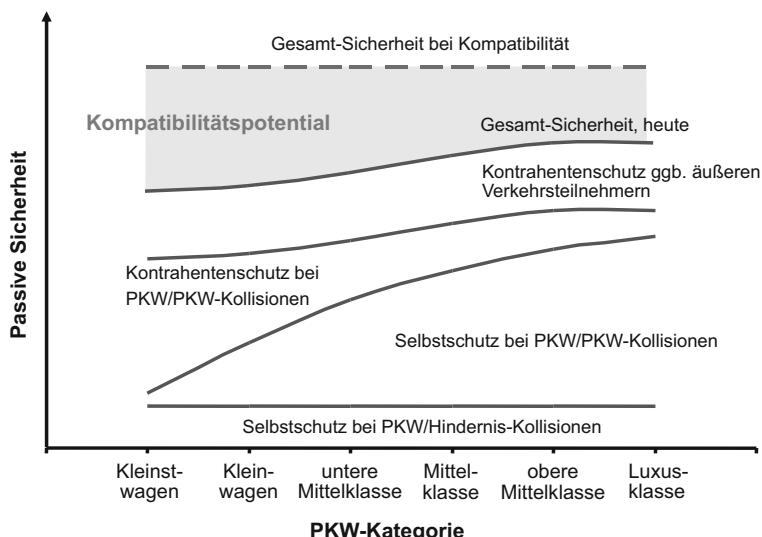
Eine andere Möglichkeit ist in der Anpassung der Steifigkeitsverhältnisse der Deformationsstrukturen zu sehen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich die Auslegung der Struktursteifigkeit beispielsweise nach Gesichtspunkten der PKW/PKW-Kollision auch auf andere Unfall- (und Versuchs-) Konstellationen auswirkt. So zeigt die Erhöhung der Steifigkeit in der Frontstruktur kleinerer Fahrzeuge eine durchaus positive Wirkung, d. h. ein niedrigeres Verletzungsrisiko bei PKW/PKW-Kollisionen, bei Hindernis- und bei Seitenkollisionen hingegen ein höheres Verletzungspotential. Dieses Phänomen führte im Rahmen eines Forschungsprojekts [5] zur Berücksichtigung des gesamten relevanten Unfallgeschehens, indem ein Unfall-Szenario mit drei verschiedenen schweren PKW bei unterschiedlichen Unfallkonstellationen aufgebaut und mathematisch simuliert wurde. Die Ergebnisse wurden bereits in Abschn. 4.2.1 dargestellt; hinsichtlich der Struktursteifigkeit lassen sich die daraus resultierenden konstruktiven Vorgaben wie folgt formulieren:

- Höhere Frontsteifigkeit bei leichteren PKW,
- niedrigere Frontsteifigkeit bei schwereren PKW und
- höhere Seitensteifigkeit bei allen PKW.

Der dritte Kompatibilitätsaspekt bezieht sich auf die Architektur der Deformationsstrukturen, d. h. die geometrische Anpassung der Strukturen bei Frontal- und Seitenkollisionen. Als extrem unangepasste Gegebenheiten lassen sich die geometrischen Verhältnisse bei PKW/NFZ-Kollisionen sowohl bei Frontal- als auch bei Seitenkollisionen nennen. Als Abhilfe kann hier die mittlerweile gesetzlich vorgeschriebene Front- oder Heck-Unterfahrschutz-Einrichtung an Nutzfahrzeugen angesehen werden. Aber auch bei PKW/PKW-Kollisionen lassen sich Beispiele anführen: So stützt sich der Stoßfänger bei

Seitenkollisionen nicht am, aus Gründen des Einstiegskomfort tiefer liegenden Schweller des seitlich getroffenen PKW ab, sondern es sind Türleitschienen mit entsprechender Verankerung in der Fahrzeug-Seitenstruktur erforderlich. Die unterschiedliche Höhe der vorderen und der hinteren Stoßfänger geben ebenfalls einen Hinweis auf vorherrschende Inkompatibilitäten.

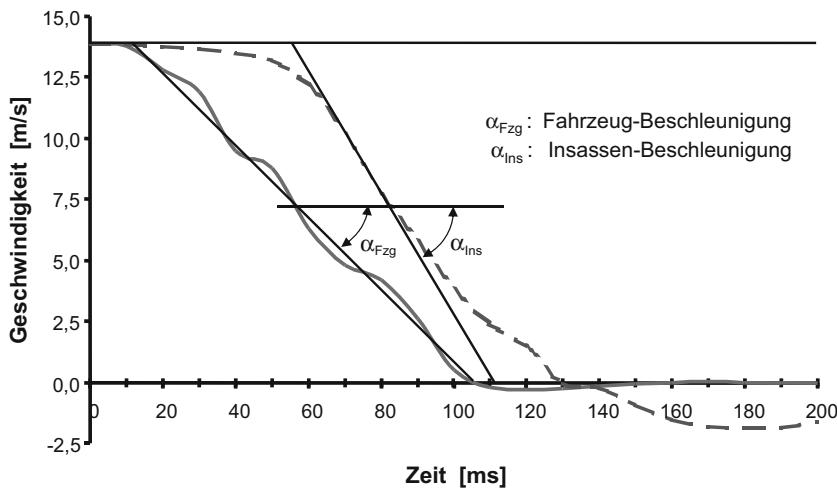
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ein erhebliches Defizit an passiver Sicherheit auf den  $\Delta v$ -Nachteil bei PKW/PKW-Kollisionen zurückgeführt werden kann (Abb. 4.12), das zusätzlich verstärkt wird durch die Markteinführung von Leichtbau-Fahrzeugen, die aufgrund der stark reduzierten Deformationsstruktur durch hohe Steifigkeiten charakterisiert sind. Hier bestehen die Kompatibilitätsmaßnahmen in erster Linie in der Bereitstellung besserer Rückhaltesysteme. Die Masse der Fahrzeuge wirkt sich bei PKW/PKW-Kollisionen hinsichtlich des Kontrahentenschutzes in umgekehrter Weise aus, indem die Sicherheit mit zunehmender Masse degressiv abnimmt [9]. Im Hinblick auf den Selbstschutz bei Hindernis-Kollisionen und die Sicherheit äußerer, ungeschützter Verkehrsteilnehmer weist die Masse des betrachteten Fahrzeugs keinen signifikanten Einfluss auf. So ergibt sich zur Nivellierung des Sicherheitsniveaus ein Handlungsbedarf, insbesondere für Kleinst- und Kleinwagen, der dem Benutzer leichterer PKW trotz unfallmechanischer Nachteile das gleiche Maß an passiver Sicherheit bereitstellt wie dem Benutzer schwererer PKW. Diese Zusammenhänge sind qualitativ für unterschiedlich schwere Fahrzeuge in Abb. 4.12 gezeigt; die aus [12] in modifizierter Form übernommen wurden.



**Abb. 4.12** Passive Sicherheit und Kompatibilitätspotential für Fahrzeuge unterschiedlicher Gewichtsklassen (nach [12])

#### 4.2.4 Prinzip des Geschwindigkeitsangleichs

Sieht man bei der Beanspruchung des Insassen, des Zweirad-Fahrers oder auch des Fußgängers während eines Unfalls von extremen Relativbewegungen zwischen benachbarten Körperteilen (z. B. Kopf/Torso-Region) ab, so lässt sich feststellen, dass die biomechanische Belastung aus dem Angleich der Geschwindigkeit zwischen Kontaktstruktur und Körper teil resultiert. Dieser Geschwindigkeitsangleich soll nachfolgend in vereinfachender Weise anhand der Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug und Insassen bei einer Frontalkollision betrachtet werden.

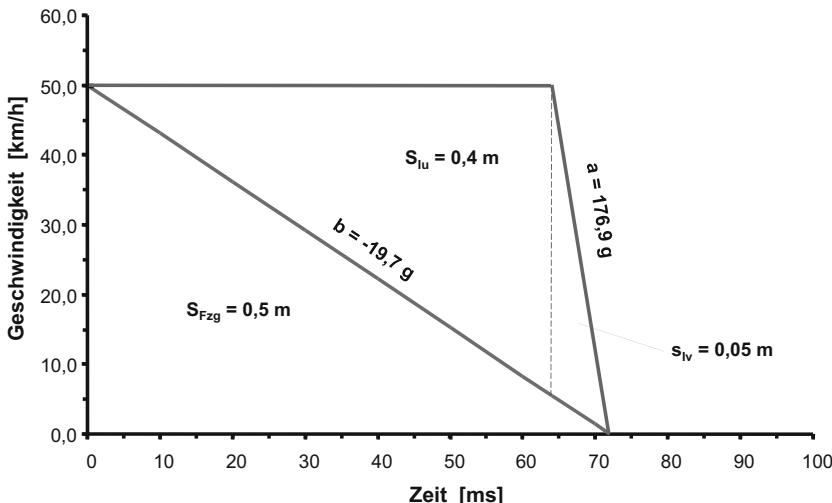


**Abb. 4.13** Geschwindigkeit des Fahrzeugs und des Insassen in Abhängigkeit von der Zeit

Die Darstellung in Abb. 4.13 zeigt Geschwindigkeit/Zeit-Verläufe, die durch Integration der im Versuch gemessenen Beschleunigungssignale gewonnen wurden. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Geschwindigkeit des Fahrzeugs nach dem Kollisionsbeginn ( $t = 0$ ) abnimmt, während sich der Insasse zunächst mit annähernd unverminderter Geschwindigkeit weiterbewegt. Erst die wirksamen Rückhaltekräfte aus dem Insassenschutzsystem und dem Sitz reduzieren die Geschwindigkeit des Insassen bis er die gleiche Geschwindigkeit wie das Fahrzeug aufweist, nämlich im Ruhezustand zum Zeitpunkt  $t = 140$  ms. Der Geschwindigkeitsabfall ist ein Maß für die Beschleunigung (im vorliegenden Fall spricht man von der Verzögerung), der zur Erläuterung der prinzipiellen Vorgänge hier näherungsweise durch eine Gerade beschrieben wird.

Ein derartiger Geschwindigkeitsverlauf ist in Abb. 4.14 dargestellt: das Fahrzeug wird von  $v_0 = 50$  km/h (= 13,89 m/s) mit einer konstanten Beschleunigung von  $b = -192,9 \text{ m/s}^2$  (=  $-19,7g$ ) auf eine Geschwindigkeit von  $v = 0$  km/h verzögert. Der nichtgesicherte Insasse, charakterisiert durch eine den Insassen-Oberkörper beschreibende Punktmasse, behält seinen Bewegungszustand bei und kontaktiert nach Überwindung eines Vorverlagerungs-

weges von  $s = 0,40 \text{ m}$  (dies entspricht der Fläche zwischen den beiden Geschwindigkeitskurven) mit dem Lenkrad bzw. mit der Instrumententafel. Aufgrund der harten Kontaktstruktur erfolgt der Geschwindigkeitsangleich in sehr kurzer Zeit ( $\Delta t = 7,8 \text{ ms}$ ) und auf sehr kurzem Weg ( $\Delta s = 5 \text{ cm}$ ). Dabei erfährt der Insasse eine Beschleunigung von  $a = 1.736 \text{ m/s}^2 (= 176,9g)$ , die weit über der Erträglichkeitsgrenze (für den Kopf:  $a_{3 \text{ ms}} = 80g$ ; für die Brust:  $a_{3 \text{ ms}} = 60g$ ) liegt.

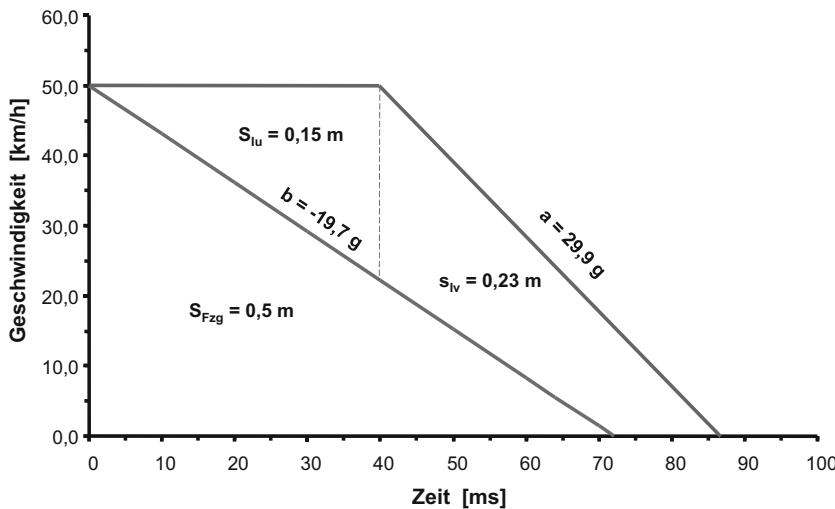


**Abb. 4.14** Geschwindigkeit des Fahrzeugs und des nicht-gesicherten Insassen in Abhängigkeit von der Zeit (schematische Darstellung)

Durch die Einführung von Rückhaltesystemen wird die Beschleunigung früher und über einen längeren Zeitraum eingeleitet, ein Kontakt mit harten Strukturen des Fahrzeug-Innenraums kann, zumindest bis zu einer bestimmten Aufprallgeschwindigkeit, verhindert werden. Der Geschwindigkeitsangleich kann daher mit einer Beschleunigung erfolgen, die mit  $a = 29,9g$  deutlich unterhalb der Erträglichkeitsgrenze liegt. Eine derartige Situation ist bei ansonsten gleichen Bedingungen in Abb. 4.15 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Reduzierung der am Insassen wirkenden Beschleunigung durch verschiedene Maßnahmen erreicht werden kann:

- frühzeitig einsetzende Rückhaltesysteme, wie Gurtsystem mit Gurtstraffer, Airbag-System u. ä., und
- Ausnutzung bzw. im Bedarfsfall Vergrößerung des Vorverlagerungsweges (keine Lenkrad-Intrusion, eher Lenkrad-Verlagerung weg vom Insassen).

Es ist unschwer vorstellbar, dass die gleichen prinzipiellen Aussagen auch auf andere Kollisions- und Aufprallarten übertragen werden können.



**Abb. 4.15** Geschwindigkeit des Fahrzeugs und des gesicherten Insassen in Abhängigkeit von der Zeit (schematische Darstellung)

#### 4.2.5 Ride-Down-Effekt

Der Ride-Down-Effekt charakterisiert die kinematischen Verhältnisse zwischen Insassen und Fahrzeug während einer Kollision [13, 14] und gibt an, in welchem Umfang das jeweils verwendete Insassenschutz-System während der Fahrzeugdeformation beim Unfall bzw. im Versuch wirksam ist. Er errechnet sich wie folgt:

$$\text{RDE} = \frac{s_{\max} - s_{RD}}{s_{\max}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.12)$$

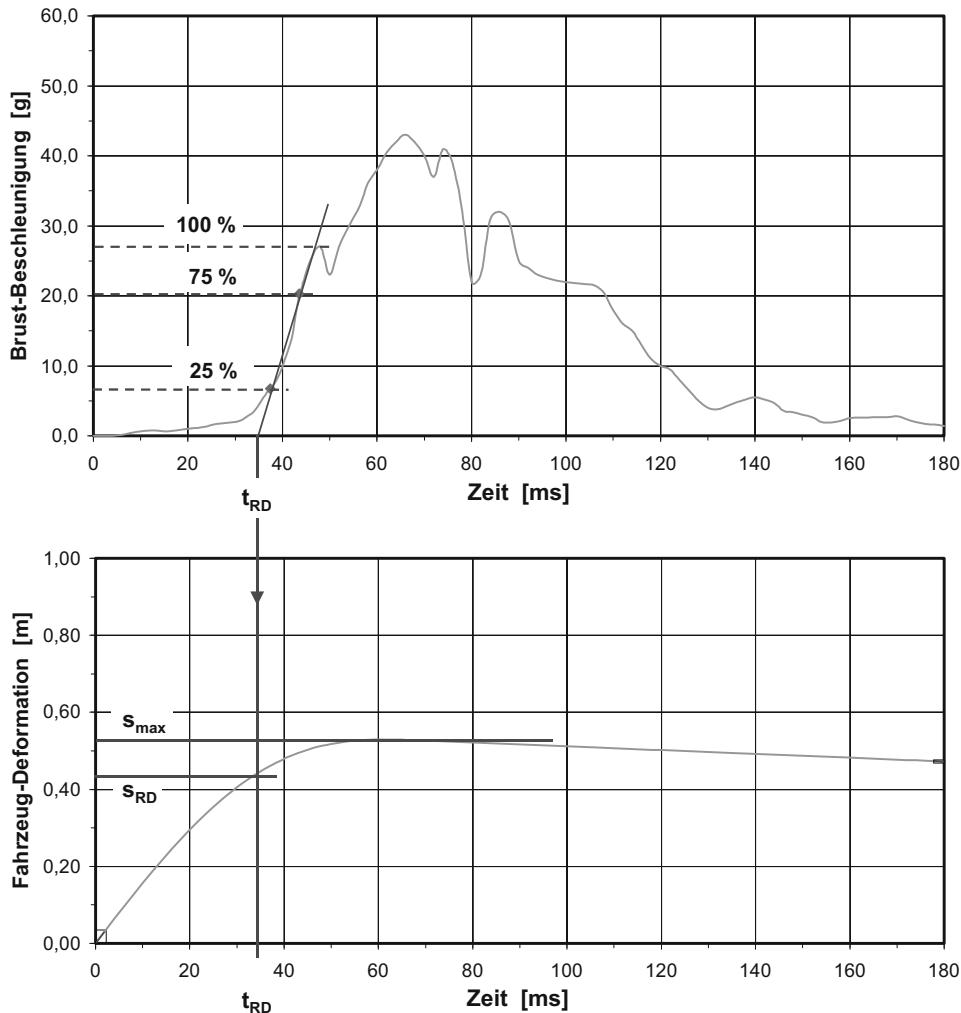
mit

$s_{\max}$ : maximaler Deformationsweg des Fahrzeugs,

$s_{RD}$ : Fahrzeug-Deformationsweg zum Zeitpunkt  $t = t_{RD}$ , ab dem die Rückhaltung des Insassen einsetzt.

Der Wert  $\text{RDE} = 100 \%$  bedeutet, dass der Insasse bereits ab dem Zeitpunkt verzögert wird, ab dem auch das Fahrzeug eine Verzögerung erfährt (Crash-Beginn, d. h.  $t = 0$ ), während  $\text{RDE} = 0 \%$  eine Situation charakterisiert, bei der der Insasse bis zur Erreichung des maximalen dynamischen Fahrzeug-Deformationsweges keiner Verzögerung unterworfen wird. Der errechnete RDE-Wert ist somit eine notwendige, keinesfalls aber eine hinreichende Bedingung für ein effizient ausgelegtes Rückhaltesystem.

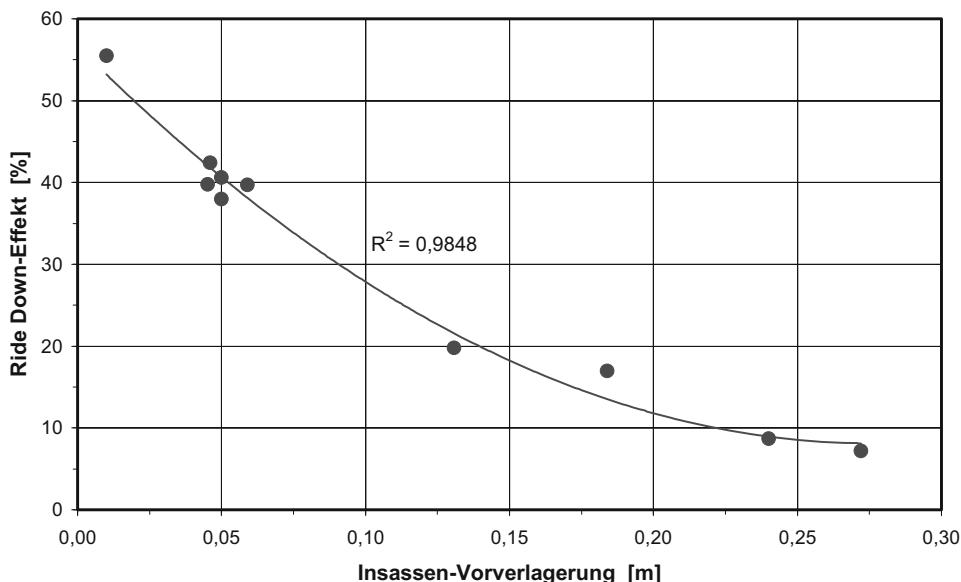
Die Berechnung des RDE-Wertes erfolgt durch die Verwendung des zeitlichen Verlaufs der resultierenden Brustbeschleunigung, deren ansteigender Flanke mittels einer Geraden, die den 25- und den 75 %-Punkt schneidet, angenähert wird. Der 100 %-Wert entspricht dabei dem (ersten) Beschleunigungsmaximum (Abb. 4.16). Der Schnittpunkt der Geraden



**Abb. 4.16** Brustbeschleunigung des Insassen und Deformationsweg des Fahrzeugs zur Ermittlung des Ride-Down-Effekts

mit der Zeitachse repräsentiert den Zeitpunkt  $t_{RD}$ , bei dem der Retraktor blockiert und die Gurtlose überwunden wird, das Gurtsystem also wirksam wird. Bis zu diesem Zeitpunkt hat das Fahrzeug den Weg  $s_{RD}$  zurückgelegt. Die Differenz zwischen dem maximalen dynamischen Deformationsweg  $s_{max}$  des Fahrzeugs und dem für die Rückhaltwirkung wirktlos zurückgelegten Weg  $s_{RD}$  beschreibt den prozentualen Anteil des Verzögerungsweges, der für die Insassenverzögerung genutzt wird. Ein Wert von RDE = 55 % kennzeichnet bereits eine gute Wirksamkeit eines Insassenschutzsystems; er wurde bei dem relativ unrealistischen ECE-R 16-Test mit einem Dreipunkt-Automatik-Gurtsystem unter Verwendung eines HYBRID-III-Dummies entnommen [15]. Je später der Zeitpunkt  $t_{RD}$  liegt,

ab dem das Rückhaltesystem wirksam ist, desto größer ist die Vorverlagerung des Insassen (Relativweg zwischen der Brust des Insassen und dem Fahrzeug) und desto geringer wird der Ride Down-Effekt. Ist der Relativweg zu groß, so reicht der verbleibende Vorverlagerungsweg für eine angemessene Rückhaltung nicht mehr aus, und es kommt zum Kontakt zwischen Brust und/oder Kopf des Insassen und Teilen des Fahrzeug-Innenraums, der zu schweren Verletzungen führen kann. Aus einer Versuchsreihe, durchgeführt bei TNO [15], ist der RDE-Wert als Funktion des Vorverlagerungsweges  $s_v$  zum Zeitpunkt  $t = t_{RD}$  in Abb. 4.17 dargestellt. Hieraus lässt sich erkennen, dass mit zunehmender Vorverlagerung und späterliegendem Zeitpunkt  $t_{RD}$  der RDE-Wert gegen Null strebt.

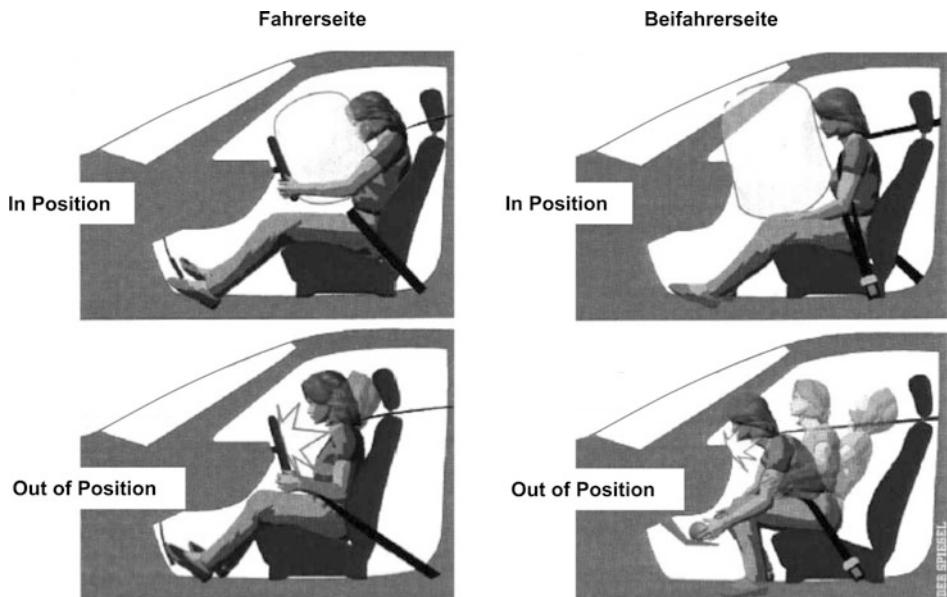


**Abb. 4.17** Wert des Ride-Down-Effekts in Abhängigkeit vom Vorverlagerungsweg des Insassen

Der Ride-Down-Effekt lässt sich aber nicht nur zur Bewertung von unterschiedlichen Insassenschutz-Systemen verwenden, sondern er gestattet auch die Beurteilung des Fahrzeug-Verzögerungsverlaufs z. B. beim Einsatz gleicher Schutzsysteme in verschiedenen Fahrzeugtypen mit jeweils eigenem Verzögerung/Zeit-Verlauf. Hierbei lässt sich eine Aussage darüber treffen, inwieweit der Fahrzeug-Verzögerungsverlauf geeignet ist, den unverzögerten Vorverlagerungsweg des Insassen bis zum Einsetzen des Rückhaltesystems zu überwinden.

#### 4.2.6 Out-of-Position-Situationen

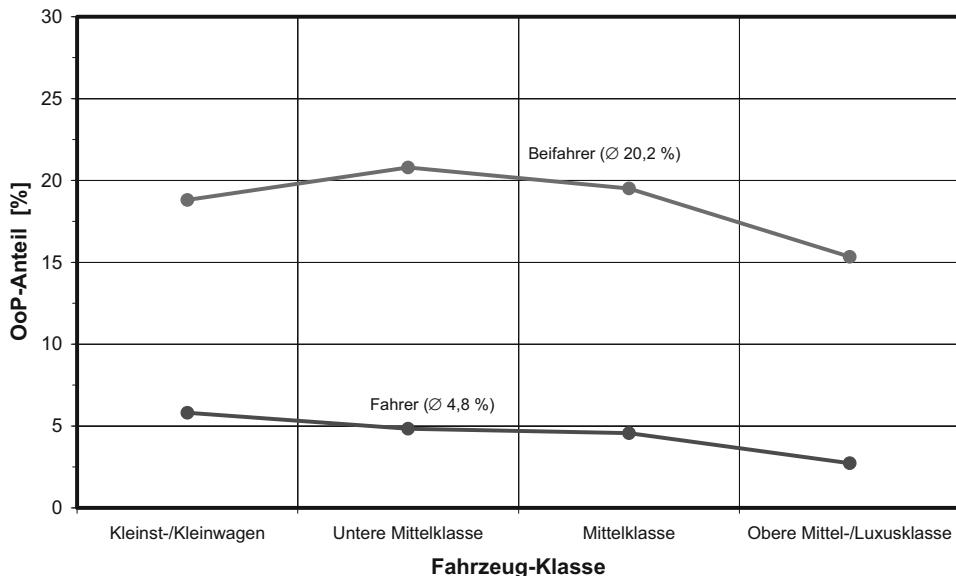
Eine wesentliche Anforderung, verschärft durch die in 2000 erfolgte Modifikation des US-amerikanischen Standards FMVSS 208, stellt sich bei der Sicherheitsauslegung hin-



**Abb. 4.18** Out of Position-Situationen im Vergleich zur normalen Sitzpositionen (In Position) auf der Fahrer- und der Beifahrer-Seite (nach SPIEGEL-Grafik)

sichtlich der Minimierung des Verletzungsrisikos von Insassen in frontal kollidierenden Fahrzeugen durch den sich entfaltenden Airbag bei Out-of-Position-(OoP-)Situationen. Diese sind gekennzeichnet durch Insassen-Körperteile oder Gegenstände, die in den Airbag-Entfaltungsbereich hineinreichen (Abb. 4.18); sie können ein beträchtliches Gefahrenpotential darstellen [16]. Neuere, repräsentative Verkehrsbeobachtungen an etwa 18.000 im Verkehr befindlichen Kraftfahrzeugen [17] zeigen, dass OoP-Situationen in PKW fahrer-seitig zwar nur in 4,8 % auftreten, beifahrer-seitig aber wurden bei etwa einem Fünftel (20,2 %) derartige Situationen ermittelt (Abb. 4.19). Aufgrund eines offensichtlichen Langstrecken-Effekts konnten bei Beifahrern auf Autobahnen etwa doppelt so viele OoP-Situationen (22 %) festgestellt werden wie innerorts (12 %), und bei Gurt-Nutzung scheint die OoP-Tendenz niedriger zu sein als bei nicht gesicherten Insassen.

Die Häufigkeit und die Mechanismen von Verletzungen bei OoP-Situationen sind derzeit jedoch umstritten: So findet sich in der Literatur zwar immer wieder die Aussage, dass OoP-Situationen das Risiko erhöhe, bei Frontal-, aber auch bei Heckkollisionen Verletzungen zu erleiden, Veröffentlichungen aber, etwa über Unfalluntersuchungen oder Probandenversuche, beschränken sich lediglich auf Einzelfälle. Vorliegende Versuchsreihen weisen tendenziell eher in die Richtung, dass der Einfluss von OoP-Situationen äußerst gering ist. So wird in [18] die Tendenz aufgezeigt, dass unterhalb einer Geschwindigkeitszunahme des gestoßenen Fahrzeugs von bis zu 10 km/h auch dann ein höheres



**Abb. 4.19** Anteil der Out-of-Position-Situationen bei PKW-Fahrern und -Beifahrern in Abhängigkeit von der Fahrzeug-Klasse (aus [17])

Verletzungsrisiko ausgeschlossen werden kann, wenn sich der Fahrer nach vorne, beispielsweise in Richtung Radio, beugt oder den Kopf zum Schulterblick verdreht hat. Zu einer ähnlichen Aussage kommt zudem eine spezielle Untersuchung zur vorgebeugten Haltung von PKW-Frontinsassen, um die Verkehrsregelung (beispielsweise Verkehrszeichen oder Lichtzeichen-Anlagen) zu beobachten [19]. Tendenziell wird hier sogar von einer geringeren Belastung durch die vorgebeugte Position der Probanden ausgegangen.

### 4.3 Maßnahmen zum Selbstschutz

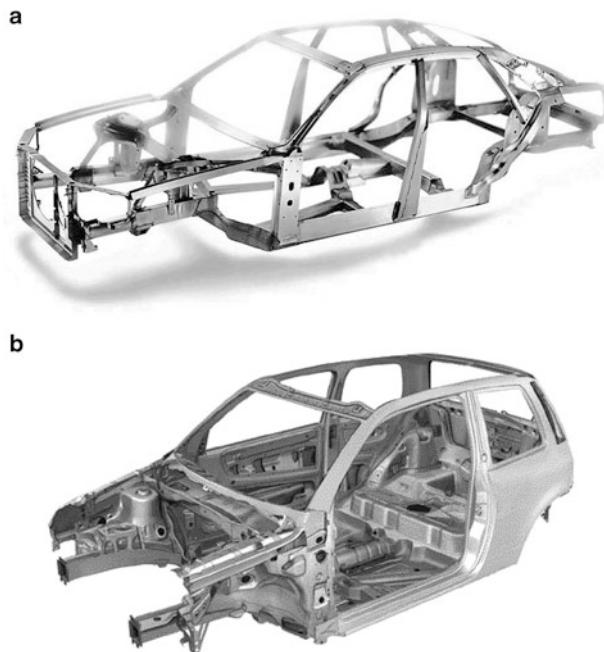
Die nachfolgend dargestellten Selbstschutz-Maßnahmen umfassen, wie bereits in Abschn. 4.1.1 dargelegt wurde, zunächst die Deformationsstruktur, d. h. die Kontaktbereiche der Karosserie, die bei Kollisionen beansprucht werden. Im Anschluss daran werden die „klassischen“ Rückhaltesysteme, also Gurt und Airbag, und deren Komponenten erläutert. Diese erfahren eine Erweiterung in Richtung Insassenschutz-Systeme, bei denen Randbereiche wie Sitz, Lenkeinrichtung, Kopfstützen u. a. in die Betrachtung einbezogen werden. Aber auch die Sicht der Wirkrichtung wird erweitert, so z. B. Maßnahmen zum Schutz bei Seitenkollisionen. Schließlich wird auf Selbstschutz-Maßnahmen für Zweirad-Fahrer und für Nutzfahrzeuge eingegangen.

### 4.3.1 Karosserie und Deformationsstruktur

Der Karosserie kommen zwei entscheidende Aufgaben zu: Zum einen muss sie im Bereich der Fahrgastzelle ausreichend hohe Steifigkeit aufweisen, um bei Unfällen den Überlebensraum für die Insassen sicherzustellen, aber auch um für Gurtbefestigungspunkte, Sitze u. a. Bauteilen ausreichende Festigkeit zu bieten, und sie muss zum anderen in den Deformationszonen nachgiebig ausgebildet sein, um bei Frontal-, Seiten- und Heckkollisionen die kinetische Energie in Deformationsenergie umwandeln zu können und gleichzeitig eine insassenverträgliche Beschleunigungscharakteristik bereitzustellen.

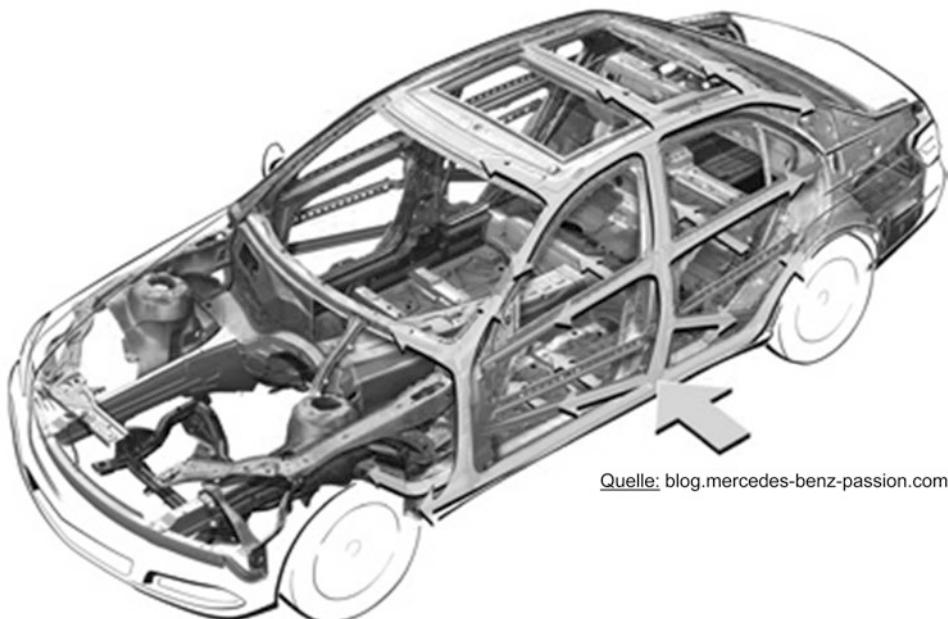
In Abb. 4.20 sind zwei moderne Fahrgastzellen mit den wesentlichen tragenden Bau teilen dargestellt. Die Festigkeit der Zelle wird durch weniger Einzelteile zum Aufbau der Karosserie, eine dadurch geringere Anzahl von Schweißnähten, die Verstärkung der Dach säulen sowie stabile Querträger erreicht. Bei Frontalkollisionen werden die vorne einge leiteten Kräfte über die Längsträger in den Mitteltunnel, die Schweller und den Dachrahmen geführt.

**Abb. 4.20** Tragende Bau teile der Fahrgastzelle am Beispiel des Space Frame von Audi (a) und einer Standard Schalenbauweise ULSAP (b)



Bei Seitenkollisionen ist der Insasse einem besonders hohen Verletzungsrisiko ausgesetzt, da der zur Verfügung stehende Weg zwischen Tür-Innenseite und dem Insassen sehr gering ist. Während der Fahrer im Falle einer Frontalkollision in das Insassenschutz-System „hineinfällt“ und erst dann an der Fahrzeugverzögerung teilnimmt, dringt bei einer Seiten kollision die Fahrertür in das Fahrzeug ein und der Insasse wird auf eine Geschwindigkeit gebracht, die annähernd der Eindringgeschwindigkeit des stoßenden Fahrzeugs entspricht.

Damit ist das Verletzungsrisiko für den stoßzugewandten Insassen höher. Zur Erhöhung der Festigkeit in diesem Bereich tragen stabile Türscharniere und -schlösser, großvolumige verstärkte Schweller und Türrahmen oder zusätzliche Blech- und Rohrkonstruktionen in den Seitenbereichen bei (Abb. 4.21). Des Weiteren werden die Türzargen so gestaltet, dass eine zusätzliche Abstützung am Türrahmen erfolgt und die auftretenden Kräfte in die stabilen Türsäulen, in den Schweller und in den Dachrahmen eingeleitet werden.

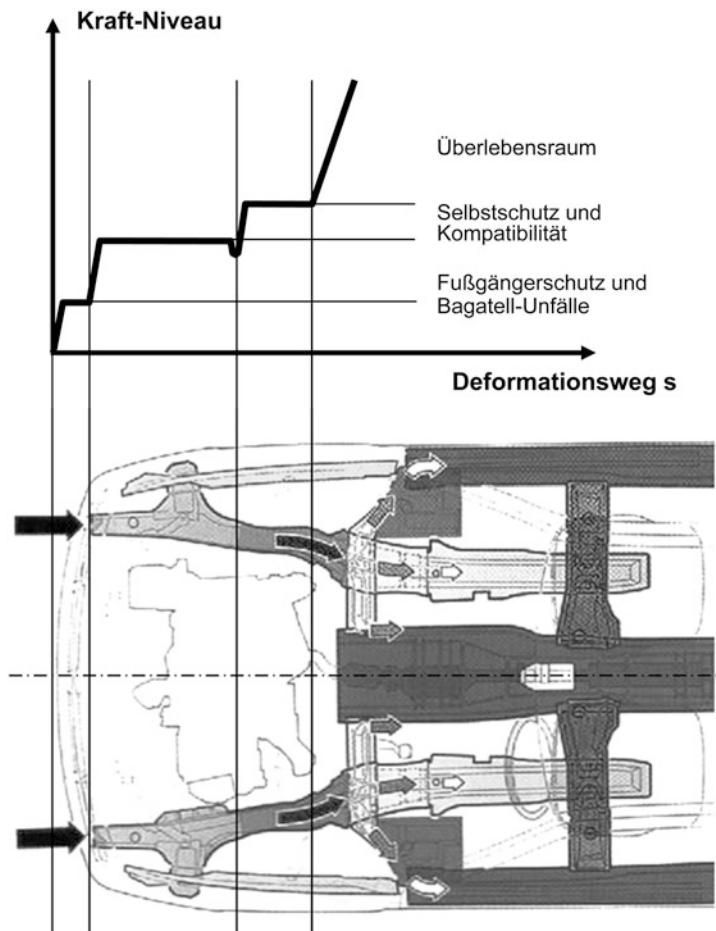


Quelle: blog.mercedes-benz-passion.com

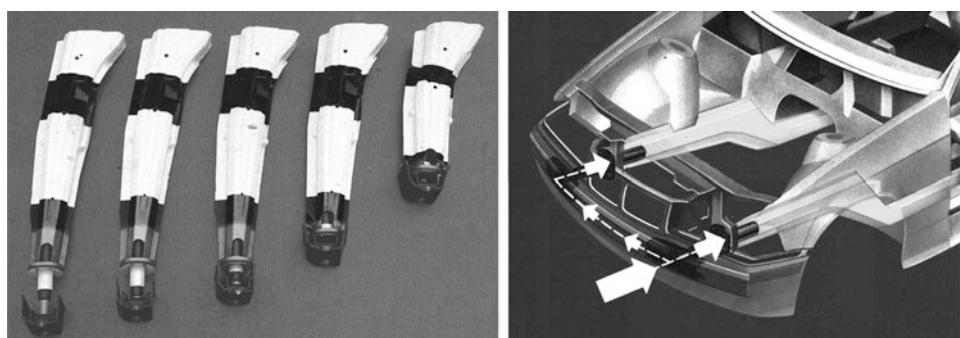
**Abb. 4.21** Aufbau einer Karosserieseite und Lastpfade für eingeleitete Kräfte

Die Deformationsstrukturen am Fahrzeug dienen der Energieaufnahme beim Frontal-, Seiten- oder Heckaufprall, d. h. der Umwandlung der kinetischen Energie in Deformationsarbeit. Daraus ergibt sich ein Kraft- bzw. Beschleunigungsverlauf, der die Auslegung der Insassenschutzsysteme entscheidend beeinflusst. Die vordere Deformationszone lässt sich grundsätzlich in drei Zonen unterteilen (vgl. Abb. 4.22).

Die Fußgängerschutz-Zone ist eine Form des Kontrahentenschutzes gegenüber ungeschützten, äußereren Verkehrsteilnehmern. Da ein Fahrzeug aber zum Selbstschutz Strukturen mit einem früh wirksamen, hohen Kraftniveau aufweisen muss, ist der Gestaltungsspielraum in diesem Bereich gering. Des Weiteren können durch die geeignete Gestaltung dieser Zone Unfallfolgekosten in Form von Sachschäden bei Kollisionsgeschwindigkeiten bis zu ca. 15 km/h minimiert werden. Die Deformationskräfte werden dabei gezielt in eine Prallstoßfänger- bzw. Stützrohrkonstruktion eingeleitet (Abb. 4.23). Die Pralldämpfer federn kleinere Anstöße bis 4 km/h vollständig ab und weisen dabei keinerlei Beschädigungen auf. Bei Kollisionsgeschwindigkeiten bis ca. 15 km/h absorbieren die auswechsel-



**Abb. 4.22** Deformationszonen und Kraftniveaus an der PKW-Vorbaustuktur



**Abb. 4.23** Hydraulisch/pneumatische Prallstoßfänger und Stülprohre (aus [20])

baren Stülprohre, so genannte Crash-Boxen, die Aufprallenergie. Die Fußgängerschutz-Zone sollte ein möglichst niedriges Kraftniveau beim Kontakt mit äußeren Verkehrsteilnehmern aufweisen, das jedoch durch eine Mindestfestigkeit zum Schutz vor leichten Kollisionen nach unten begrenzt ist. Diese Schutzone reicht bis zur Vorderkante der vorderen Rahmenlängsträger.

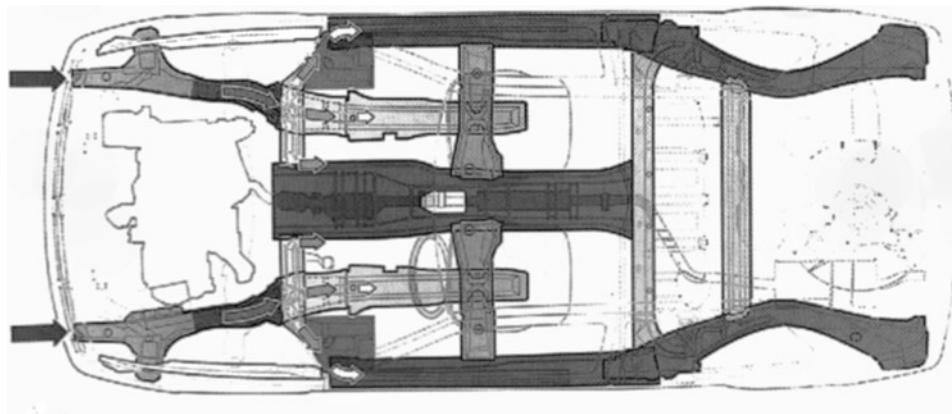
Die Kompatibilitäts-Zone dient sowohl dem Selbst- als auch dem Kontrahentenschutz. Wie bereits in Abschn. 4.2.3 erläutert wurde, soll sie bei einer Kollision zweier unterschiedlich schwerer Fahrzeuge den bestmöglichen Schutz der Insassen beider Fahrzeuge gewährleisten. Bei der Gestaltung der Deformationszone müssen Kollisionen mit unterschiedlich schweren Fahrzeugen in Betracht gezogen werden. Ein Unfall mit einem schwereren PKW lässt zum Beispiel eine harte Frontstruktur sinnvoll erscheinen, ein Unfall mit einem leichteren PKW hingegen erfordert eine weichere Struktur. Anders ausgedrückt heißt das, dass bei schweren Fahrzeugen diese Zone weicher ausgelegt werden muss als bei leichteren. Da ein PKW aber der gesamten Fahrzeugpopulation im Unfallgeschehen ausgesetzt ist, sind große Anstrengungen erforderlich, einen Kompromiss für ein kompatibles Kraftniveau aufzufinden. Die Kompatibilitätszone endet im Bereich der Radaufhängung.

Während sich bei Frontalunfällen die Struktur in den vorderen Zonen definiert verformt und zum Schutz der Insassen die Zellenverzögerung auf einen relativ niedrigen Level begrenzt wird, soll sich die Struktur in der Selbstschutz-Zone, dem Bereich näher an der Fahrgastzelle, nur wenig verformen. Die Steifigkeit der Bauelemente steigt also in dieser Zone stärker an, um die Fahrgastzelle stabil zu halten. Dies wird durch die gezielte Einleitung der auftretenden Kräfte in die Rahmenkonstruktion der Zelle erreicht. Bei hoher Unfallschwere muss jedoch ein Teil der verbleibenden Restenergie absorbiert werden. Das Kraftniveau steigt daher zur Fahrgastzelle an. Mit Hilfe einer rechteckigen Kennung könnte zwar eine höhere Energie umgesetzt werden, die schlagartig auftretende, hohe Kraft kann allerdings nur schwer realisiert werden.

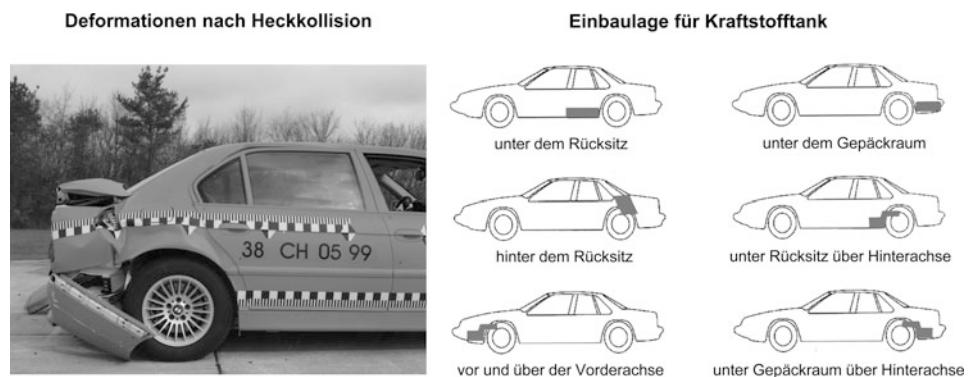
In Abb. 4.24 ist ein Beispiel für ein Vorbaukonzept eines PKW dargestellt: Durch die Anordnung des diagonalen Trägers im vorderen Bereich des Fahrzeugs werden die Kräfte beim versetzten Frontalaufprall, dem so genannten Off-set-Crash, in den seitlich angeordneten Längsträger eingeleitet. Im Idealfall lassen sich folgende Vorteile erzielen:

- Beim Unterschreiten einer bestimmten Überdeckung, z. B.  $30^\circ$ , erfolgt am stabilen Diagonalträger ein Abgleiten,
- bis zu einer bestimmten Verformung wird Energie absorbiert und das Fahrzeug wird verzögert, und
- durch den stabilen Diagonalträger wird der Fußraum geschützt, weil Intrusionen verhindert werden, und die Kräfte werden unmittelbar in den Schweller eingeleitet.

Die Deformationsstruktur im Heck besteht ebenfalls aus mehreren Bereichen. Im hintersten Bereich nehmen hydraulische oder pneumatische Pralldämpfer die Energie bei kleineren Parkier-Unfällen auf, dadurch lassen sich die Reparaturkosten minimieren. Bei Heckkollisionen mit höherer Geschwindigkeit wird die Energie in der Karosseriestruktur,



**Abb. 4.24** Beispiel für ein Vorbaukonzept (aus mot Auto Technik Zukunft – Passive Sicherheit)

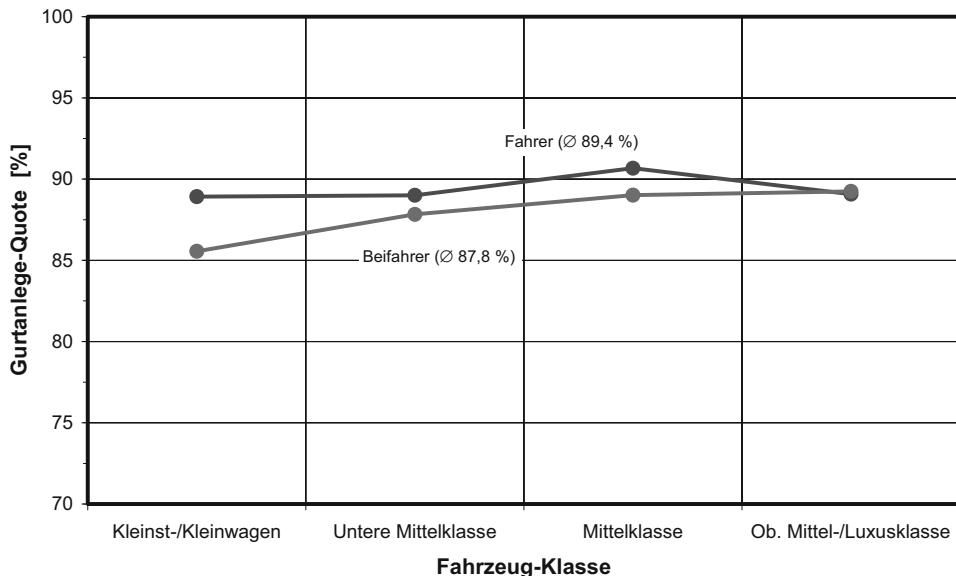


**Abb. 4.25** Deformierte Heckstruktur eines BMW nach einem Heckaufprallversuch mit 50 km/h und mögliche Einbau-Bereiche für Kraftstofftanks

die zum Fahrgastrauum hin steifer ausgelegt ist, umgewandelt. Bei Heckunfällen tritt ein zusätzliches Risiko auf: die Beschädigung des Kraftstofftanks. Daher werden Einbaustellen gewählt, die sich im Unfallgeschehen am wenigsten verformen, zum Beispiel unter der Rücksitzbank vor oder über der Hinterachse (vgl. Abb. 4.25). Grundsätzlich gilt, je tiefer der Tank angeordnet ist, desto weniger häufig wird er bei Heckkollisionen in Mitleidenschaft gezogen. Diese Einbaulage bietet zusätzliche Vorteile hinsichtlich der Fahrdynamik.

### 4.3.2 Gurtsysteme und -komponenten

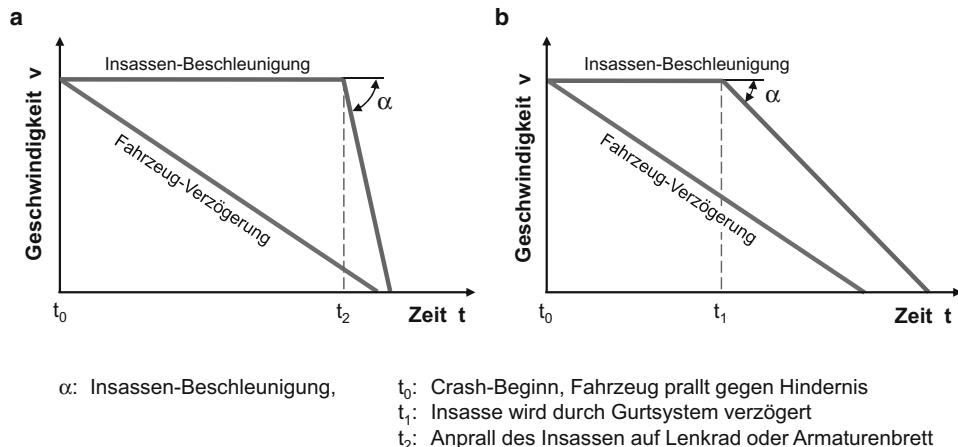
Das Gurtsystem gilt heute unbestritten als „Lebensretter Nummer Eins“, zumal in Deutschland seit der Bußgeld-Bewehrung für das Nicht-Anschnallen im August 1984 die **Gurt-Anlegequote** sprunghaft von bis dahin etwa 60 % auf heute beinahe 90 % (vgl. Abb. 4.26)



**Abb. 4.26** Gurt-Anlegequote bei PKW-Frontinsassen in Abhängigkeit von der Fahrzeug-Klasse (aus [17])

angestiegen ist [17]. Aber nicht nur die Gurtnutzung hat zugenommen, sondern es konnten zwischenzeitlich auch die anfänglichen, mitunter erheblichen Mängel, die mit Einführung der Statik- und später der Automatikgurte aufgetreten sind, durch kontinuierliche Verbesserungen weitgehend eliminiert werden. Die Mängel der ersten Gurtsystem-Generationen hatten schwerwiegende Verletzungen insbesondere bei hoher Unfallschwere zur Folge [21]: Becken-Zertrümmerungen aufgrund zu langer Gurtpeitschen und ungünstiger Gurtbefestigung, Abdominalverletzungen und Frakturen der unteren Extremitäten und am Becken aufgrund des Submarining-Effekts, Frakturen am Thorax und der Wirbelsäule aufgrund ungünstiger Gurtband-Führung und geringer Elastizitäten des Gurtband-Materials u. a. m. Diese „**Gurtverletzungen**“ wurden noch Ende der 1970er Jahre zum Anlass genommen, äußerst kontrovers gegen die Verwendung von Gurtsystemen zu polemisieren, ohne in die Überlegungen die zu erwartenden Verletzungen bei Nicht-Nutzung des Gurtes in ausreichendem Maße einzubeziehen. Dennoch haben auch sie den Verbesserungsprozess zumindest beschleunigt und es bleibt festzustellen, dass bisher keine Einzelmaßnahme eine derartig hohe Effizienz hinsichtlich der Verbesserung der Fahrzeug-Sicherheit zur Folge hatte wie der Einsatz heutiger Gurtsysteme.

Die **Wirkung des Gurtsystems** beruht auf der „Rückhaltung“ des Insassen, die einen Anprall auf Innenraum-Teile des Fahrzeugs verhindern, den Insassen also zurückhalten soll oder, sofern der Anprall bei höherer Unfallschwere nicht vermieden werden kann, die Anprallgeschwindigkeit reduziert (vgl. Abb. 4.27). Der bei angegurteten Insassen zu beobachtende, prinzipielle Bewegungsablauf ist in Abb. 4.28 dargestellt.



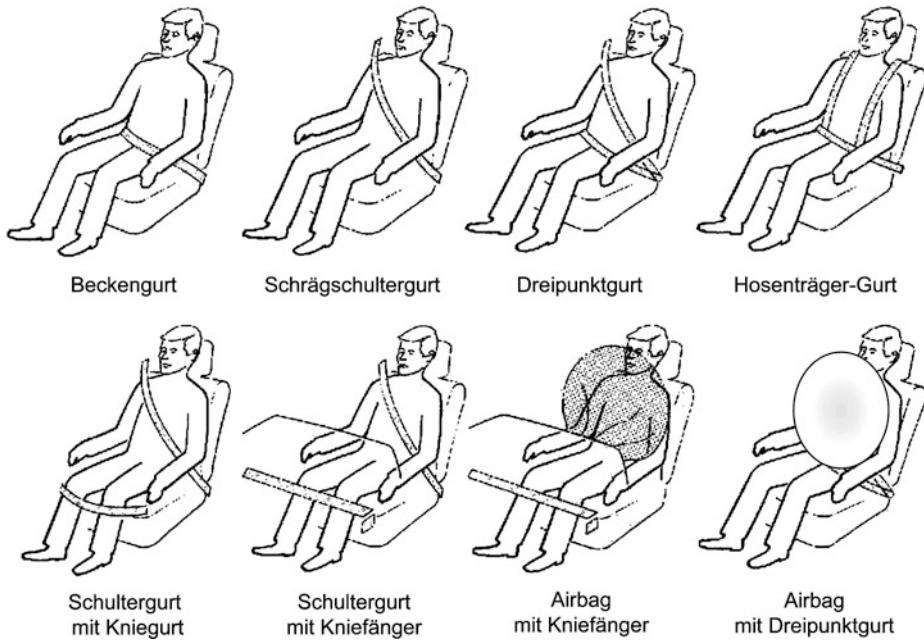
**Abb. 4.27** Schematische Darstellung der Fahrzeug- und der Insassenbeschleunigungen ohne Gurt (a) und mit Gurt (b)



**Abb. 4.28** Prinzipieller Bewegungsablauf des gurtgesicherten Insassen

Bei den Gurtsystemen unterscheidet man je nach der Anordnung unterschiedliche Arten (Abb. 4.29): der Beckengurt, der Schrägschultergurt, der Dreipunktgurt und der (Vier- oder Sechspunkt-) Hosenträgergurt. Daneben sind der Vollständigkeit halber weitere Anwendungen von Rückhalteinrichtungen dargestellt: der Schultergurt in Kombination mit Kniegurt oder Kniefänger und der Airbag mit Kniefänger, der vor allem auf dem nordamerikanischen Markt eingesetzt wird. Der Dreipunktgurt mit Retraktor und Straffer ist in Verbindung mit dem Airbag heute das am meisten verbaute Gurtsystem. Der Einsatz nur des Beckengurts findet seine häufigste Verwendung in Omnibussen und Flugzeugen und wird im PKW nur in Verbindung mit dem Airbag eingesetzt. Beim Einsatz des alleinigen Schultergurts wird zur Rückhaltung des unteren Torsos ein Kniepolster erforderlich.

Gurtsysteme, die durch den Benutzer betätigt werden, bezeichnet man als „aktive“ Gurtsysteme, weil der Insasse die Rückhalteinrichtung (aktiv) betätigen muss. Im Gegensatz dazu sind **passive Gurtsysteme** dadurch charakterisiert, dass sie sich selbsttätig, beispielsweise beim Schließen der Tür, am Insassenkörper anlegen. Diese oftmals kon-



**Abb. 4.29** Unterschiedliche Gurtsystem-Arten (nach [22])



Befestigungspunkt ist in der hinteren Türzarge fixiert

Befestigungspunkt wird nach dem Schließen der Tür elektromotorisch nach hinten verfahren

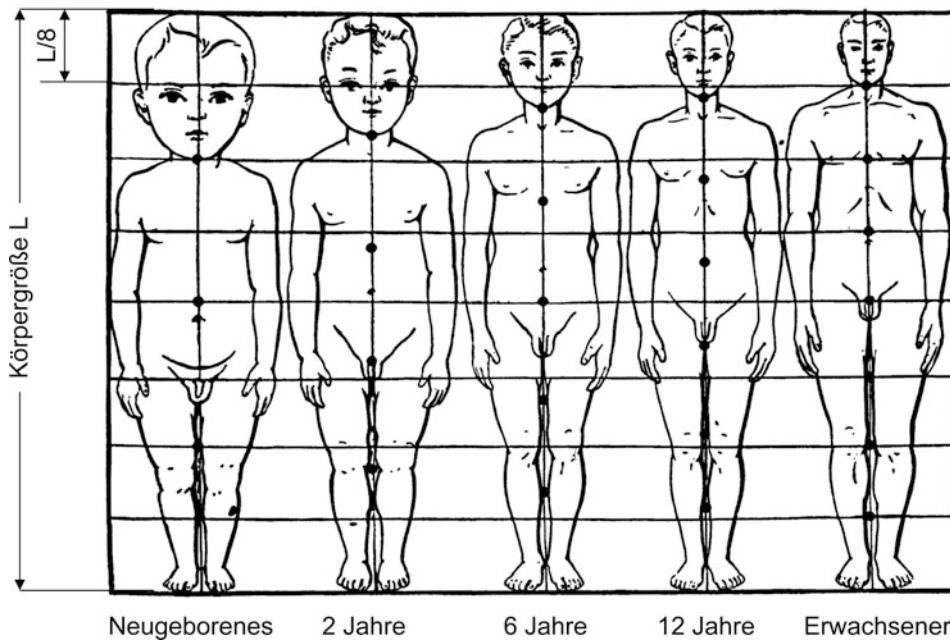
**Abb. 4.30** Passive Gurtsysteme nach Volkswagen (aus [22])

struktiv aufwendigen Lösungen wurden hauptsächlich für den US-amerikanischen Markt konzipiert. In den Abb. 4.30 sind zwei Beispiele derartiger Systeme dargestellt.

Ungesicherte Kinder im Fahrzeug haben bei einem Unfall ein vielfach höheres Verletzungsrisiko als durch **Kinder-Rückhaltesysteme** gesicherte kindliche Insassen. Doch

ist bei der Auslegung derartiger Systeme nicht nur die Rückhaltung, sondern auch die Besonderheit der kindlichen Anatomie, insbesondere von Kleinkindern, zu berücksichtigen. Zum einen weisen Kinder eine geringere Widerstandsfähigkeit auf als Erwachsene, so dass sie nicht in der Lage sind, die gleich hohen Körperteil-Beschleunigungen zu ertragen. Zum anderen ist der Kopf von Kindern in Relation zum gesamten Körpergewicht größer und schwerer als bei Erwachsenen (Abb. 4.31). Des Weiteren lassen sich Kinder-Rückhaltesysteme nicht für einen größere Alters- bzw. Gewichtsbereich konzipieren, da Kinder relativ schnell aus ihren Systemen „herauswachsen“. Daher sind sie nach dem ECE-Reglement 44 in fünf Massenklassen („Gewichtsklassen“) unterteilt:

- Klasse 0 für Kinder mit einer Körpermasse von weniger als 10 kg,
- Klasse 0+ für Kinder mit einer Körpermasse von weniger als 13 kg (entgegen der Fahrtrichtung eingesetzt),
- Klasse I für Kinder mit einer Körpermasse von 9–18 kg,
- Klasse II für Kinder mit einer Körpermasse von 15–25 kg und
- Klasse III für Kinder mit einer Körpermasse von 22–36 kg.



**Abb. 4.31** Veränderung der menschlichen Proportionen in verschiedenen Wachstumsphasen (nach [23])

Nicht unerheblich ist zudem die Sicherstellung einer gewissen Bewegungsfreiheit für das gurtgesicherte Kind, die besonders bei längeren Fahrten notwendig erscheint.

Das in der linken Darstellung der Abb. 4.32 gezeigte Beispiel eines Kinder-Rückhaltesystems ist variabel für Kinder im Alter von acht Monaten bis zwölf Jahren (Massenklassen I bis III nach ECE-R 44) einsetzbar. Der Schaumtisch (Abb. 4.32a) fängt im Falle eines Frontalunfalls den Kopf des Kindes auf, wobei sich der Gesamt-Biegewinkel der Wirbelsäule über einen größeren Bereich erstreckt und der Winkel zwischen den einzelnen Wirbelkörpern in erträglichen Grenzen bleibt. Auf diese Weise können irreversible Schäden der Wirbelsäule verhindert werden. Das als Tisch ausgebildete Schaumpolster lässt sich abmontieren, so dass der Kindersitz für Kinder im Alter von drei bis sieben Jahre verwendet werden kann. Er besteht dann nur noch aus dem Sitzkissen, der Lehne mit ausgeprägten Seitenwangen und dem fahrzeugfesten Gurtsystem (Abb. 4.32b). Schließlich lässt sich bei diesem Kindersitz auch die Sitzlehne entfernen und ist somit verwendbar für Kinder im Alter bis zu zwölf Jahre (Abb. 4.32c). Bei den verwendeten Kinder-Rückhaltesystemen ist darauf zu achten, dass der Dreipunktgurt optimal am Körper anliegt, d. h. der Beckengurt muss tief am Becken angreifen und der Schultergurt diagonal über den Brustkorb verlaufen.



#### Sitzsystem für Kinder für Körpermasse und entsprechendes Alter

9 bis 18 kg (Klasse I)	15 bis 25 kg (Klasse II)	22 bis 36 kg (Klasse III)
8 Monate bis 4 Jahre	3 bis 7 Jahre	4 bis 12 Jahre

**Abb. 4.32** Kinder-Rückhaltesystem der Massenklasse I bis III (ECE-R 44) als „mitwachsender“ Kindersitz (nach BMW)

Die häufig anzutreffenden Sitze mit einem sitzeigenen Hosenträger-Gurtsystem bietet ein hohes Maß an Sicherheit. Allerdings kann durch die straffe Rückhaltung des Thorax eine hohe Belastung der Halswirbelsäule aufgrund einer übermäßig großen Relativbewegung zwischen Kopf und Torso auftreten. Zudem ist das Anlegen des Gurtes aufwendiger und unkomfortabler gegenüber dem fahrzeugfesten Dreipunktgurt.

**Reboard-Rückhaltesysteme**, die auf dem Beifahrersitz oder im Fond entgegen der Fahrtrichtung angebracht sind (Abb. 4.33), bieten einen optimalen Schutz bei Frontalkollisionen; die Körperbelastungen werden hierbei großflächig eingeleitet und gleichmäßig verteilt. Darüber hinaus gibt es keine Körperteile, die aufgrund von Relativbewegungen gegenüber anderen extrem hoch beansprucht werden. Bei Fahrzeugen mit Beifahrer-

**Kindersitze auf Beifahrersitz**



Sitzsystem für Kinder im Alter bis zu 9 Monaten



Sitzsystem für Kinder im Alter von 8 Monaten bis 4 Jahren

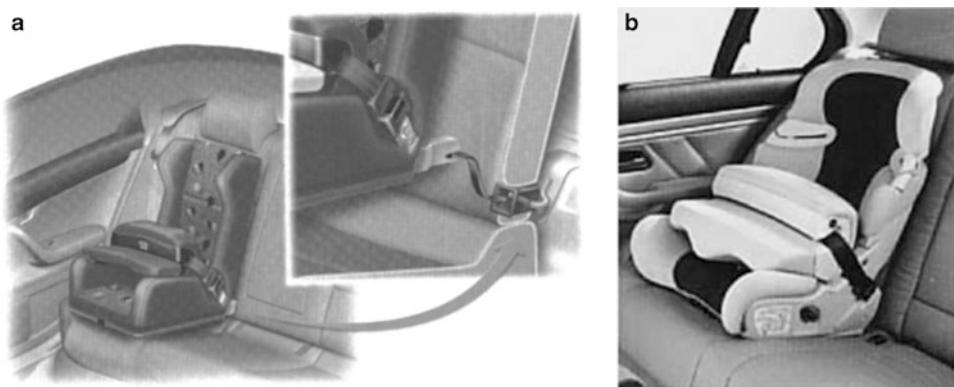
**Kindersitze im Fahrzeug-Fond**



**Abb. 4.33** Reboard-Kinder-Rückhaltesystem der Massenklasse 0+ bis II (ECE-R 44)

Airbag allerdings sind für vorne untergebrachte Kindersitze geeignete Vorkehrungen zu treffen, so dass beim Auslösen des Airbags kein zusätzliches Verletzungsrisiko für das Kind auftritt [24]. Die Verhinderung der Airbag-Auslösung bei Vorhandensein von beifahrerseitigen Reboard-Systemen erfolgt manuell durch Schalterbetätigung oder automatisch mit Hilfe einer Sitzplatz-Erkennungssensorik.

Der wesentliche Nachteil der bisher dargestellten Kinder-Rückhaltesysteme besteht in der oftmals schwierigen Handhabung, die häufig zu Anlegefehlern der teils recht komplizierten Befestigung bei der Benutzung dieser Systeme führt. Dieser Nachteil wird durch die Bereitstellung von genormten Sitzbefestigungen, den so genannten **ISOFIX-Systemen** (Abb. 4.34), oder durch in die Rückbank integrierte Kinder-Rückhaltesysteme weitgehend vermieden. **Integrierte Kindersitzsysteme** sind fest im Rücksitz, und zwar entweder in der Lehne (Abb. 4.35) oder im Sitzkissen, untergebracht. Derartige Klappsitze sind zwar praktisch, weil sie immer verfügbar, platzsparend und meist auch leicht zu bedienen sind, doch können diese Vorteile die Schwächen nicht ausgleichen. So sind die derzeit angebotenen integrierten Kindersitze für Kleinstkinder, einige selbst für Kleinkinder (bis 18 kg oder 4 Jahre alt) nicht zugelassen. Problematisch sind zudem oftmals der nicht optimal angepasste Gurtverlauf und das Fehlen ausreichend großer Seitenwangen. Weitere Nachteile sind darin zu sehen, dass ein Umbau in andere Fahrzeuge nicht möglich und eine Nachrüstung sehr teuer ist. Nicht unerwähnt bleiben soll in diesem Zusammenhang, dass



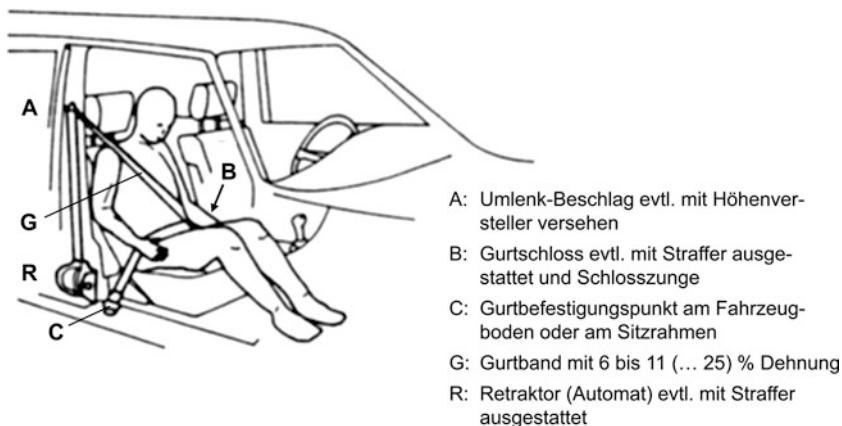
**Abb. 4.34** Prinzip (a) und Realisierung (b) einer Kindersitzbefestigung nach dem ISOFIX-System

**Abb. 4.35** In der Rückbank integrierter Kindersitz



Erwachsene auf der mit integrierten Kindersitzen ausgestatteten Rückbank gelegentlich Komforteinbußen hinnehmen müssen.

Nachdem auf verschiedene Einsatzarten von Gurtsystemen eingegangen wurde, sollen im Folgenden die **Komponenten von Gurtsystemen** behandelt werden. Ausgangspunkt ist dabei der übliche Dreipunkt-Automatik-Gurt, bei dem das Gurtband, vom Befestigungspunkt (Punkt C in Abb. 4.36) am Fahrzeugboden oder heute in der Regel am Sitzgestell ausgehend, über das Becken des Insassen verläuft, in der Öse der Schlosszunge (Punkt B in Abb. 4.36) umgelenkt und von da diagonal über den Insassen-Thorax nach oben geführt wird. Vom drehbar an der A-Säule oder der Sitzlehne verschraubten Umlenkbeschlag (Punkt A in Abb. 4.36) wird das Gurtband nach unten zum **Retraktor** (oder Gurtautomat) geführt. Dabei fällt dem Retraktor (Rückzieher) die Aufgabe zu, im Fahr-

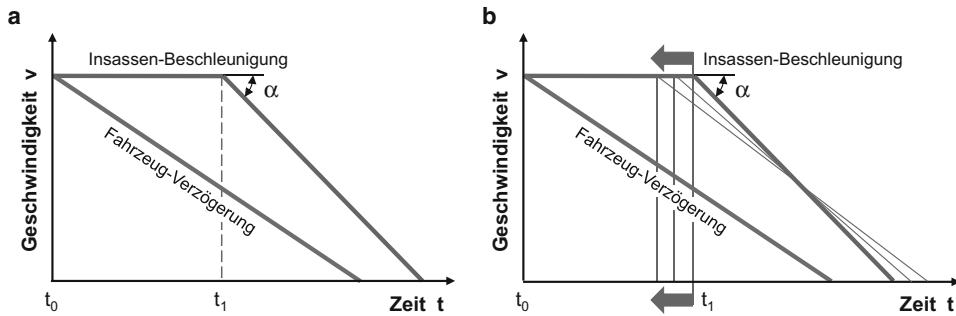


**Abb. 4.36** Schematische Darstellung des Dreipunkt-Automatik-Gurtsystems

betrieb dem Insassen größtmögliche Bewegungsfreiheit zu verschaffen. Das auf einer Spule aufgewickelte Gurtband wird bei einer Vorwärtsbewegung des Insassen gegen eine geringe Federkraft freigegeben und bei einer Rückwärtsbewegung oder beim Lösen des Gutes wieder vollständig aufgespult. Im Falle eines Frontalunfalles hingegen wird die Spule arretiert, und das Gurtband lässt sich nicht weiter von der Spule abwickeln. Die Sperrung der Spule erfolgt mit Hilfe zweier Sensierungsarten: zum einen aktiviert eine bestimmte Fahrzeugverzögerung (aber auch eine Fahrzeugschräglage) und zum anderen eine bestimmte Gurtband-Auszugsgeschwindigkeit den Sperrhebel, der die Wickelpule blockiert. Für die Sensierung dient ein **Kugelsensor**, der aufgrund der Verzögerung (oder Schräglage) aktiviert wird, bzw. ein Massenelement, das beim Erreichen einer bestimmten Fliehkraft radial ausgelenkt wird und die Sperrung der Spule hervorruft.

Unter Belastung wird bei Arretierung der Wickelpule Gurtband freigegeben, da sich die Gurtlagen auf der Spule enger anlegen. Die Folge ist eine größere Vorverlagerung des Insassen. Diesen unbeabsichtigten Gurtband-Auszug nennt man „Filmspulen-Effekt“. Er wurde in der Vergangenheit weitgehend unterbunden durch die Einführung eines Gurtklemmers, bei dem eine Verzahnung durch ein Kippmoment oder durch Auflaufen auf eine schiefe Ebene das Gurtband festklemmt und ein weiteres Ausziehen verhindert.

Mit Hilfe des Gurtklemmers wurde lediglich der Gurtbandauszug, als ein Teil der Gurtlose, begrenzt. Da sich die Gurtlose aber zusammensetzt aus dem Filmspulen-Effekt, der Bekleidungsnachgiebigkeit und dem systembedingten Spiel sowie der Gurtband-Dehnung, ist zur Eliminierung dieser Lose ein **Gurtstraffer** (oder -strammer) erforderlich. Durch den Einsatz des Gurtstraffers wird jedoch nicht nur eine Verkürzung des Gurtbandes erreicht, sondern er erlaubt außerdem eine zeitliche Vorverlagerung der Aktivierung der Gurtwirkung (Abb. 4.37). Bei gleicher Insassen-Vorverlagerung, aber zeitlich früherer Rückhaltung wird die am Insassen wirksame Beschleunigung geringer.



$\alpha$ : Insassen-Beschleunigung,  $t_0$ : Crash-Beginn, Fahrzeug prallt gegen Hindernis  
 $t_1$ : Insasse wird durch Gurtsystem verzögert

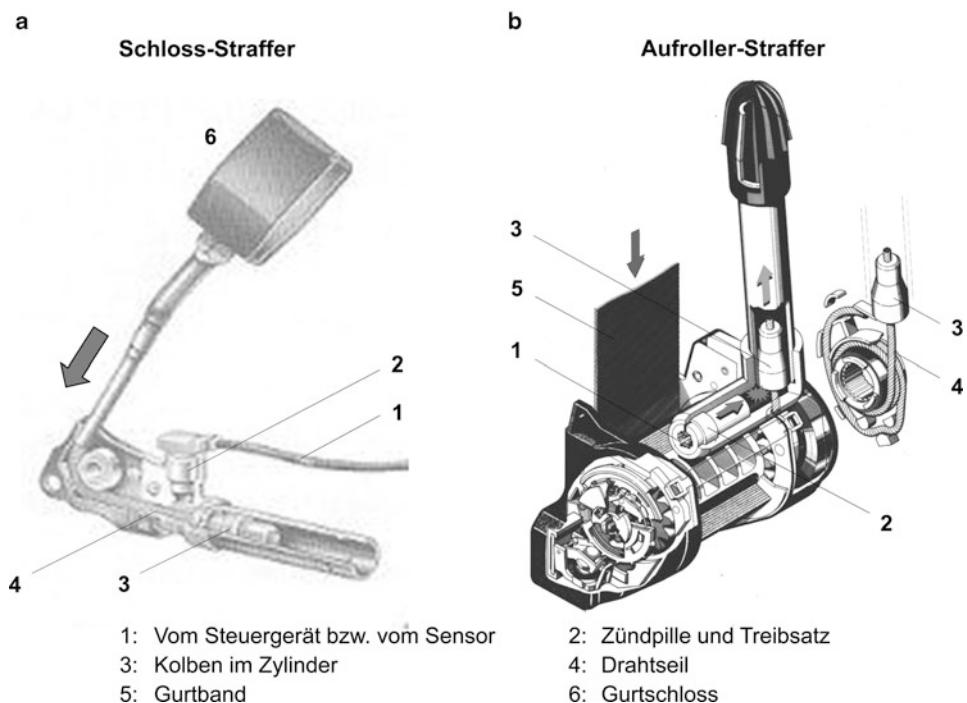
**Abb. 4.37** Schematische Darstellung der Insassenbeschleunigung ohne (a) und mit Gurtstraffer (b)

Gurtstraffer lassen sich nach folgenden Unterscheidungsmerkmalen einordnen:

- nach der örtlichen Unterbringung des Gurtstraffers,
- nach der Speicherung der Straff-Energie und
- nach der Sensorik, d. h. der Auslösung des Straffers.

Beim Einsatz des Gurtstraffers ist die Örtlichkeit des Straffers von großer Bedeutung. Während der **Schloss-Straffer** (Abb. 4.38a) gleichzeitig das Gurtband am Schulter- und am Beckengurt verkürzt, bewirkt der **Aufroller-Straffer** (Abb. 4.38b) zunächst eine Verkürzung der Schulter-Gurtbandes, das durch den Umlenkbeschlag und durch die Umlenköse an der Schloss-Zunge (Reibungskräfte) gezogen werden muss, um dann zeitlich verzögert die Gurtlose im Beckengurt zu eliminieren. Der Aufroller-Straffer setzt also, gleiche Gurtlose vorausgesetzt, gegenüber dem Schloss-Straffer ungefähr den doppelten Straff-Weg um und benötigt dafür dementsprechend längere Zeit. Der Straff-Vorgang setzt in jedem Fall ein, bevor sich der Insasse nach vorne verlagert hat.

Die zum Straffen des Gurtbandes erforderliche Energiespeicherung erfolgte in der Vergangenheit mechanisch durch eine vorgespannte Feder, heute aber durchweg pyrotechnisch durch eine zündbare Treibladung. Weniger gebräuchlich dagegen ist die Nutzung der unfallbedingten Fahrzeugverformung, bei der die Gurtstraffung hydraulisch oder mechanisch durch Stahlseile (procon-ten-System von Audi) erfolgt. Bei der letztgenannten Straffer-Lösung, dem „ten-(Tension-)System“, bewirkte nämlich die Relativbewegung zwischen Motor und Karosserie eine Vorspannung des Gurtbandes über Stahlseile, die parallel zum „procon-System“, dem Teilsystem zur Vorverlagerung des Lenkrades, angeordnet waren. Eine ungewollte Auslösung des Systems war hierbei ausgeschlossen, da nur die Energie eines Unfalls das System aktiviert. Die Straffung der vorderen Sicherheitsgurte erfolgte durch die Verbindung der Gurtwickelpule mit dem Seilantrieb. Dabei umschlang das freie



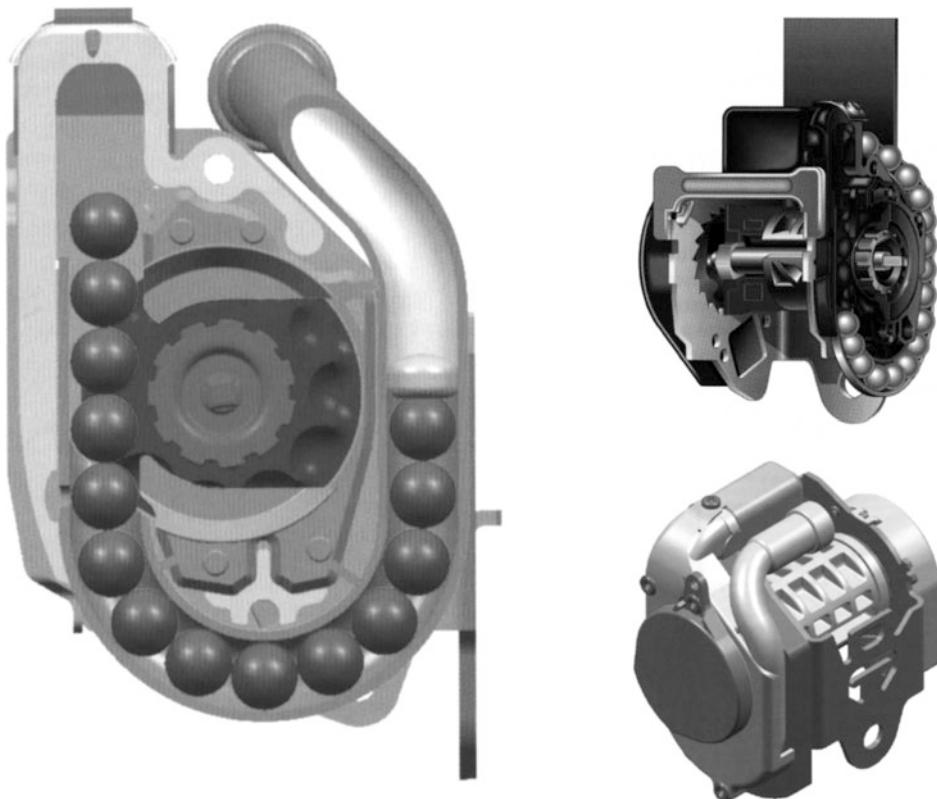
**Abb. 4.38** Verwendung des Gurtstraffers am Gurtschloss (a) und am Aufroller (b)

Seilende eine auf der Wickelachse angeordnete Seilrolle, die im Wirkfalle eine kraftschlüssige Verbindung einging. Die maximale Straff-Wirkung wurde durch einen definierten Straff-Weg und eine Straff-Kraft begrenzt. Dadurch wurden zu hohe Belastungen und damit Verletzungen des Insassen ausgeschlossen. Das procon-ten-System wurde von Audi serienmäßig verbaut, dann aber durch die Einführung der Fahrer- und Beifahrer-Airbags abgelöst.

Grundsätzlich lassen sich mechanische und pyrotechnische Gurtstraffer sowohl mechanisch als auch elektronisch aktivieren. Mit Hilfe der Sensorik wird eine bestimmte Unfallschwere erkannt und der Straff-Vorgang ausgelöst. Heute sind, insbesondere seit Einführung der Sensor-Einheit für Airbags, üblicherweise elektromechanische oder elektronische Sensoren im Einsatz (vgl. Kap. 5). Dabei wird das Signal eines Beschleunigungsaufnehmers mit einer Soll-Vorgabe verglichen und liefert im Falle einer Frontalkollision die zur Zündung der Treibladung erforderliche Stromstärke.

Beim pyrotechnischen Gurtstraffer wird im Falle einer Frontalkollision eine Treibladung (Nitrozellulose NC) durch die Sensorik in der Regel elektrisch aktiviert. Die bei der explosionsartigen Verbrennung der Treibladung freiwerdende Gasladung wirkt auf einen Kolben, der über ein Stahlseil mit dem Gurtschloss (beim Schloss-Straffer) oder mit der Gurtspule des Gurtautomaten (beim Aufroller-Straffer) verbunden ist und das Gurtband verkürzt (Abb. 4.38). Das Gurtband wird bereits vor Beginn der Insassen-Vorverlagerung gestrafft.

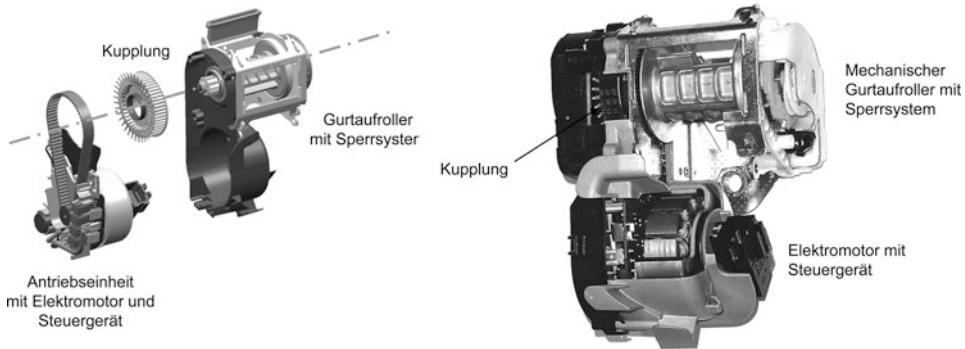
Beim Rotations- oder Kugelstraffer im Aufroller übertragen die in einem gebogenen Rohr befindlichen Kugeln den Gasdruck der Treibladung auf das Ritzel, das mit der Spule fest verbunden ist [25]. Das Prinzip ist in Abb. 4.39 dargestellt.



**Abb. 4.39** Wirkprinzip des Rotations- oder Kugelstraffers (aus [25])

Ein relativ neues Gurtstraffungssystem ist in dem von TRW Automotive entwickelten Gurtstraffer ACR (Active Control Retractor) zu sehen. Die Innovation dieses weltweit ersten **reversiblen Sicherheitsgurtsystems** besteht darin, dass erstmals Informationen aus der vorkollisionären Phase genutzt werden, um die Gurtstraffung bereits vor dem Eintreten der Kollision präventiv zu aktivieren. In zwei Dritteln aller Fälle kommt es nämlich in der PreCrash-Phase, d. h. in der Phase zwischen normalem Fahrbetrieb und dem Unfallereignis, zu kritischen Situationen wie Schleuderbewegungen, Ausweichmanövern oder Notbremsungen. Diese Phase kann mehrere Sekunden andauern und wird zur Einleitung von Schutzmaßnahmen genutzt. Kriterien zur Einleitung sind dabei Signale der aktiven Sicherheitskomponenten wie ABS, Bremsassistent, Fahrstabilitätsprogramm; die Detektierung weiterer Kriterien des Fahrverhaltens ist möglich. Durch die erzielbare enge Kopplung zwischen Insassen und dem Sitz wird eine sichere Stabilisierung der Insassen erreicht, wo-

durch deren Position hinsichtlich OoP-Situationen deutlich verbessert wird. Im normalen Fahrbetrieb erfüllt das reversible Gurtsystem die Funktion eines Standard-Gurtaufrollers. Erst in einer kritischen Fahrsituation erkennt eine ausgeklügelte Steuerelektronik innerhalb von Millisekunden eine Gefahrensituation und aktiviert den Elektromotor dieses Gurtsystems.

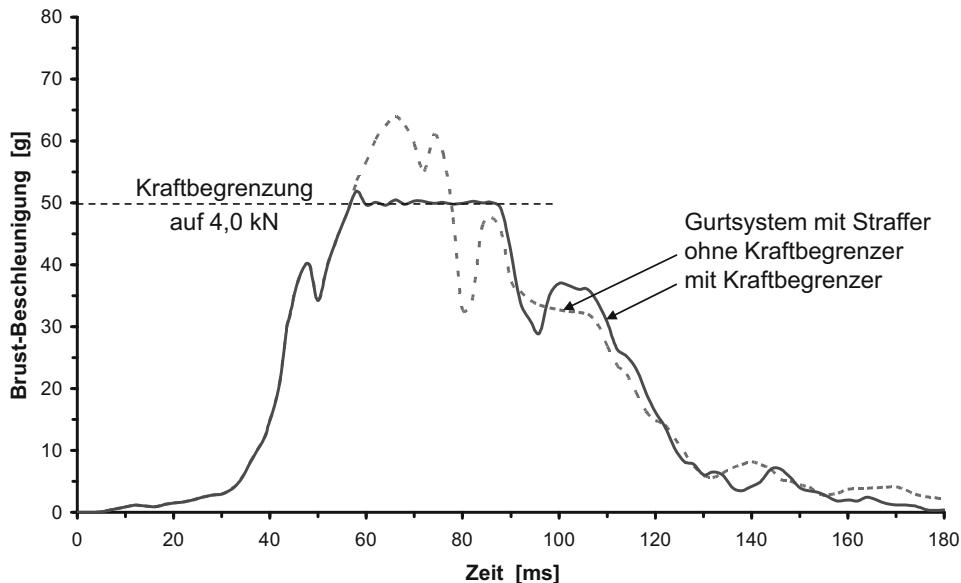


**Abb. 4.40** Aufbau des reversiblen Gurtsystems ACR und Schnittmodell (nach [17])

Das komplette ACR-Modul besteht aus einem mechanischen Gurtaufroller mit Sperrsystem, der Antriebseinheit mit bürstenlosem Elektromotor, einem integrierten Steuergeät und der Kupplung, die im normalen Fahrbetrieb den Motor vom mechanischen Gurtaufroller trennt und bei Auslösung die Kraftübertragung herstellt. Alle Komponenten sind im ACR-Modul untergebracht (Abb. 4.40). Der aktivierte Motor strafft das Gurtband mit einer Kraft von bis zu 250 N und bringt so den Insassen in eine sicherheitstechnisch günstige, vorgestraffte Position. Bereits vor einem möglichen Unfall wird damit eine Vorkonditionierung des Rückhaltesystems erreicht, und die Insassen werden in eine optimale Sitzposition gebracht. Gleichzeitig erhält der Fahrer durch die Gurtstraffung eine Rückmeldung über den akuten Fahrzustand und kann gegebenenfalls eingreifen. Das System bleibt während der gesamten Gefahrensituation aktiv und stabilisiert die Sitzposition der Insassen in dieser Phase. Für diesen Vorgang benötigt das System in der Regel nur etwa 120 ms. Kommt es zu einer Kollision oder einem Fahrzeugüberschlag, wird zusätzlich der pyrotechnische Gurtstraffer aktiviert und Sicherheitsgurte sowie Airbags können ihre optimale Wirkung entfalten. Das Verletzungsrisiko durch Gurtlose oder eine OoP-Situation wird so deutlich verringert. Kann der Fahrer einen Unfall verhindern, löst das ACR-System die Gurtverriegelung und ist sofort wieder einsatzbereit [17]. Pyrotechnische Gurtstraffer dagegen haben nur eine begrenzte Zuglänge und müssen nach dem Auslösen ausgewechselt werden.

Zur Vermeidung von Belastungsspitzen kommen in zunehmendem Maße **Gurtkraftbegrenzer** als belastungsreduzierende Komponenten von Gurtsystemen zum Einsatz. Bei Erreichen einer bestimmten Gurtbandkraft – als tolerabel können Kräfte von 4,0 bis 4,5 kN angesehen werden – wird durch Torsionsstäbe im Aufroller, Reißnähte am Gurt-

band, Deformations- oder Reibungselemente u. a. geeignete Energiewandlungsprinzipien Gurtband freigegeben, so dass die Energieaufnahme bei gleich bleibender Kraft mittels zunehmender Vorverlagerung des Insassen erfolgt (Abb. 4.41).



**Abb. 4.41** Einfluss des Gurtkraftbegrenzers auf die Dummy-Brustbeschleunigung ( $v = 56,2 \text{ km/h}$ )

Die Möglichkeiten der Kraftbegrenzung am Gurtsystem sind vielfältig; grundsätzlich lassen sich Kraftbegrenzer-Elemente an den Gurtbefestigungspunkten (am Schloss und am Aufroller), am Umlenkbeschlag (bzw. am Höhenversteller) und innerhalb des Gurtsystems (Aufroller, Gurtband) unterbringen, wobei die Örtlichkeit vorwiegend die Körperregion bestimmt, die eine größere Vorverlagerung erfährt bzw. an der ein geringeres Kraftniveau und damit eine niedrigere Beschleunigung wirksam wird. Die Positionen und denkbaren Prinzipien sowie das zu erwartende Kraftniveau und die zugehörende Gurtband-Auszugslänge sind in Tab. 4.1 dargestellt.

In jüngerer Zeit werden verstärkt Anstrengungen unternommen, zur Realisierung so genannter „Smart Restraint Systems“ die Kraftbegrenzung in Abhängigkeit vom Gewicht des Insassen, insbesondere in Verbindung mit Airbags, wirken zu lassen. Dabei wird das Insassen-Gewicht (bzw. die -Größe) indirekt, beispielsweise über die Sitz- und die Lehneneinstellung, mit Hilfe von Sensoren erfasst. Das Ziel einer derartigen Auslegung besteht darin, die Insassenbelastung bei leichteren und bei schwereren Insassen an die in der Regel niedrigeren Werte des durchschnittlichen Insassen anzupassen. So werden im Vergleich zum durchschnittlich schweren Insassen aufgrund des bisher konstanten Begrenzer-Kraftniveaus bei leichteren Insassen erheblich höhere Beschleunigungen gemessen; die Begrenzerkraft könnte also geringer sein. Der schwere Insasse nimmt einen

**Tab. 4.1** Prinzipien zur Kraftbegrenzung an Gurtsystemen

Position	Komponente	Prinzip	Kraft	Weg
			[kN]	[mm]
Aufroller, intern	Aufroller	Drehstab	3,5 ... 5,0	100
	Gurtklemme	Deformationselement zwischen Aufroller und Klemmer	< 9,0	< 50
	Aufrollerstraffer	Drehstab	3,5 ... 5,0	300
Aufroller, extern	Aufroller	Deformationselement	3,6 ... 8,0	< 350
	Gurtklemmer	Deformationselement	3,5 ... 9,0	< 350
	Aufrollerstraffer	Deformationselement	3,5 ... 8,0	< 350
Gurtband	Gurtband	hohe Dehnung (25 %)	< 11,0	< 250
	Gurtband	Material mit nieder-dehnigen Zusatzfäden (Aramid)	< 10,0	< 200
Schloss, intern	Schloss	Deformationselement	8,0 ... 16,0	< 150
	Schlossstraffer	Deformationselement	8,0 ... 16,0	< 120
Schloss, extern	Schloss	Reißnaht	2,0 ... 5,0	< 150
	Schloss	Deformationselement	3,0 ... 16,0	< 150
	Schlossstraffer	Deformationselement	6,0 ... 16,0	< 150
	Schlossstraffer	Deformationselement	6,0 ... 16,0	< 80
Befestigungspunkt	Gehäuse, intern	Drehstab	2,0 ... 5,0	< 150
	Gurtband	Reißnaht	1,0 ... 3,0	< 300
	Befest. element	Deformationselement	1,0 ... 10,0	< 300
Höhenversteller	intern	Deformationselement	~ 20,0	< 60
	extern	Deformationselement	~ 20,0	< 60

größeren Vorverlagerungsweg in Anspruch, so dass sich ein Kontakt mit dem Lenkrad oder dem Armaturenbrett oftmals nicht vermeiden lässt; hier muss demnach die Begrenzerkraft höher angesetzt werden.

Das Öffnen des Gurtsystems erfolgt durch die Trennung zwischen der **Schlosszunge** und dem **Gurtschloss**. In der Öse der Schlosszunge läuft das Gurtband zwischen Schulter- und Beckengurt in der Regel lediglich durch die Reibung behindert hindurch. In weniger häufigen Fällen wird das Gurtband aus Komfortgründen oder bei Kindersicherungen eingeklemmt und nur beim Unfall entsperrt. Bei angelegtem Gurt ragt die Schlosszunge in das Gurtschloss und wird dort verriegelt. Neben vielen anderen Prinzipien ist heutzutage das Rastnocken-Schloss das am meisten verbreitete. Während die Ver- und Entriegelungsmechanik sowie das Gehäuse aus einem schlagfesten Kunststoff bestehen, sind die tragenden Bauteile (Zunge, Rastnicken und Schlossplatte) aus Stahl gefertigt. Die Schlossbefestigung erfolgt am Fahrzeugboden oder (heute gebräuchlich) am Sitzrahmen mittels Gurtband, Beschlag oder Stahlseil.

Zur Anpassung an unterschiedlich große Insassen wird der Umlenkbeschlag, durch den das Gurtband von der Schulter kommend zum Retraktor umgelenkt wird, mit Hilfe des **Höhenverstellers** reguliert (Abb. 4.42b). Der Grund für diese Anpassungsmöglichkeit ist in der Vermeidung von Gefäßverletzungen am Hals zu sehen. In Abb. 4.42a ist der Verlauf des Schultergurts beim 95 %- und beim 5 %-Dummy dargestellt. Der Höhenversteller wird

in den meisten Fällen an der B-Säule befestigt; bei sitzintegrierten Gurtsystemen befindet er sich am Sitzlehnens-Rahmen. Die Höhenverstellung kann manuell, kombiniert mit der Sitzlängsverstellung oder beim sitzintegrierten Gurtsystem in Verbindung mit der Höhenverstellung der Kopfstütze erfolgen. Derzeit werden Überlegungen dahingehend angestellt, auf den Gurthöhenversteller aufgrund seiner geringen Wirksamkeit bei den insgesamt selten auftretenden Halsverletzungen bei neuen PKW zu verzichten.



**Abb. 4.42** Verlauf des Schultergurts beim 95 %- und 5 %-Dummy (a) und Verstellung des oberen Gurt-Umlenkbeschlages (b) (aus [22])

Das **Gurtband** besteht aus unelastisch dehnbarem Material, einem speziellen Gewebe aus synthetischen Fasern (Polyamid bzw. Polyester), und ist 47 mm breit. Seine Länge beträgt je nach Ausführung des Gurtsystems zwischen 1,5 und 2,3 m; es reicht vom Befestigungspunkt am Sitzrahmen, gelegentlich auch am Fahrzeugboden, über die Öse der Schlosszungen zum Umlenkbeschlag und endet im Retraktor, in dem es auf der Gurtwelle mittels eines Sicherungsstiftes befestigt ist. Die Dehnung des Gurtbandmaterials beträgt bei einer Nennlast von 11,0 kN zwischen 6,0 und 11,0 %, in Sonderfällen bis zu 25 %.

Zahlreiche Untersuchungen zur Gurtband-Breite wurden mit dem Ziel verfolgt, die Flächenpressung durch breiteres Gurtband zu reduzieren. Doch die simple Verbreiterung des Gurtbandes führte nicht zur Verbesserung, da es sich an den Rändern aufrollte, sodass die

tragfähige Breite des Gurtbandes weitgehend konstant blieb. Bei neueren Untersuchungen wird ein **Gurt-Bag** eingesetzt, mit dessen Hilfe sich die wirksame Anlage-Breite nahezu verdoppeln lässt und mit der Verringerung der Flächenpressung auch das Verletzungsrisiko reduziert. Der Gurt-Bag ist eine Kombination aus Sicherheitsgurt und Airbag, siehe Abb. 4.43. Wird mit Hilfe der Crash-Sensoren ein schwerer Unfall erkannt, wird der Gurt-Bag ausgelöst. Der am Endbeschlag des Gurtes positionierte Generator bläst das „zweilagige, mit Reißnähten ausgestattete Gurtband auf“ [26]. Vorgesehen ist der Einsatz des Gurt-Bags ausschließlich als Sicherheitssystem für Fondpassagiere, da vorne grundsätzlich bereits Airbags als zusätzliches Insassenschutz-System zur Verfügung stehen.



Quelle: Bildgalerie zum ESF2009. blog.mercedes-benz-passion.com

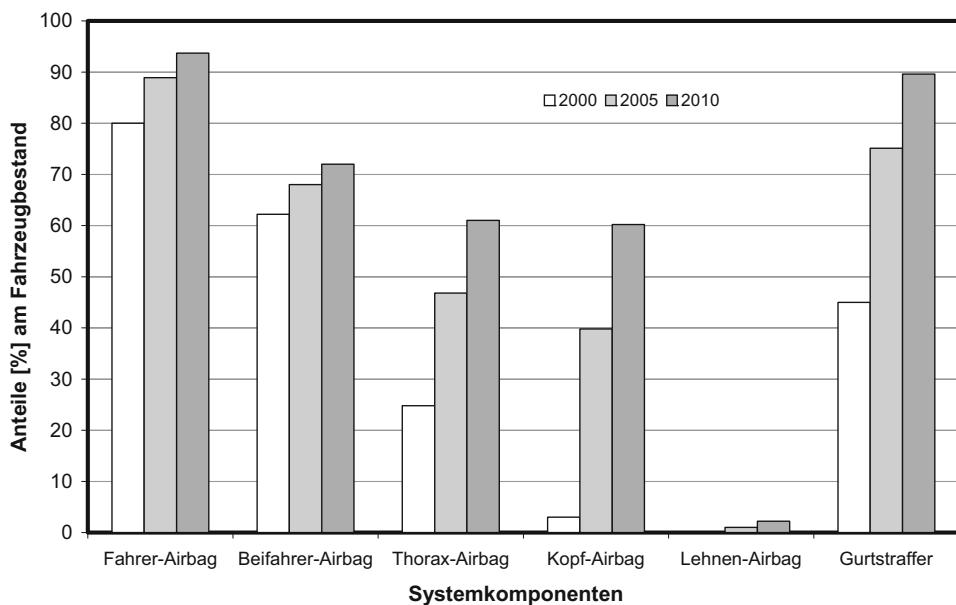
**Abb. 4.43** Gurt-Bag zur Vergrößerung der wirksamen Gurtband-Breite im ESF 2009 von Mercedes-Benz (aus [26])

### 4.3.3 Airbag-Systeme und -Komponenten

Der Einsatz von Airbag-Systemen als Sicherheitsmaßnahme in Kraftfahrzeugen ist eine relativ neue Entwicklung. Die ersten Ideen, ein sich automatisch aufblasbares „Luftkissen“ als Anprallschutz für PKW-Insassen einzusetzen, wurden bereits in den 1960er Jahren diskutiert, etwa zehn Jahre nach Erteilung entsprechender Patente (1952 von John Hetrick, USA, und 1953 von Walter Lindner, D). Als besonders problematisch galten damals die erforderliche kurze Aufblaszeit des Luftsacks, das hohe Gewicht und das große Bauvolumen

aufgrund der verwendeten Hochdruck-Gasflaschen, vor allem aber die unzureichende Zuverlässigkeit.

Der Durchbruch gelang erst Anfang der 1970er Jahre durch den Transfer des Prinzips eines Feststoff-Gasgenerators aus dem Militärbereich [27]. Daran schlossen sich noch viele Entwicklungsanstrengungen an, bis schließlich Mercedes-Benz im Jahr 1980, zunächst nur für die Fahrzeuge der Oberklasse, den Airbag als Sonderausstattung gegen Aufpreis anbot. Heute werden weitgehend alle Neu-Fahrzeuge (nach [28] waren dies bereits 2001 etwa 93 bzw. 96 %) serienmäßig mit Fahrer- und Beifahrer-Airbags ausgestattet (Abb. 4.44), so dass für das Jahr 2015 für alle am Markt befindlichen PKW eine vollständige Ausstattung mit Front-Airbags prognostiziert werden kann [28]. Der weltweite Einsatz des Airbag-Systems verlief allerdings nicht im Gleichklang, da es auf dem US-amerikanischen Markt als alleiniges Rückhaltesystem (so genanntes „passives“ System) vorgeschrieben war, in Europa hingegen als zusätzliche Sicherheitseinrichtung (SRS: Supplemental Restraint System, engl. für ergänzendes Rückhaltesystem) zum Gurtsystem entwickelt und eingesetzt wurde. Diese unterschiedliche Entwicklung zeigte Auswirkungen auf die Größe des Airbags und auf die Speicherkapazität des Generators. Mittlerweile ist aufgrund neuerer Erkenntnisse, der in den USA zunehmend vorgeschriebenen Gurtanlege-Pflicht und der verbraucherorientierten Vergleichstests (NCAP) eine gewisse Konvergenz festzustellen.



**Abb. 4.44** Ausstattung von Neufahrzeugen mit Airbags im Jahr 2001 (nach [28])

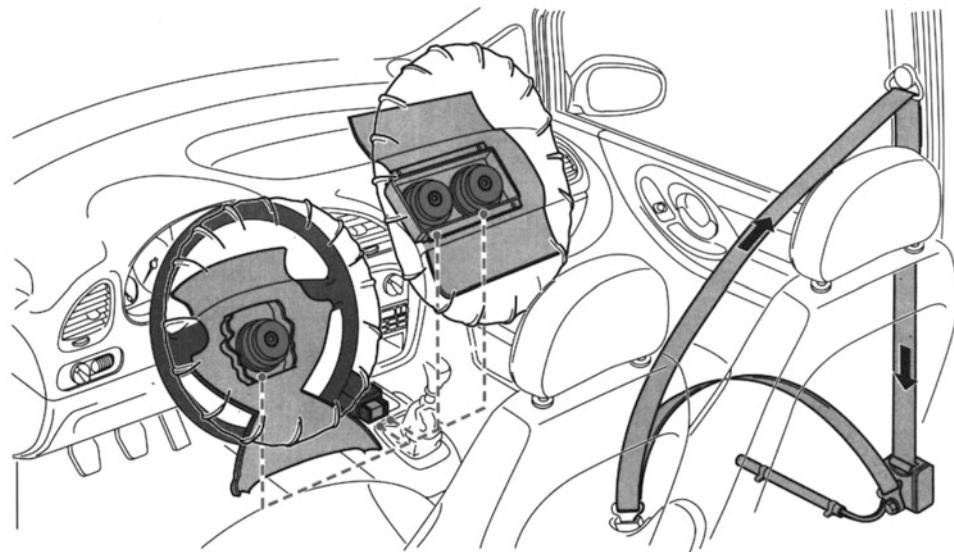
Seit 1970 ist die Zahl der Getöteten und der schwer Verletzten im Straßenverkehr kontinuierlich zurückgegangen; gemessen am Index für passive Sicherheit (vgl. Abb. 1.4) erhöhte sich die Sicherheit um mehr als das Vierfache, von 73,4 auf ca. 303,7 Unfälle je Mio. €

Verletzungsfolgekosten. Im gleichen Zeitraum entwickelte sich der Sicherheitsgurt zum seriennässigen Standard und stellt mittlerweile eine undisutierte Selbstverständlichkeit dar. Heute bilden Dreipunkt-Automatikgurt, Gurtstraffer und Airbag ein sorgfältig aufeinander **abgestimmtes Insassenschutz-System**. Seine Aufgabe besteht darin, das Verletzungsrisiko der Fahrzeuginsassen bei unterschiedlichen Aufprallarten und -typen zu minimieren. Je nach Aufprallrichtung und dabei auftretender Fahrzeugverzögerung entfaltet der Airbag seine Schutzwirkung. Er baut mit Hilfe des aus dem Luftsack entströmenden Gases die Bewegungsenergie des nach vorn geschleuderten Insassen und damit dessen Relativgeschwindigkeit zum Innenraum ab und verhindert so, in Kombination mit dem Gurtsystem, einen Anprall des Kopfes und der Brust gegen das Lenkrad, die Instrumententafel oder die Windschutzscheibe.

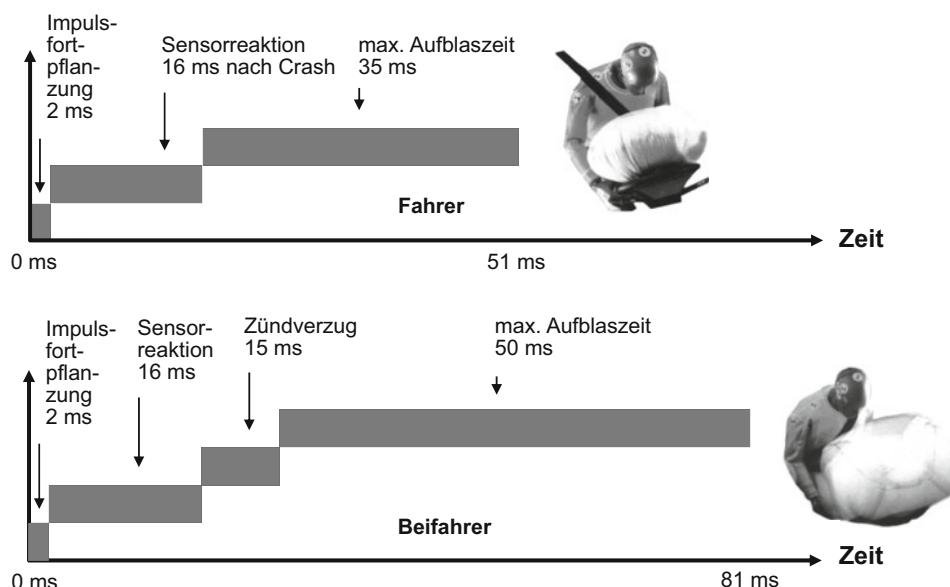
Die **Wirkungsweise** von Airbag-Systemen ist gekennzeichnet durch das Zusammenspiel der Sensorik, der Auslöseelektronik, des Gasgenerators und des Luftsacks. Ein oder mehrere Sensoren detektieren Beschleunigungen, die von Verzögerungen und Stößen im normalen Fahrbetrieb, bei Reparaturen, Parkrempeln, extremen Fahrmanövern und Unfällen herrühren, und geben diese Signale an das Steuergerät zur Diagnose weiter. Hier werden die Daten mit gespeicherten, fahrzeugspezifischen Werten verglichen. Beim Erkennen eines insassengefährdenden Unfalls – bei **Frontalkollisionen** liegt die Geschwindigkeitsdifferenz etwa zwischen 18 und 26 km/h – erfolgt die Aktivierung des Gasgenerators. Dazu sendet die Auslöseelektronik einen Zündimpuls an die Anzünder in den Generatoren der Airbags und, soweit vorhanden, an die Generatoren der Gurtstraffer (Abb. 4.45). Der Gasgenerator enthält einen pyrotechnischen Treibsatz, der durch den Anzünder entflammt wird und extrem schnell abbrennt. Dabei wird ein Gas freigesetzt, mit dem der zusammengefaltete Luftsack gefüllt wird, und der Airbag entfaltet sich. Die Entfaltungszeit ist abhängig von Funktion und Größe des Airbags. Sie beträgt typischerweise auf der Fahrerseite 30 bis 40 ms und auf der Beifahrerseite 40 bis 60 ms. Zu diesem Zeitpunkt steht ein mit 50 km/h frontal kollidierendes Fahrzeug bereits, während sich alle beweglichen Objekte im Fahrzeug aufgrund ihrer Trägheit weiterhin nach vorne bewegen.

In Abb. 4.46 ist beispielhaft der zeitliche Ablauf der Airbag-Auslösung für die Fahrer- und die Beifahrer-Seite dargestellt. Durch die Wirkung des Gurtsystems wird der untere Bereich des Insassen zurückgehalten und der Oberkörper taucht in das Luftpolster ein. Die genau berechneten Abströmöffnungen oder das speziell entwickelte, luftdurchlässige Stoffgewebe des Luftsacks bewirken einen Energieabbau der Insassenbewegung und vermeiden, dass der auf das Gaspolster treffende Körper in die Sitzlehne zurückgeschleudert wird. Ungefähr 120 ms nach dem Aufprall ist die Relativgeschwindigkeit der Fahrzeuginsassen zur Karosserie abgebaut, und die Luftsäcke fallen in sich zusammen.

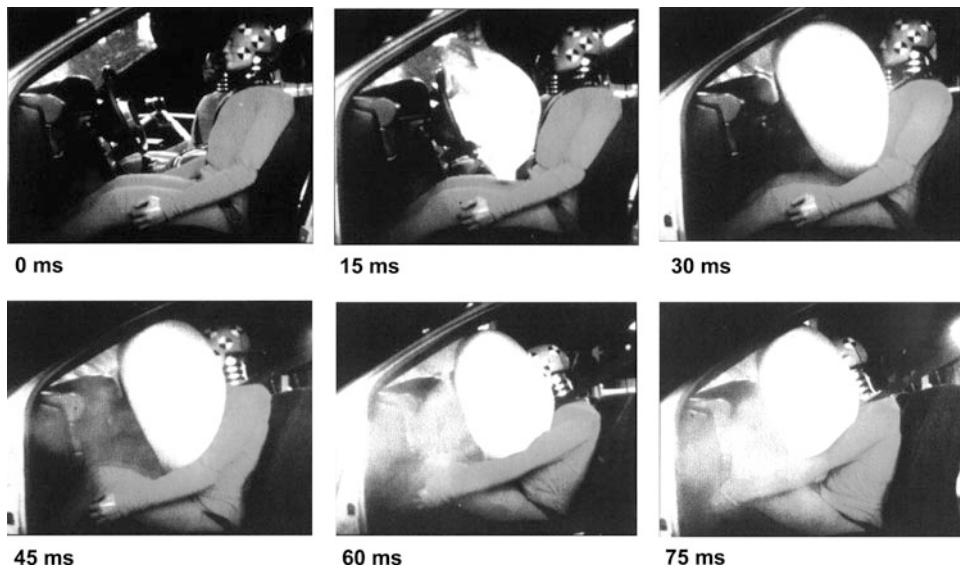
Der Insassen-Bewegungsablauf bei einem 55 km/h-Barrieretest ist in den Abb. 4.47 für den Fahrer und 4.48 für den Beifahrer gezeigt. Diese vereinfachte Darstellung des Funktionsablaufes gilt vom Grundsatz her für jeden Airbag, jede Luftsackgröße und jede Anwendungsmöglichkeit. Unterschiede ergeben sich – etwa beim Seiten-Airbag – vor allem in der Sensorik, der Baugröße der einzelnen Komponenten oder auch in einer gezielt aufeinander abgestimmten Zündverzögerung beim Zusammenwirken mehrerer Airbags.



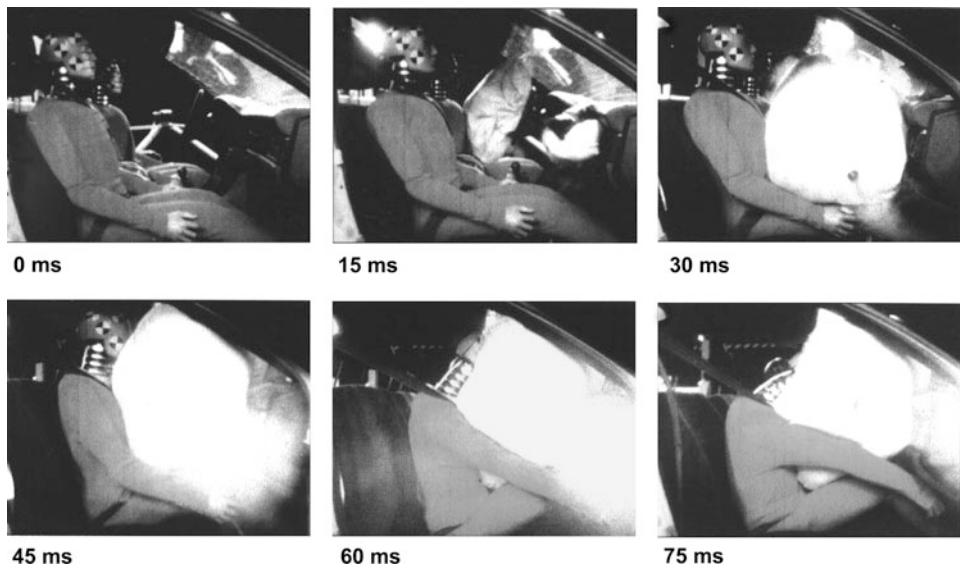
**Abb. 4.45** Anordnung des Fahrer- und des Beifahrer-Airbags sowie des Gurtsystems mit Straffer, ausgelöst durch ein Steuergerät auf dem Mitteltunnel



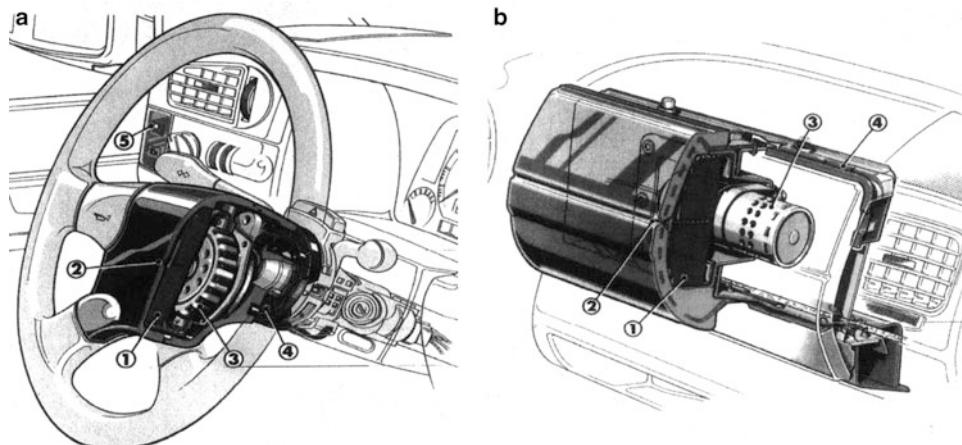
**Abb. 4.46** Zeitlicher Ablauf der Airbag-Auslösung für Fahrer und Beifahrer (nach [27])



**Abb. 4.47** Insassen-Bewegungsablauf bei einem 55 km/h-Barrieretest (Fahrer)



**Abb. 4.48** Insassen-Bewegungsablauf bei einem 55 km/h-Barrieretest (Beifahrer)

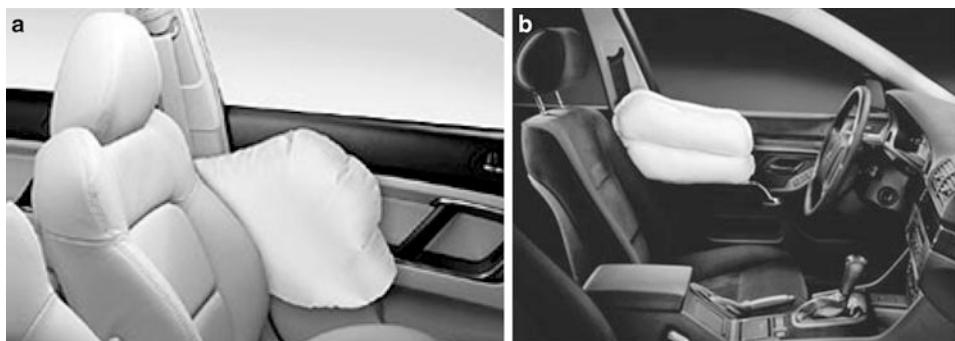


- 1: Gefalteter Luftsack, fahrerseitig
- 2: Abdeckung mit Reißnaht
- 3: Plattenförmiger Gasgenerator
- 4: Kontakt-Einheit
- 5: Kontrollleuchte

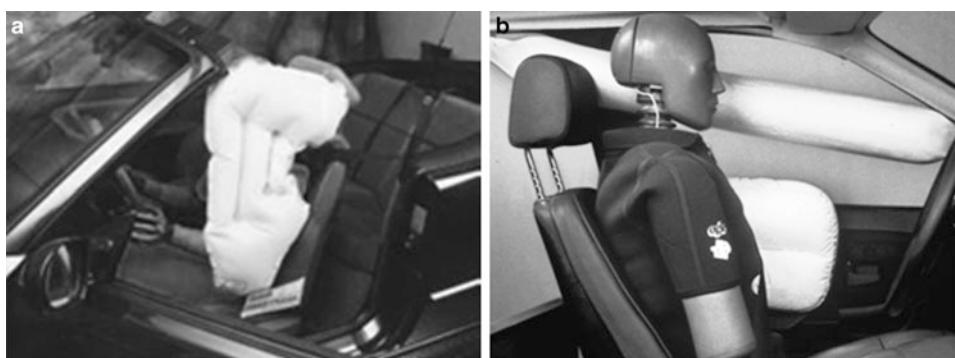
- 1: Gefalteter Luftsack, beifahrerseitig
- 2: Abdeckung mit Reißnaht
- 3: Röhrenförmiger Gasgenerator
- 4: Gehäuse

**Abb. 4.49** Anordnung der Airbag-Module auf Fahrer- und Beifahrer-Seite

Entsprechend der Sitzbelegung in PKW wurden zunächst ins Lenkrad integrierte **Fahrer-Airbags** und über dem Handschuhfach verstaute **Beifahrer-Airbags** entwickelt (Abb. 4.49). Aufgrund der unterschiedlichen Gesetzeslage in den USA und auf dem europäischen Markt wiesen die US-Airbags ein erheblich größeres Volumen auf: Fahrer-Airbag: 65–80 l, Beifahrer-Airbag 150–160 l; man spricht hier von Full-size-Airbags. Dagegen nahm der Euro-Airbag (auch Euro-size-Airbag genannt), der, abhängig von der herstellerspezifischen Sicherheitsphilosophie, zeitweise lediglich als Kopf-Schutzmaßnahme vorgesehen war, fahrerseitig nur 25–35 l und beifahrerseitig 60 l auf. Diese Entwicklung, bei der **Form und Größe des Airbags** durch das Einsatzgebiet geprägt wird, kann noch nicht als abgeschlossen angesehen werden. Sie scheint sich jedoch auf einen Bereich hin zu bewegen, der gekennzeichnet ist durch Airbag-Volumina fahrerseitig von 45–60 l bzw. beifahrerseitig von 80–120 l; diese Airbag-Größen werden als Mid-size-Airbags bezeichnet. Üblicherweise werden für Fahrer-Airbags rotationssymmetrische, kreisrunde Luftsackformen und für Beifahrer-Airbags prismatische, rechteckige Formen bevorzugt. Eine Sonderform stellt der von Toyota entwickelte Zweikammer-Airbag (Twin-chamber-Airbag) für die Beifahrerseite dar, bei dem bei Auslösung zwei Luftsäcke entfaltet werden. Die dadurch entstehenden komplexeren Oberflächen sollen die auf Kopf und Schultern wirkende Belastungen besser verteilen. Der Einsatz von Fahrer- und Beifahrer-Airbags kann heute als Stand der Technik auch in kleineren PKW angesehen werden.

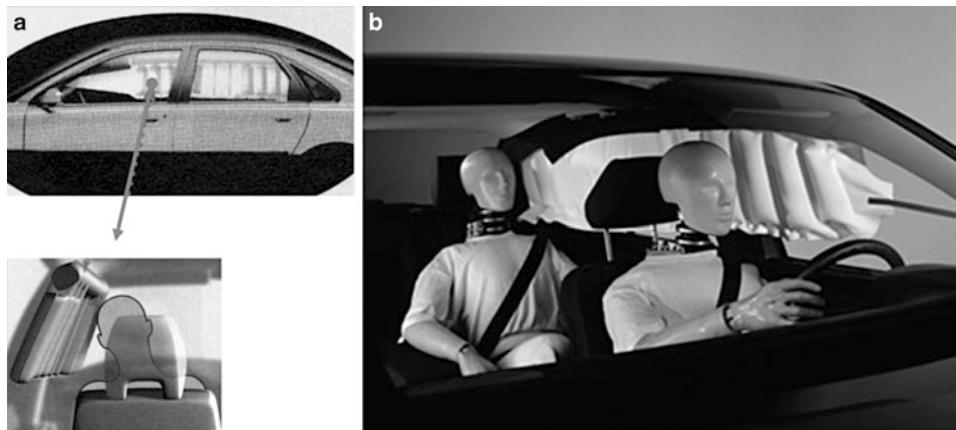


**Abb. 4.50** Im Sitz (a) und in der Tür (b) integrierter Seiten-Airbag (Fotos: Subaru, BMW)



**Abb. 4.51** Kopf/Thorax-Airbag (a) und getrennte Seiten-Airbags für Kopf und Thorax (b) (Fotos: Autoliv, BMW)

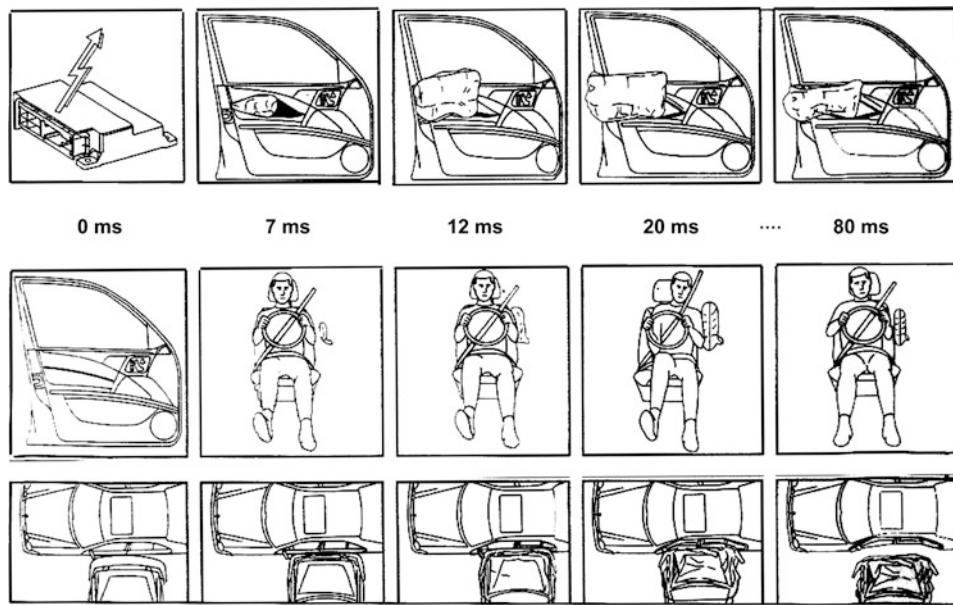
Durch den **Einsatz von Airbag-Systemen** an anderen Stellen im Fahrzeug werden die Form und die Größe des Airbags und damit die der Komponenten entscheidend beeinflusst. Aufgrund des hohen Verletzungsrisikos bei Seitenkollisionen konzentrierten sich seit Anfang der 1990er Jahre die Entwicklungsanstrengungen auf die Bereitstellung von **Seiten-Airbags** (sog. Side-impact-Airbags), sie kamen durch Volvo mit dem Modelljahr 1995 zum ersten Serieneinsatz. Die Seiten-Airbags werden entweder in der Sitzlehne, wie beispielsweise durch Subaru realisiert (Abb. 4.50a), hinter der Tür-Innenverkleidung (Abb. 4.50b) oder im seitlichen Dachrahmen verbaut. Sie bieten in kombinierter Ausführung oder als getrennte Airbag-Einheiten Schutz für den Kopf und/oder die Brust (Abb. 4.51). Als Kopf-Airbag – unverständlichlicherweise oftmals „Window“-Bag bezeichnet, obwohl er doch vorrangig den Kopf und nicht die Scheibe schützen soll – scheint sich der aufblasbare „Vorhang“ IC (Inflatable curtain) durchzusetzen, der entlang der Seitenscheibe den Kopf beim seitlichen Anprall, insbesondere beim lateralen Pfahlaufprall, vor dem harten Anprall bewahrt (Abb. 4.52).



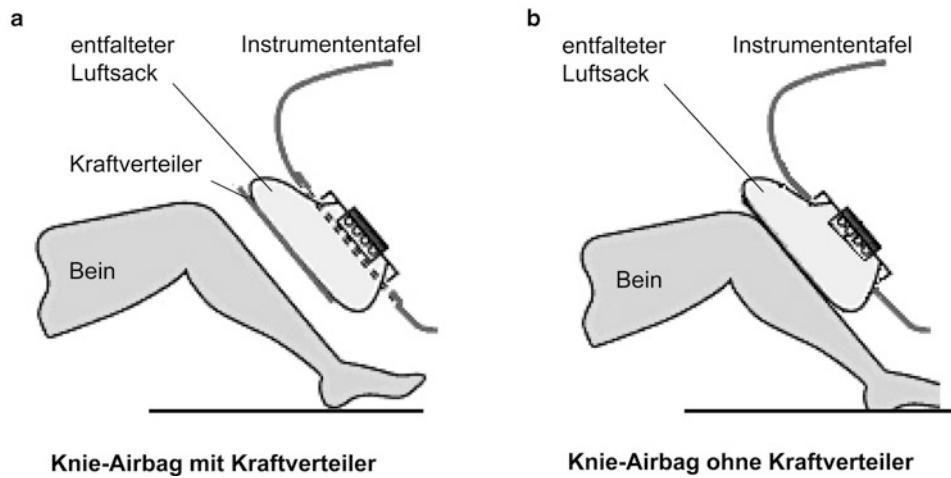
**Abb. 4.52** Prinzipielle Darstellung des Kopf- (oder Window-) Airbags (a) und seine Realisierung (b, Foto: Mercedes-Benz)

Der Seiten-Airbag weist ein Volumen von bis zu 15 l auf. Im Falle einer Seitenkollision schiebt er sich schlagartig in den Freiraum zwischen Insassen und Tür und vermeidet somit den direkten Kontakt des Kopf- und Brust-Bereichs mit harten Innenraum-Teilen, wie Türinnenseite und den Verkleidungen von Dachrahmen und B-Säule. Zur Auslösung sind zusätzliche, seitlich wirksame Sensoren zum Detektieren der Querbeschleunigung am Fahrzeug erforderlich. Aufgrund des im Vergleich zur Vorverlagerung bei Frontalkollisionen geringeren Abstandes zwischen Insassen und Türverkleidung muss die Auslösung des Seiten-Airbags erheblich schneller realisiert werden: die Zündung des Generators erfolgt nach ca. 5 ms, seine Wirksamkeit entfaltet er nach etwa 12–18 ms nach dem seitlichen Aufprall. Der zeitliche Ablauf für die Airbag-Entfaltung, die Anlage am Insassen und die Fahrzeugkonstellation beim Seitenauftreffen ist in Abb. 4.53 schematisch gezeigt [29].

Zum Schutz der unteren Extremitäten setzt sich in letzter Zeit verschiedentlich ein weiteres Airbag-System im Frontbereich durch: der **Knie-Airbag**. Hier werden zwei Arten unterschieden, und zwar der Knie-Airbag mit und der ohne Kraftverteilung [30, 31]. Im ersten Fall handelt es sich um ein System, bei dem ein Teil der unteren Instrumententafel integraler Bestandteil ist. Im Fall eines Aufpralls entfaltet sich der Luftsack und drückt dabei die gepolsterte Abdeckplatte zur Kraftverteilung und gleichmäßigen Abstützung gegen den Kniebereich der unteren Extremitäten (Abb. 4.54a). Der Vorteil dieser Variante ist die gleichmäßige Verteilung der Kontaktkräfte, jedoch entsteht durch die relativ unelastische Kraftverteilung eine Punktbelastung an der Kontaktstelle; daraus resultieren bei der Airbag-Entfaltung aufgrund der massebehafteten Abdeckung höhere Anschussbelastungen. Der Airbag ohne Kraftverteiler ist ein einfacheres Konzept und wird unterhalb der Instrumententafel verbaut (Abb. 4.54b). Der bei einem Unfall austretende Luftsack absorbiert die eingetragene Energie, kann aber ein Verdrehen des Unterkörpers um die Hochachse nicht verhindern [30].



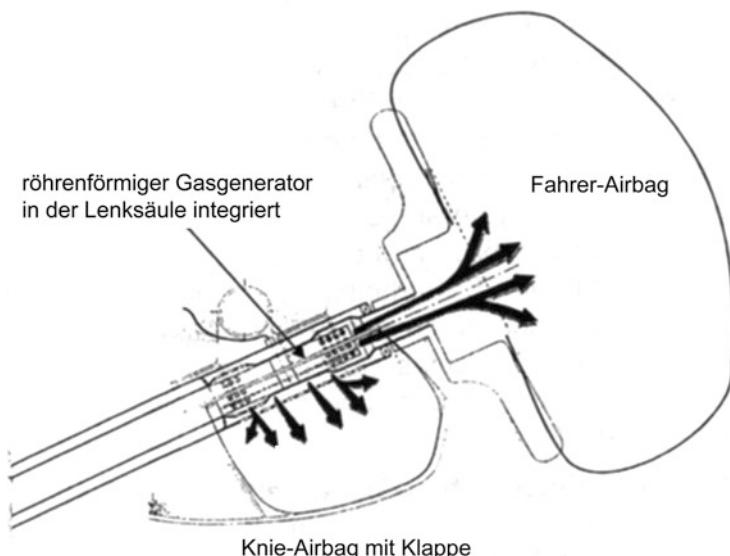
**Abb. 4.53** Zeitlicher Ablauf der Airbag-Entfaltung, der Relation zwischen Airbag und Insassen sowie der Fahrzeubewegung bei Seitenkollisionen (nach [29])



**Abb. 4.54** Funktionsweise von Knie-Airbags mit und ohne Kraftverteiler (nach [31])

Durch eine geschickte Anordnung des Gasgenerators in der Lenksäule, wie dies in Abb. 4.55 dargestellt ist [32], kann das austretende Gas genutzt werden, um gleichzeitig den Fahrer-Airbag zu füllen und einen Knie-Airbag zu entfalten. Dieser öffnet im Fall einer Frontalkollision eine energieabsorbierende Klappe in Kniehöhe so, dass sie als Kniefänger

wirksam wird. Der Vorteil einer derartigen Lösung ist darin zu sehen, dass der Einstiegs- und Bewegungskomfort, der durch das ansonsten starre, großvolumige Kniepolster im normalen Fahrzustand erheblich eingeschränkt ist, voll erhalten bleibt.



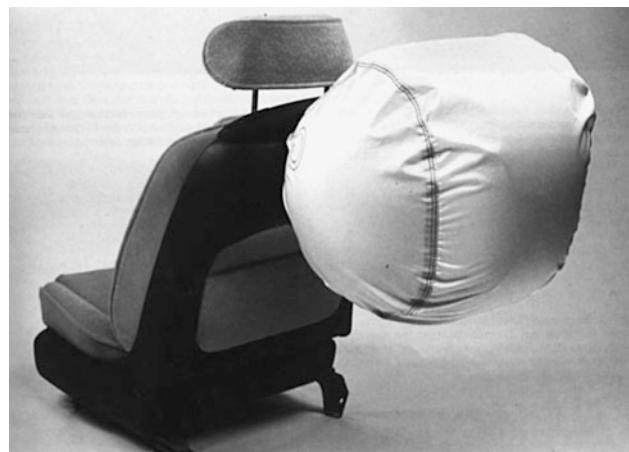
**Abb. 4.55** Passives Rückhaltesystem mit Fahrer- und Knie-Airbag (aus [32])

Als Maßnahme zur Vermeidung des Submarining-Effekts wurde der so genannte **Anti-Sliding-Bag** entwickelt, der sich im vorderen Teil des Sitzes befindet und bei Frontalkollisionen das Becken stabilisiert. Er soll dabei die Wirkung des Sicherheitsgurtes unterstützen und so Verletzungen im Abdominalbereich und der unteren Extremitäten reduzieren. Da dieses Airbag-System jedoch nur selten eingesetzt wird und zudem seine Effizienz zweifelhaft erscheint [30] soll hier nicht näher darauf eingegangen werden.

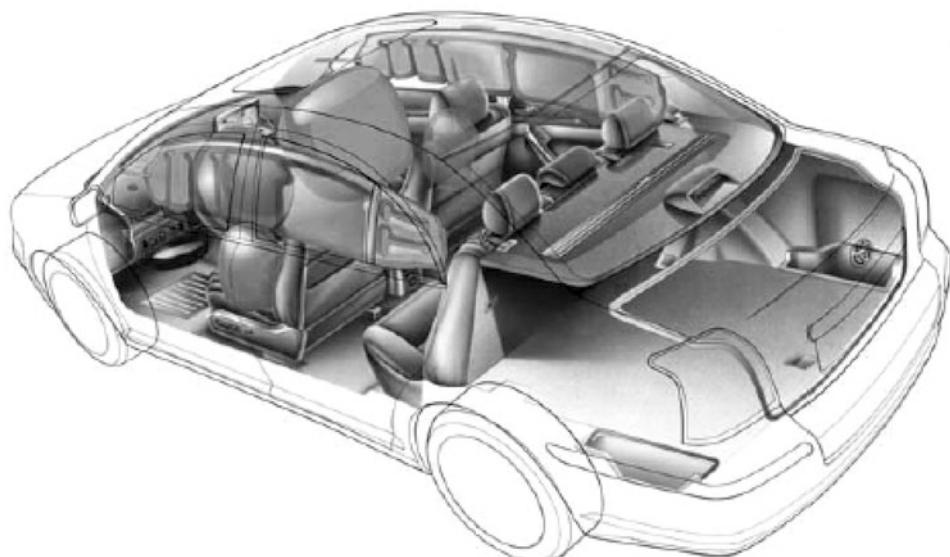
Bei der Konzeption und Entwicklung von **Fond-Airbags** (Abb. 4.56) kommen im Vergleich zum Front-Airbag einige erschwerende Parameter hinzu: So erfordert der Fond-Airbag ein größeres Volumen, um einen Anprall der Fond-Insassen gegen die Sitzlehne zu vermeiden bzw. abzumildern. Dabei müssen Variationen der Sitzverstellung, der Lehneneigung sowie der Insassen-Größe und -Sitzhaltung berücksichtigt werden. Aufgrund des erforderlichen Volumens ist die Auslösung in Verbindung mit den Front-Airbags hinsichtlich der Gefährdung des Trommelfells im menschlichen Ohr nicht unproblematisch.

Für die künftige Entwicklung zeichnen sich zahlreiche **weitere Anwendungsgebiete** für die schützenden Luftsäcke ab. Trotz kontinuierlich steigender Ausstattungsraten auf Fahrer- und Beifahrerseite scheint es gar, als ob die Technologie des Airbags erst am Anfang stünde. In einer bereits Anfang 1995 vorgestellten Studie [27] wurden z. B. sieben unterschiedliche Airbag-Systeme zu einem umfassenden Rundumschutz zusammengefasst: Er besteht aus je einem asymmetrischen Fahrer- und Beifahrer-Airbag, Knie- und Fußbags für

**Abb. 4.56** Fond-Airbag im entfalteten Zustand (Foto: Nissan)



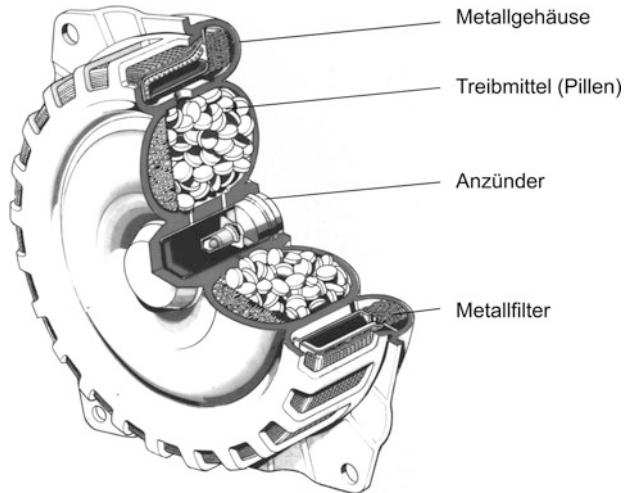
Frontpassagiere, Kopf-Airbags im Dachrahmen, Thorax-Airbags in allen Türen, Mittelbags zwischen den Vordersitzen und in der Lehne der Rücksitzbank sowie einem Laptop-Airbag im Fahrzeugfond. Mittlerweile ist ein großer Teil davon in Serienfahrzeugen umgesetzt oder befindet sich in der Vorentwicklungsphase, wie der Fuß-Airbag. Abbildung 4.57 zeigt einen Überblick über die Möglichkeit derzeit verwendeter Airbag-Systeme. Im Experimentierstadium sind zudem Airbag-Systeme auf oder an der PKW-Motorhaube zum Schutz der Fußgänger und Airbags für Motorräder, deren Serieneinsatz allerdings recht ungewiss erscheint.



**Abb. 4.57** Ausstattungsvariante heutiger PKW mit Airbag-Modulen: Fahrer-, und Beifahrer-, Kopf- und Thorax- sowie Knie-Airbags (Grafik: Toyota)

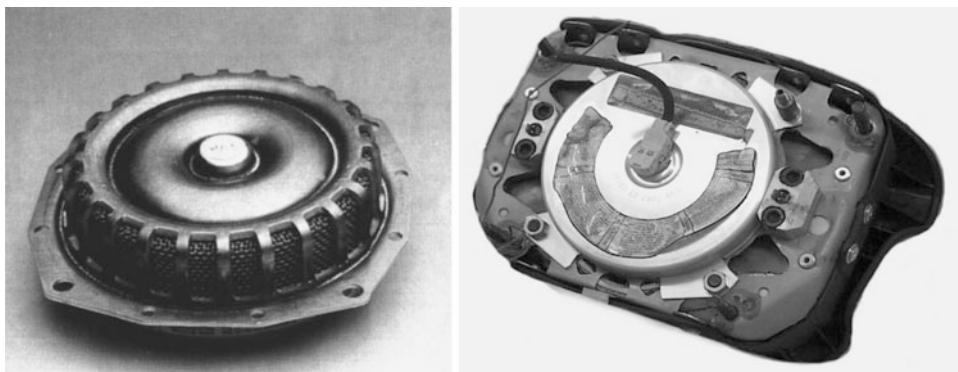
Das Airbag-System besteht aus den **Komponenten** Sensorik (siehe Kap. 5), Auslöseeinheit und dem **Airbag-Modul**, das sich aus dem Gasgenerator, dem Luftsack und dem Gehäuse zusammensetzt. Als Schnittstelle zwischen dem Airbag-System und dem Innenraum dient die Abdeckung, die genau definierte Anforderungen im Aufreiß- und Öffnungsverhalten erfüllen muss.

**Abb. 4.58** Schematischer Aufbau des Rundgasgenerators



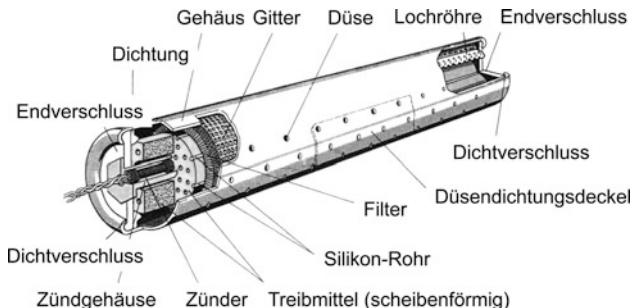
Zur Gaserzeugung und schnellen Füllung des Luftsacks dient der **Gasgenerator** als maßgebliche Komponente des Airbag-Moduls. Obwohl je nach Generator-Einsatz zwischen Fahrer-, Beifahrer-, Kopf- und Thorax-Airbag unterschieden wird und nach der Art und Anwendung des pyrotechnischen Treibmittels eine weitere Unterscheidung in Natriumazid-haltige (Natriumazid:  $\text{NaN}_3$ ) und azidfreie Generatoren (Azide: Salze der Stickstoffwasserstoffsäure  $\text{H}_3\text{N}$ ) üblich ist, weisen alle Generatoren Gemeinsamkeiten auf hinsichtlich ihrer Einzelkomponenten und ihres Aufbaus [27]. Gasgeneratoren sind prinzipiell zylindrisch aufgebaut, wobei sich je nach Einbauort zwei unterschiedliche Bauformen etabliert haben: Für den Einbau im Lenkrad (vgl. linke Darstellung in Abb. 4.49) und in den Türen kommt die flache Bauweise (Rundgenerator) zum Einsatz (Abb. 4.58 und 4.59), die gelegentlich auch noch beim beifahrerseitigen Airbag-Modul in doppelter Anordnung anzutreffen ist. Hier allerdings, vor allem aber bei der Verwendung von Seiten-Airbags hat sich, insbesondere aus Platzgründen, der rohrförmige Gasgenerator (Rohrgenerator) durchgesetzt.

Die Größe des in Abb. 4.59 dargestellten **Rundgenerators** hängt maßgeblich vom erforderlichen Gas-Volumenbedarf ab und weist im Durchmesser Werte von 75 bis 100 mm und in der Höhe Werte von lediglich 20 bis 35 mm auf. Üblicherweise werden allerdings auf der Beifahrerseite (rechte Darstellung in Abb. 4.49) und zur Integration in Sitzen und im Dachrahmen **Rohrgeneratoren** (Abb. 4.60) verwendet, ihre Länge ist wesentlich größer als ihr Durchmesser (typisch sind 50 mm Durchmesser und eine Länge von bis zu 230 mm).



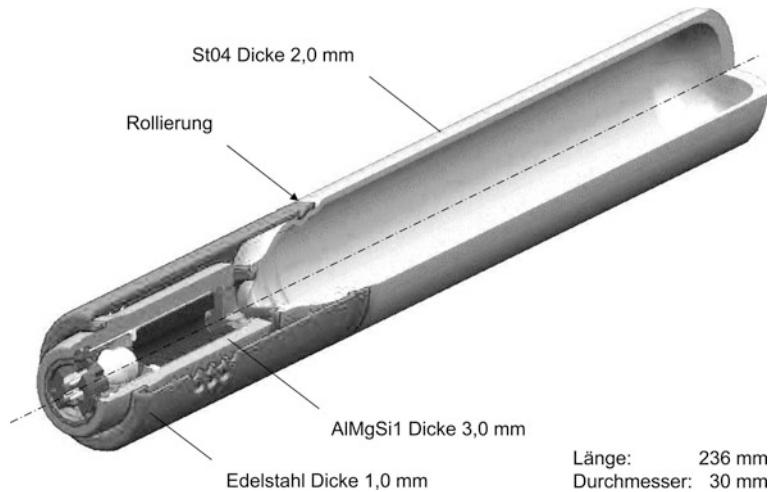
**Abb. 4.59** Rund-Gasgenerator und komplettes Lenkrad-Airbag-Modul (Ansicht von hinten)

**Abb. 4.60** Schematischer Aufbau eines rohrförmigen Gasgenerators [33]



Der Aufbau eines Rohr-Gasgenerators ist detailliert in Abb. 4.60 gezeigt. Zu den wesentlichen Bestandteilen des Gasgenerators zählen zunächst ein mit einer pyrotechnischen Primärladung umgebener Widerstandsdraht als elektrischer Anzünder und die Verstärkerladung zur Erhöhung der Zündenergie. Anzünder und Verstärkerladung, die je nach Hersteller aus Schwarzpulver oder Bleitritzinat bestehen [27], bilden die Anzünd-Einheit, die in einem Zündgehäuse untergebracht ist. Zur eigentlichen Gaserzeugung dient ein pyrotechnisches Treibmittel, das beim Rundgenerator in Tabletten- und beim Rohr-Gasgenerator in Scheibenform verpresst und zusammen mit einer Filtereinheit aus rostfreiem Stahl, Wärmedämmungs- und Dichtmaterial zur hermetischen Abdichtung in einer Brennkammer aus Stahl oder Aluminium untergebracht ist. Öffnungen an der Außenseite des Brennkammergehäuses dienen als Düsen, durch die das Gas in den Luftsack abströmen kann. Während das schnell abbrennende Gas in der Brennkammer eine Temperatur von 1.100 bis 1.350 °C aufweist, kühlt das beinahe reine Stickstoffgas durch die schnelle Expansion auf rund 150 °C ab. Da das Gas nur wenige Millisekunden im Luftsack verbleibt, ehe es über Abströmöffnungen oder das durchlässige Gewebe entweicht, nimmt das Luftsackgewebe die Temperatur des Gases nicht an; es muss daher bei Kontakt zwischen der Hautoberfläche und dem Luftsack keinesfalls mit Verbrennungen gerechnet werden.

Neben den pyrotechnischen Gasgeneratoren, die neben der Einsatzart nach der Befüllung mit anorganischen (azidhaltigen) oder organischen (azidfreien) Treibstoffen zur Gaserzeugung unterschieden werden, existieren als **alternative Gasgeneratoren** die so genannte Hybrid-Gasgeneratoren (Abb. 4.61). Weitere Konzepte basieren auf der Verbrennung von Flüssiggas bzw. trennbaren Treibstoff/Gas-Gemischen und der pyrotechnischen Freisetzung eines hochkomprimierten Mediums in so genannten Speichergasgeneratoren. Bei den Hybrid-Gasgeneratoren wird mittels einer pyrotechnischen Treibladung eine mit einem inerten Kaltgas wie Argon oder mit einem Gasgemisch gefüllte, bis zu 250 bar vorgespannte Druckflasche geöffnet. Das entweichende Gas wird beim Überströmen in den Luftsack erwärmt, um ihn ausreichend anzufüllen. Die wesentlichen Vorteile sind in der geringeren Erwärmung, dem geringeren Einsatzgewicht, dem dünneren Luftsackgewebe und der besseren Recycling-Möglichkeit zu sehen [27].



**Abb. 4.61** Schematischer Aufbau eines Hybrid-Gasgenerators (Grafik: TRW Automotive)

An Luftsack-Größen haben sich, wie bereits aufgezeigt werden konnte, drei Größenklassen herausgebildet: Euro-size-, Mid-size- und Full-size-Airbags. Diese drei Bezeichnungen charakterisieren jedoch keinesfalls die Qualität oder das Schutzvermögen des jeweiligen Airbag-Systems. Sie umschreiben lediglich das Volumen des Luftsacks, das sich in der Regel nach konstruktiven Merkmalen des Fahrzeugs, der Leistung des Gasgenerators und dem Schutzzweck richtet [27].

Als **Material für den Luftsack** werden hauchdünne Kunststoff-Fasern zu speziellen Airbag-Geweben verarbeitet. Man unterscheidet beschichtete und unbeschichtete Gewebe, wobei sich letztere aufgrund der besseren Partikelfilterung moderner Generatoren immer mehr durchsetzen. Aber auch heute weisen Luftsäcke aus Polyamid 6.6 am Einblasmund noch Beschichtungen mit Polychloropren oder Silikon auf. Die Festigkeit des Gewebes wird bei gleichem Material von der Feinheit des Garnes beeinflusst. Mit der Art und Weise, wie

der Luftsack zusammengelegt ist, kann der Entfaltungsvorgang gezielt gesteuert werden. Dabei wird im Wesentlichen die traditionelle Leporello-Faltung, bei der der Luftsack über den Generator gefaltet wird, und die so genannte Raff-Faltung, bei der sich der Luftsack seitlich am Generator befindet, unterschieden. Zusätzlich werden Luftsäcke mit innenliegenden Fangbändern oder mit Reißnähten versehen. Sie reduzieren die Entfaltungslänge bzw. verlangsamen die Entfaltungsgeschwindigkeit und verhindern damit den Kontakt zwischen Luftsack und Insassen während des Entfaltungsvorgangs. Die Energieaufnahme des Airbags wird durch die Dimensionierung der Abströmöffnungen (bei beschichteten Geweben) oder die Luftdurchlässigkeit des Gewebes bestimmt. Durch den exakt definierten Volumenstrom entweicht beim Auffangen des Insassen Gas aus dem Luftsack, so dass ein energieabsorbierendes, „weiches“ Eintauchen des Insassen in den Airbag sichergestellt wird.

Das **Airbag-Gehäuse** stellt die verbindende Einheit zwischen Generator und Luftsack dar. Es enthält den Befestigungsflansch für den Gasgenerator und positioniert diesen gegenüber der Einströmöffnung im Luftsack, dem so genannten Einblasmund. Zudem weist das Gehäuse eine Möglichkeit für die Befestigung mittels Schraubverbindung im Lenkrad-Pralltopf oder unter der Instrumententafel an der Fahrgastzelle auf. Als Gehäusematerialien kommen tiefgezogene Stahlbleche, Aluminium-Strangpressprofile und neuerdings auch Kunststoffe zur Anwendung. Neuere Entwicklungen verzichten aus Gewichtsgründen auf ein eigenes Gehäuse; der Airbag-Generator und der Luftsack sind dann direkt im Lenkrad oder unter der Instrumententafel befestigt [34].

Je nach Bauart des Airbag-Moduls ist die Einheit aus fertigungstechnischen Gründen mit einer Schutzbdeckung, die aus einer dünnen Folie besteht, umgeben; die eigentliche **Airbag-Abdeckung** ist in diesem Fall Bestandteil des Lenkrads oder der Instrumententafel. Im anderen Fall wird das Gehäuse auf der insassenzugewandten Seite mit einer Sichtabdeckung versehen, die gleichzeitig die Schnittstelle zwischen dem Airbag-Modul und dem Fahrgastrauum darstellt. Als solche müssen sie sich optisch in das Gesamtbild des Lenkrads oder der Armaturentafel einfügen, zudem ein definiertes Aufreiß- und Öffnungsverhalten aufweisen und daher möglichst leicht ausgeführt sein. Als Material haben sich in den letzten Jahren gewebe- oder metallverstärkte Polyurethane durchgesetzt. Daneben werden auch Verbundwerkstoffe verwendet, wobei dann die Innenabdeckung aus einem thermoplastischen Kunststoff besteht, der mit einer dekorativen Außenhülle aus Vinyl überzogen ist. Aus Recycling-Gründen werden in zunehmendem Maße Abdeckungen aus nur noch einem Material verwendet werden [27].

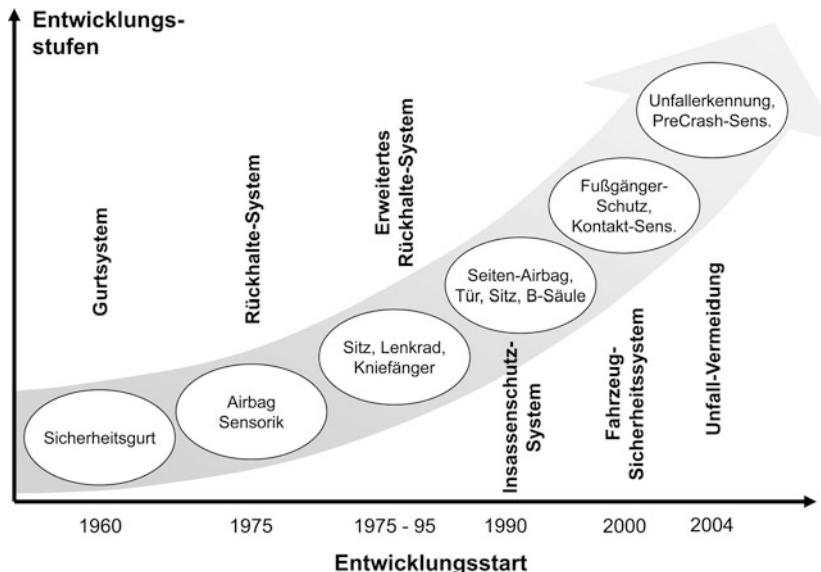
Zur Weiterentwicklung im Bereich der Airbag-Technologie lassen sich derzeit dreierlei **Tendenzen** umreißen: Zum einen geht es darum, die Schutzwirkung von Airbag-Systemen an weiteren Kontaktstellen im und am Fahrzeug zu nutzen, etwa im Fußraum und im Fond, aber auch in Nutzfahrzeugen, in Bussen und auf Motorrädern. Im Bereich der Gasgeneratoren liegt der Schwerpunkt der Entwicklung in der Optimierung der pyrotechnischen Generatoren und im Ausbau der neuen Hybrid-Gasgeneratoren im Serieneinsatz. Schließlich arbeiten Automobilhersteller zusammen mit der auf Sicherheitstechnik spezialisierten Zuliefererindustrie an weiteren Lösungen, die gegenwärtige Airbag-Technologie

„intelligenter“ zu machen [27], um das Schutzzpotential weiter zu erhöhen und mögliche Risiken zu minimieren. Bei diesen so genannten **Smart Restraint Systems** handelt es sich beispielsweise um die Sitzbelegungs- und Insassen-Erkennung (vgl. Abschn. 5.2.3), die eine Airbag-Auslösung bei nicht anwesendem Beifahrer, bei Kinder-Rückhaltesystemen auf dem Beifahrersitz oder bei OoP-(Out-of-position-)Situationen vermeiden oder die Dynamik der Airbag-Entfaltung vermindern. Ein anderer Ansatz ist in der Individualisierung der Schutzwirkung mit Hilfe mehrstufiger Generatoren, d. h. Anpassung der Gasmenge an Insassengröße und/oder -gewicht, zu sehen. Die Entwicklung in diesem Bereich kann dabei keinesfalls als abgeschlossen angesehen werden.

Bei der Entwicklung von Airbag-Systemen ist eine Vielzahl unterschiedlicher Lastfälle zu betrachten, so beispielsweise verschieden große Dummys, verschiedene Insassenschutz-Prinzipien, Versuchskonstellationen sowie gesetzliche und sonstige Anforderungen bei variierenden PKW-Ausstattungen. All diese Lastfall-Variationen können jedoch nur ansatzweise mit Hilfe von Versuchen allein überprüft werden. Aus diesem Grund kommt der rechnerischen **Simulation** eine immer größere Bedeutung zu, was nicht zuletzt zu einer kontinuierlichen Weiterentwicklung der Modellierungsverfahren und -techniken, aber auch der zur Verfügung stehenden Rechner-Hardware führte (s. dazu Kap. 8). Die Simulation der mechanischen Fahrzeugstruktur im Crashfall ist bereits aus dem **Fahrzeug-Entwicklungsprozess** nicht mehr wegzudenken, genauso wenig wie numerische Simulation bei der Auslegung von Insassenschutz-Systemen (s. auch Kap. 9).

#### 4.3.4 Insassenschutz-Systeme

Ein wirksamer Schutz der Insassen vor Verletzungen kann nicht allein durch die Rückhaltewirkung der Gurt- und Airbag-Systeme gewährleistet werden, vielmehr müssen diese Rückhaltesysteme je nach Sicherheitsphilosophie und daraus abgeleiteten Anforderungen zusammenwirken mit der Sitzeinrichtung, dem Lenksystem, der Instrumententafel, der Windschutzscheibe sowie den Verkleidungsteilen und Abdeckungen der Innenausstattung von Kraftfahrzeugen. Entwicklungstechnisch lassen sich für die innere Sicherheit von Kraftfahrzeugen **Technologiestufen** aufzeigen (Abb. 4.62), die mit der Entwicklung und Einführung von Sicherheitsgurten beginnen. Genau genommen allerdings wurden bereits vorher Forderungen nach Vermeidung des Anpralls auf harte Innenraumteile, der Entschärfung von Kanten und engen Radien im Innenraum sowie einer Intrusionsbegrenzung der Lenkeinrichtung formuliert. Die nächste Technologiestufe ist gekennzeichnet mit der Realisierung von Airbag-Systemen (Airbag-Module mit zunächst elektromechanischer Sensorik) als Ergänzung zum Dreipunkt-Automatik-Gurt (vgl. Abschn. 4.3.3). Das Rückhaltesystem, d. h. das Vorhandensein von Gurt- und Airbag-System, erfuhr eine Erweiterung durch die Berücksichtigung der Sitz-, der Lenkrad- und – in Sonderfällen – der Kniefänger- und der Kopfstützen-Eigenschaften beim Energiemanagement zur Herabsetzung der Relativgeschwindigkeit zwischen Insassen und Fahrzeug-Innenraum. Mit der Entwicklung von Seiten-Airbags konnte sprachlich von „Rückhalte“-Wirkung nicht



**Abb. 4.62** Technologie-Stufen: Vom Gurtsystem zur Unfall-Vermeidung

mehr die Rede sein, vielmehr besann man sich auf die generelle Zielsetzung derartiger Selbstschutz-Maßnahmen im Fahrzeug: auf den „Insassenschutz“. Die entsprechenden Einrichtungen bezeichnete man konsequenterweise als Einzelmaßnahmen eines wie auch immer gearteten Insassenschutz-Systems.

Der nächste Entwicklungsschritt war gekennzeichnet durch Schutzmaßnahmen zur Berücksichtigung äußerer Verkehrsteilnehmer, und hier insbesondere der Fußgänger. Damit einher ging die Forderung nach einer Sensorik zur Unfall-Früherkennung, die allerdings beim Fußgängerschutz zunächst noch auf Kontaktssensoren beschränkt blieb. Andererseits ist derzeit eine äußerst dynamische Entwicklung im Bereich der PreCrash-Sensorik zu erkennen, bei der vorhandene Informationen von Komponenten der aktiven Sicherheit wie ABS (Antiblockier-System) und ESP (Elektronisches Stabilitätsprogramm) genutzt, aber auch neue Sensoren in Form von Infrarot- und Radar-Sender/Empfänger-Einheiten sowie Digitalkameras eingesetzt werden, um Warn- und Assistenz-Systeme zu realisieren. In diesem Sinne spielt das PreSafe-System von Mercedes-Benz eine Vorreiterrolle, bei dem Maßnahmen zur Verbesserung des Insassenschutzes bereits in der vorkollisionären Phase eingeleitet werden: Die bisher getrennt voneinander operierenden Sicherheitssysteme der aktiven und der passiven Sicherheit werden hier in intelligenter Weise miteinander verknüpft, um auf der Basis der Fahrdynamik-Daten vorhandene Informationen zu bewerten, Strategien zur Bereitstellung präventiver Schutzsysteme zu entwickeln und Wirkmechanismen zu aktivieren. Hierzu zählen Maßnahmen zur Sensibilisierung, Fixierung, Positionierung und Konditionierung der Insassen bzw. des Fahrzeugs. Weitergehende Überlegungen haben zum Ziel, den Fahrer in Gefahrensituationen frühzeitig zu informieren und damit

die Möglichkeit zu schaffen, ein Fahrmanöver zur Unfallvermeidung einzuleiten, zumindest aber bei nicht zu vermeidender Kollision die Unfallschwere zu reduzieren. Die zum Teil bereits erfolgte Umsetzung in Serienfahrzeuge bedeutet einen Technologiesprung bei der Verbesserung der Fahrzeugsicherheit [35].

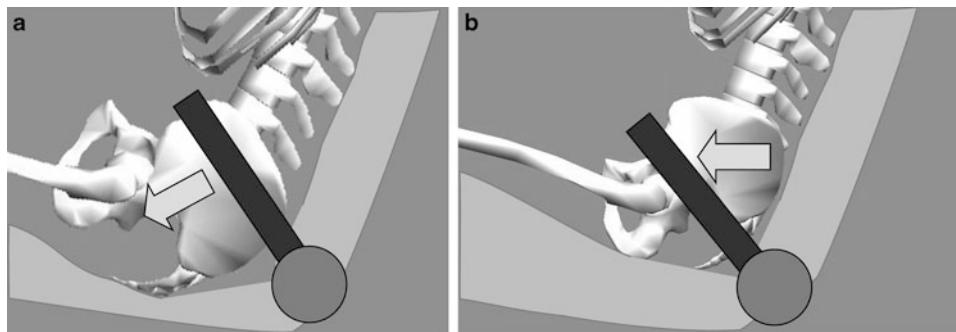
Im Zusammenhang mit dem Gurtsystem ist die **Sitzeinrichtung** von entscheidender Bedeutung. Dies bezieht sich sowohl auf die Anbindung des Beckengurts am Sitzrahmen bzw. die Integration des kompletten Gurtsystems im Sitz als auch auf die Steifigkeit des Sitzunterbaus. Die Anbindung des **Gurtsystems am Sitz** stellt die geometrisch optimale Führung des Beckengurts am menschlichen Körper sicher, und zwar unabhängig von der Insassengröße und der aktuellen Sitzverschiebung. Beim **sitzintegrierten Gurtsystem**, das gleichermaßen für Fahrer und Beifahrer vorgesehen wird, passt sich zudem der Gurt im Schulterbereich geometrisch an den Insassen an. Der Aufrollautomat und ggf. der Straffer des Gurtsystems sind in der Sitzlehne untergebracht. Die Höhenverstellung des Umlenkpunktes erfolgt entweder mechanisch gekoppelt mit der Sitzverschiebung oder mit Hilfe eines Schrittmotors, der durch eine Memory-Schaltung angesteuert werden kann.

In der in Abb. 4.63 gezeigten Ausführung, die insbesondere bei Cabriolets wegen der fehlenden B-Säule eingesetzt wird, erfolgt die Gurt-Höhenverstellung gemeinsam mit der Variation der Kopfstütze. Beim Gurtintegralsitz kommt zusätzlich der logistische Aspekt hinzu: Sitz und Gurtsystem werden zur Serienfertigung als komplette Einheit ans Band geliefert und dort verbaut.

**Abb. 4.63** Sitzintegriertes Gurtsystem (Foto: Mercedes-Benz)

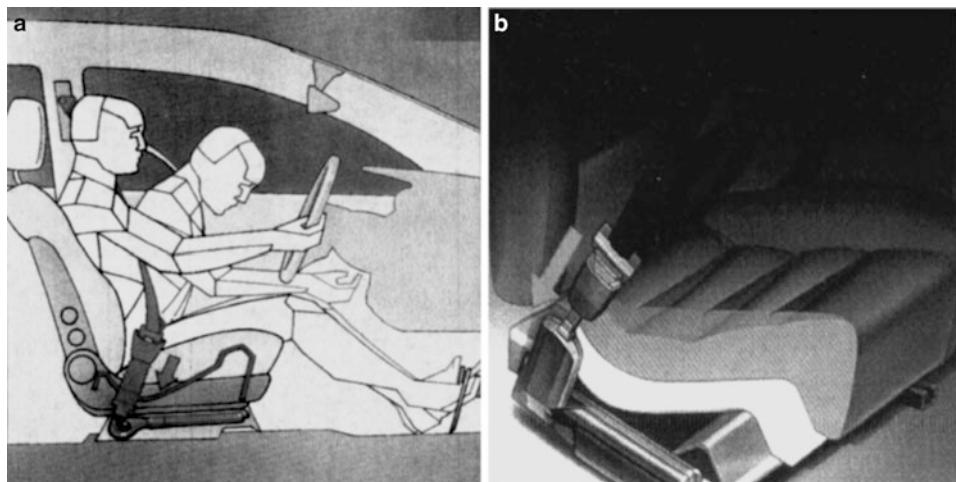


Die Auswirkungen unterschiedlicher **Sitzsteifigkeiten** sind in anschaulicher Weise in Abb. 4.64 gezeigt. Dort ist jeweils die Kinematik des Insassen bei maximaler Beckenvorverlagerung bei einem zu weichen (4.64a) und einem stützenden **Sitzunterbau** (4.64b) gegenübergestellt. Deutlich erkennt man das Abtauchen des Beckens, das zum so genannten Submarining-Effekt führt, während sich bei einem stützenden Unterbau eine stabile Beckenlage bei Frontalkollisionen nicht nur aufgrund der höheren Steifigkeit, sondern



**Abb. 4.64** Insassen-Kinematik bei Frontalkollisionen beim weichen (a) und stützenden Sitzunterbau (b)

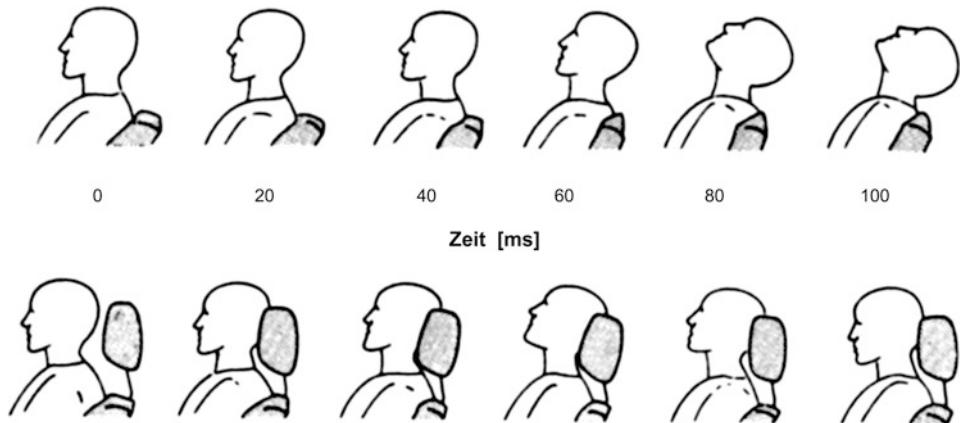
durch die rampenförmig ausgebildete Sitzwanne einstellt (Abb. 4.65). Infolge dessen ist das Verletzungsrisiko bei anatomiegerecht ausgelegtem Sitzunterbau im Becken- und Abdominalbereich erheblich geringer.



**Abb. 4.65** Sitzrampe als Submarining-Stütze – nach Opel (a) und nach BMW (b)

Die in der Sitzlehne befestigten **Kopfstützen** sind ein wirksames Sicherheitselement zur Vermeidung von Halswirbelsäulen-Verletzungen sowohl beim Zurückschleudern des Oberkörpers im Fall eines Frontalaufpralls, bekannt als Rebound-Effekt, als auch bei Heckkollisionen. In Abb. 4.66 ist der Bewegungsablauf des Dummy-Kopfes mit und ohne Einsatz von Kopfstützen aus Heckaufprall-Versuchen mit 28 km/h gezeigt [22].

Der maximale Neigungswinkel des Kopfes beträgt ohne Kopfstütze  $64^\circ$  und lässt sich durch deren Einsatz auf  $25^\circ$  reduzieren. Aufgrund des immer noch großen Verletzungsanteils bei Straßenverkehrsunfällen und der hohen Kosten bei der Regulierung von Schmer-



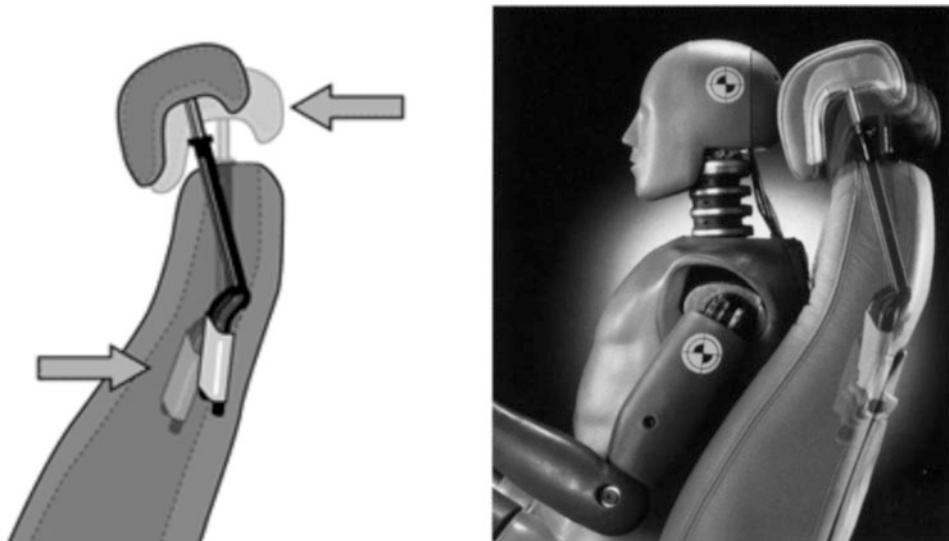
**Abb. 4.66** Kopfkinematik beim Heckaufprall ohne und mit Kopfstütze (nach [22])

zensgeldansprüchen durch die Versicherungen (1994 betrafen 93 % aller Personenschäden die Halswirbelsäule [36]) gewann die Frage nach der konstruktiven Auslegung und der geometrischen Anordnung der Kopfstützen wieder an Bedeutung. Aus einer Untersuchung in marktgängigen PKW lässt sich zusammenfassen, dass manuell einstellbare Kopfstützen eher ein Risiko darstellen, da – wie im Straßenverkehr beobachtet werden kann – die meisten Benutzer die Kopfstütze nicht oder nicht richtig einstellen. Zudem zeigt sich, dass bei einem Großteil der variablen Kopfstützen die eingestellte Verriegelung einer Belastung durch den Kopf nicht standhält und damit nicht nur unwirksam, sondern ein zusätzliches Verletzungsrisiko in sich birgt. Aus der Bewertung der geometrischen Gegebenheiten in der Kopf/Kopfstützen-Relation ergibt sich, dass Kopfstützen nur dann als sicher angesehen werden dürfen, wenn der vertikale Abstand zwischen Kopf- und Kopfstützen-Oberkante 0 bis 60 mm und die horizontale Distanz zwischen Hinterkopf und Vorderkante der Kopfstütze 0 bis 70 mm beträgt [37]. Eine verträgliche Lösung hinsichtlich Funktion und Geometrie bieten daher integrierte oder automatisch verstellbare Kopfstützen für alle Sitzpositionen. In Abb. 4.67 sind verschiedene Anwendungsbeispiele von Kopfstützen in neueren Fahrzeugen dargestellt.



**Abb. 4.67** Beispiele für Kopfstützen, nach BMW (a), nach Audi (b) und nach Mercedes-Benz (c)

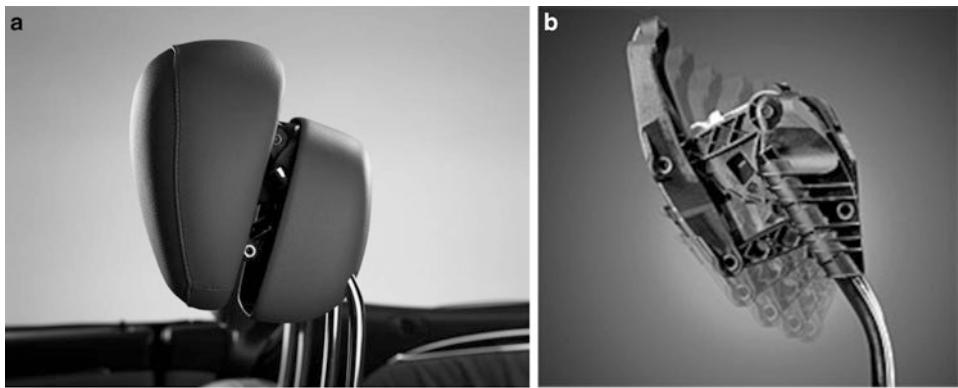
Eine Möglichkeit, den horizontalen Abstand zwischen Hinterkopf des Insassen und der Kopfstütze im Falle einer Heckkollision zu überwinden kann in der „aktiven“ **Kopfstütze** gesehen werden, die zwar von Saab bereits in den 1980er Jahren verbaut wurde, bisher aber nur wenig Verbreitung fand. Beim Unfall wird der Insasse aufgrund des eingeleiteten Auf-fahrimpulses gegen die Rückenlehne gepresst und betätigt dabei das mechanische Kraftsystem. Dadurch bewegt sich die Kopfstütze in Sekundenbruchteilen nach vorne (Abb. 4.68).



**Abb. 4.68** Automatisierte, mechanisch aktivierte Kopfstütze (Grafik: Saab)

Die von Mercedes-Benz entwickelte **Neck-Pro-Kopfstütze** wird durch einen elektronischen Impuls aus dem Steuergerät aktiviert: Wird durch die Sensorik eine Heckkollision mit einer bestimmten Aufprallschwere erkannt, gibt sie vorgespannte Federn frei und die Kopfstütze wird in kürzester Zeit (weniger als 50 ms) etwa 40 Millimeter nach vorn und um 30 Millimeter nach oben geschoben. So soll ein frühzeitiges Abstützen des Kopfes gewährleistet und das Risiko einer HWS-Distorsion im Falle eines Heckaufpralls verhindert werden. Nach der Auslösung lässt sich die Kopfstütze mittels eines mitgelieferten Werkzeugs entriegeln und manuell in die Ausgangspositionen zurückziehen (Abb. 4.69). Eine ähnliche Variante existiert mit pyrotechnischer Auslösung und ist mit Austausch der Gaspatrone ebenfalls reversibel.

Ein anderes Prinzip zur Vermeidung der Langzeitfolgen von HWS-Verletzungen an Frontinsassen nach Heckkollisionen verfolgt das von Autoliv als WHIPS (Whiplash Protection System) oder AWS (Anti-Whiplash-System) bezeichnete und von Volvo im Jahr 2000 eingeführte System. Die Technologie beinhaltet ein Schablonengetriebe im Lehnenvorsteller, in das ein Deformationselement integriert ist. Bei einem heftigen Heckaufprall wird zunächst ein Stift abgescherkt und dann das Deformationselement unter Energieaufwand verformt. Dadurch bewegt sich die Rückenlehne zunächst parallel nach hinten, vollführt



Fotos: Daimler AG, atzonline.de

**Abb. 4.69** Reversible Kopfstütze „Neck Pro“ nach Mercedes-Benz, (a) im ausgefahrenen Zustand, (b) Kinematik-Animation

anschließend eine Rotationsbewegung von bis zu  $25^\circ$  und stellt bei einer noch stärkeren Belastung eine stabile Haltefunktion sicher. In Abb. 4.70 sind Aufbau und Funktion dieses Systems dargestellt.



**Abb. 4.70** Aufbau und Wirkungsweise des Schutzsystems zur Vermeidung von HWS-Distorsionen WHIPS (Foto und Grafik: Autoliv)

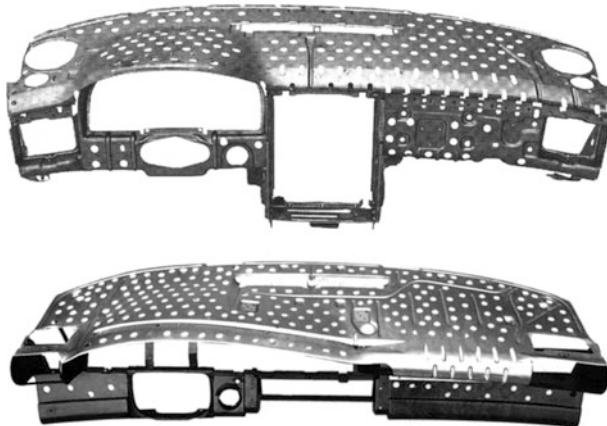
Die **Lenkeinrichtung** stellt im Kollisionsfall für den Fahrer einen potentiellen Kontaktbereich dar. So besteht für den angegurteten Fahrer, bei einer entsprechenden Unfallschwere und Sitzposition auch bei Einsatz von Airbags die Gefahr des Kopf- und Brustanpralls auf das Lenkrad. Bereits vor der serienmäßigen Einführung des Airbags bestand daher die Notwendigkeit, den Lenkradkranz, die Speichen und die Lenkradnabenabdeckung zu verrunden und mit einem splitterfreien Material zu umschäumen. Die tiefer im Lenkrad angeordnete Nabe ist zusätzlich durch ein verformbares Lochblech (Abb. 4.71) oder einen energieabsorbierenden Schaum abgedeckt. Die nahe liegende, von Audi 1986 eingesetzte Lösung, das Lenkrad nach vorne aus dem Kopf-Kontaktbereich mit Hilfe des procon-ten-Systems (procon steht hier für **programmed contraction**, ten für **tension**) wegziehen [38], wurde von der rasanten Airbag-Entwicklung überholt.



**Abb. 4.71** Prallpolster und verformbares Lochblech zur Abdeckung der Lenkradnabe (Foto: Mercedes-Benz)

Mit der Einführung des Airbags übernahm die Lenkeinrichtung weitere Funktionen: Sie dient zum einen der Aufnahme des Fahrer-Airbag-Moduls, beinhaltet die Airbag-Abdeckung und nimmt die Abstützkräfte beim Eintauchen des Oberkörpers in den Airbag auf. Neuere Untersuchungen zeigen zudem, dass unter Nutzung des Energieaufnahmevermögens der Lenkeinrichtung durch deren plastische Verformung ab einer bestimmten Schwelle selbst beim Airbag-Einsatz die Insassen-Belastungswerte noch um bis zu 25 % reduziert werden können [33].

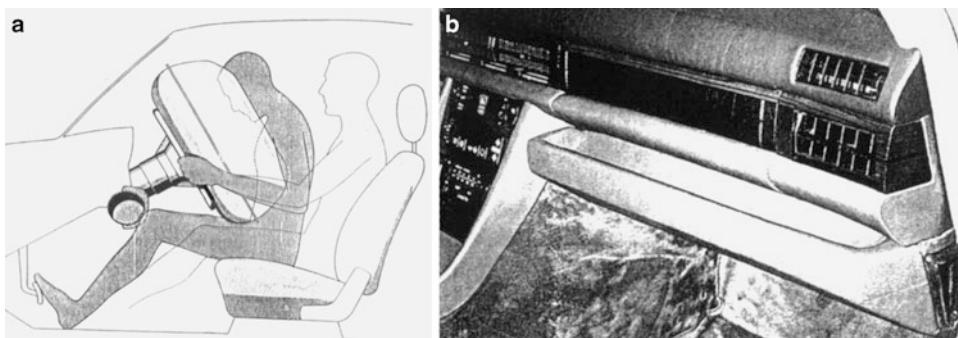
**Abb. 4.72** Energieabsorbierender Schalttafelträger (Foto: Audi)



Die **Armaturentafel** ist durch Form und Aufbau, insbesondere im Aufschlagbereich des Beifahrers, energieabsorbierend ausgelegt. Durch gezielt angeordnete Durchbrüche im Trägerteil (Abb. 4.72) ist die Schalttafel in Aufschlagrichtung deformierbar, die erforderliche Quersteifigkeit hingegen bleibt erhalten. Die weich abgerundete, reißfeste Polyvinyl-Außenhaut ist mit energieabsorbierendem Polyurethan-Schaum hinterlegt [38] und bietet somit zusätzlichen Schutz beim direkten Anprall des Insassen bzw. bei Durchschlagen des Airbags im Falle einer entsprechend hohen Unfallschwere.

Mit der Entwicklung des Seiten-Airbags wurden in einer Studie [32] Überlegungen angestellt, in Verbindung mit dem Gurt-System ein **Airbag-System** zu entwickeln, das

dem Schutzbedürfnis sowohl bei Frontal- als auch bei Seitenkollisionen nachkommt. Dabei sollte sich im Kollisionsfall der kombinierte Front-/Seiten-Airbag aus dem Sitz heraus entfalten und nicht nur dem Oberkörper, sondern bei Seitenkollisionen auch dem Becken Schutz bieten. Allerdings war das kombinierte System nicht geeignet, die Belastung beim Kopfanprall zu reduzieren. Zudem war die Schnelligkeit des Gasgenerators nicht annähernd ausreichend, ohne gleichzeitig bei Out-of-Position-Situationen ein zusätzliches Verletzungsrisiko aufzuweisen. Das im Sitz integrierte Gurtsystem enthielt bereits Gurtstraffer sowohl am Schloss als auch im Aufroller. Zusätzlich nahm die Sitzlehne das Fond-Airbag-Modul auf. Der auf der Studie beruhende Entwurf wurde in seiner Gesamtheit nicht realisiert, doch lassen sich daran die vielfältigen Bemühungen aufzeigen, **Gurt- und Airbag-System** aufeinander abzustimmen. Eine erhebliche Motivation hierzu ergibt sich aus der Notwendigkeit, mit einem und demselben Insassenschutz-System den weltweiten, unterschiedlichen Sicherheitsanforderungen gehorchenden Markt zu beliefern, und dies unter Berücksichtigung der gleichen Schutzwirkung für unterschiedlich große und schwere Insassen. Mittlerweile führten neben einer individuellen Sensorik neuartige Gasgeneratoren und variable Gurtkraftbegrenzer zu tragfähigen, kostengünstigen Lösungen.



**Abb. 4.73** Funktionsweise eines passiven Rückhaltesystems mit Kniefänger (a) und großvolumiges Beifahrer-Kniepolster in einem amerikanischen PKW (b)

Wird bei Verwendung des Gurtsystems der untere Torso des Insassen mit Hilfe des Beckengurts zurückgehalten, so übernimmt beim Einsatz eines rein passiven Rückhaltesystems in Form des alleinigen Airbags diese Funktion der **Kniefänger**. Abbildung 4.73 zeigt schematisch die Funktionsweise sowie ein Ausführungsbeispiel aus einem amerikanischen PKW. Der Kniefänger wird unterhalb der Instrumententafel angebracht und schützt bei einer Frontalkollision die unteren Extremitäten des Insassen. Die eingeleitete Energie wird durch die Deformation des Kniefängers absorbiert und verteilt. Mittlerweile wird aufgrund des eingeschränkten Raumangebots beim Einsteigen die Kniefänger-Funktion durch Knie-Airbags (vgl. Abschn. 4.3.3) übernommen.

Es wurden bereits Seiten-Schutzmaßnahmen dargelegt, die Strukturmaßnahmen und den Seiten-Airbag zum Inhalt hatten. Hier soll nun gezeigt werden, dass der **Insassenschutz bei Seitenkollisionen** nicht an einer einzelnen Maßnahme festgemacht werden

darf, sondern dass er sich vielmehr aus mehreren kombinierten, aufeinander abgestimmten Maßnahmen zusammensetzt. Der Karosseriestruktur fällt dabei die Aufgabe zu, das Eindringen des stoßenden Fahrzeugs oder des Hindernisses weitgehend zu vermeiden und dabei dessen Geschwindigkeit herabzusetzen. Karosserieseitig wird dies einerseits durch die Versteifung der Tür mit Hilfe von Türleitschienen, häufig als Seitenschutz-Maßnahmen bezeichnet, erreicht, die mit der Stoßfängerhöhe des stoßenden Fahrzeugs korrespondieren. Zum anderen muss die Tür so ausgelegt sein, dass sie sich durch Gestaltung der Türzarge oder durch Verhakung an der A- und B-Säule bzw. der C-Säule sowie am Schweller abstützen kann. Schließlich ist die Karosserie selbst im Querverbund auszusteifen; dies wird durch die geeignete Anbindung zwischen den Säulen und der Bodengruppe und durch die Abstützung des Schwellers gegenüber dem Mitteltunnel mit Hilfe von Querträgern im Sitzbereich realisiert. In einer Studie (Uni-Car) zu Beginn der 1980er Jahre wurde die erforderliche Quersteifigkeit durch einen Querverbund zwischen den B-Säulen in Form einer energieabsorbierenden Schottwand hinter den Vordersitzlehnen sichergestellt. Infolge dessen ließ sich der Vordersitz nicht verschieben; die Anpassung an unterschiedlich große Insassen erfolgte durch Verstellung des Lenkrades und des Fußhebelwerks. Die Fahrzeug-Innenseite wird so ausgelegt, dass sie die Bewegungsenergie absorbiert und den Insassen in einer möglichst langen Zeitspanne auf die Geschwindigkeit der intrudierenden Türinnenseite bringt. Hierzu werden entweder energieabsorbierende Hartschaum-Polster eingesetzt oder Seiten-Airbags verwendet, um die Relativgeschwindigkeit zwischen der Tür-Innenverkleidung und dem Insassen anzugeleichen.

Bei Kraftfahrzeugen haben die **Windschutzscheiben** die Aufgabe, eine einwandfreie Durchsicht zu gewährleisten, Schutz gegen Einwirkungen von außen zu bieten und Verletzungen der Insassen (darüber hinaus aber auch der äußeren Verkehrsteilnehmer) zu vermeiden. Ein Verletzungsrisiko besteht bei Kontakt zwischen Insassen, insbesondere Kopf und obere Extremitäten, und den Bruchkanten der gebrochenen Scheibe. Hier können oberflächliche Schnittverletzungen, Augenverletzungen, aber auch Schädelfrakturen und Schädel/Hirn-Traumata auftreten. Beim Durchstoßen der Windschutzscheibe mit dem Kopf treten neben Weichteilverletzungen gelegentlich auch Halsverletzungen mit lebensbedrohlichen Gefäß-Lazerationen (so genannter „Halskrausen“-Effekt) auf. Zur Vermeidung derartiger Verletzungen, die mit der Einführung von Gurt- und Airbag-Systemen erheblich zurückgegangen sind, aber dennoch auftreten, stellt die Windschutzscheibe eine Sicherheitsmaßnahme dar, deren Eigenschaften im Folgenden dargestellt werden soll. Nach der Art des Aufbaus unterscheidet man zwischen dem Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG), das im heutigen Fahrzeugbau nur noch bei Seitenscheiben eingesetzt wird, und dem bei Windschutzscheiben üblichen Verbund-Sicherheitsglas (VSG).

Scheiben aus **Einscheiben-Sicherheitsglas** bestehen aus einem einlagigen, vorgespannten Glas (Zugspannung im Kern und Druckspannung an der Oberfläche); die Dicke beträgt ungefähr 4,8 mm. Wird die ESG-Scheibe lokal hoch belastet, geht die innere, durch Wärmebehandlung erzeugte Spannung verloren und die Scheibe zerfällt in kleine Krümel. Je größer die Vorspannung der Scheibe ist, desto kleiner sind die Krümel nach dem Bruch.

Die Windschutzscheiben aus **Verbund-Sicherheitsglas** bestehen in der Regel aus einem Verbund von drei Lagen: Glas – Zwischenschicht – Glas, wobei das Glas nicht vorgespannt ist. Die Zwischenschicht besteht aus einer plastischen HPR-Folie (HPR: High Penetration Resistant) aus Polyvinylbutyral (PVB), einer organischen Verbindung. Die Glasschichten sind ca. 2,5 mm und die Folie ca. 0,76 mm dick; somit ist die VSG-Scheibe dicker als die ESG-Scheibe. Gegenüber dem ESG ist die Bruchfestigkeit des Verbund-Sicherheitsglases aufgrund der fehlenden Vorspannung deutlich niedriger (300 gegenüber 2.000 daN/cm<sup>2</sup>). Zum Durchschlagen einer VSG-Scheibe ist allerdings ein höherer Energieaufwand erforderlich. Bei diesen Scheiben kommt es bei relativ niedrigen Belastungen bereits zu ersten Rissen im Glas. Das Rissbild nach einem Anprall ist sternförmig oder spinnennetzartig ausgebildet und im Wesentlichen auf die unmittelbare Umgebung des Belastungspunktes beschränkt. Nach dem Bruch des Glases wird durch die Dehnbarkeit der Folie weitere Energie aufgenommen, erst nach einer relativ großen Ausbeulung treten in der Folie Risse auf, und die VSG-Scheibe kann durchgeschlagen werden. Die Festigkeitseigenschaften der Folie sind feuchtigkeits- und temperaturabhängig, sie reißt im feuchten Zustand leichter als im trockenen. Das Temperatur-Optimum bezüglich Energieaufnahmevermögen liegt bei 20 bis 23 °C; außerhalb dieses Bereiches weist die VSG-Scheibe eine geringere Durchschlagfestigkeit auf.

Neben der Dreischicht-VSG-Scheibe findet neuerdings die Vierschicht-Verbundglasdecke (Sekuriflex) als Windschutzscheibe Anwendung, bei der die drei Lagen der Dreischicht-Scheibe innen mit einer weiteren Kunststoff-Folie versehen werden. Hierdurch wird auch bei starkem Anprall jegliche Splitterwirkung durch die innere Glasscheibe vermieden. Der Scheibenaufbau ist charakterisiert durch

- die äußere Glasscheibe (2,6 mm), die die mechanische Stabilität sicherstellt und Schutz gegen Abrieb bietet,
- die elastische Zwischenschicht (0,76 mm) mit hoher Energieabsorption,
- die innere Glasschicht (2,6 mm) zum Schutz des PVB-Energieabsorbers und
- die Schutzfolie (0,5 mm) zum Schutz gegen Schnittverletzungen.

Die Vierschicht-VSG-Scheibe weist die gleiche optische Qualität und großenordnungsmäßig die gleichen HIC-Werte (vgl. Tab. 4.2) auf wie die Dreischicht-VSG-Scheibe, zeigt aber Vorteile hinsichtlich einer um ca. 25 % höheren Durchschlagfestigkeit, eines besseren Verhaltens bei Abrasion (Abrieb) und Verkratzung und einer besseren Beständigkeit gegen höhere Temperaturen und Luftfeuchtigkeit, insbesondere bei kombinierter Einwirkung von Temperatur, Feuchte und Sonnenbestrahlung sowie bei Temperaturwechsel. Allerdings sind gewisse Vorsichtsmaßnahmen bei der Handhabung und bei der Montage erforderlich.

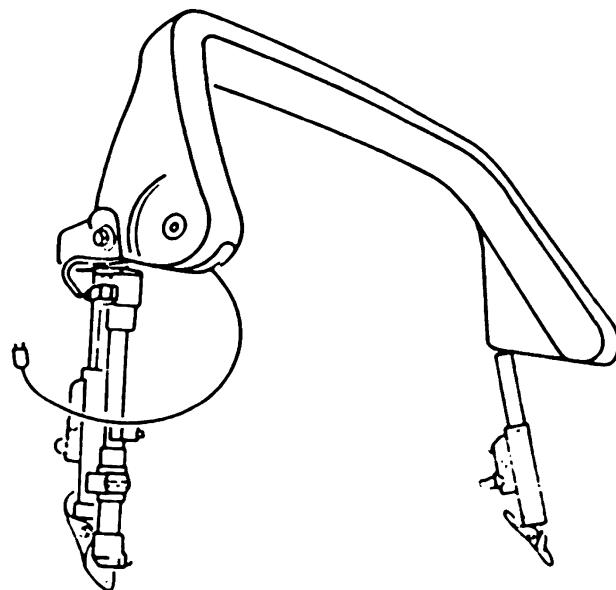
Bei Cabriolets muss wegen des fehlenden Daches die Struktur der Bodengruppe großvolumiger ausgelegt werden als bei Limousinen. Zur Sicherstellung des Überlebensraumes beim Überschlag kommen **Überrollbügel** zum Einsatz, die entweder starr angeordnet sind oder im Unfall aus einer Ruhelage herausschnellen; ein automatisch wirkender Überroll-

**Tab. 4.2** Kopfbelastungswerte als Ergebnisse aus Schlittenversuchen mit verschiedenen Windschutzscheiben [13]

Windschutzscheibe	Glasdicke	HIC	$a_{\max}$	Schnittverletzungen	
	[mm]	[ - ]	[g]	Anzahl	Tiefe
Einsch.-Sicherheitsglas (ohne Bruch)	5,0	1.600	200	keine	entfällt
Einscheiben-Sicherheitsglas	5,0	2.400	190	mittel	schwer
Verbundglas (symmetrisch)	2,6 / 2,6	500	150	gering	schwer
Verbundglas (asymmetrisch)	2,6 / 2,2	500	190	hoch	mittel
Verbundglas (asymmetrisch)	2,6 / 1,7	280	120	mittel	gering
Verbundglas (Sekuriflex)	2,6 / 1,7	380	130	keine	entfällt

bügel ist in Abb. 4.74 gezeigt. Der aus hochfestem Stahlrohr bestehende, mit Polyurethan umschäumte Bügel ist klappbar angeordnet. Im Ruhezustand ist er vor dem Verdeckkasten abgelegt und bildet nach hinten mit der Verdeckkasten-Oberfläche eine optisch ansprechende, geschlossene Ebene [39]. In Abb. 4.75 ist eine Lösung dargestellt, bei der der Überlebensraum durch die gedachte Ebene charakterisiert wird, die man sich über die Hauben-Vorderkante und die in Sekundenbruchteilen ausgefahrenen Fond-Kopfstützen aufgespannt vorstellen kann; hierbei übernehmen die Fond-Kopfstützen gleichzeitig die Funktion des Überrollbügels.

**Abb. 4.74** Automatisch ausklappbarer Überrollbügel  
(aus [39])



**Abb. 4.75** Fond-Kopfstützen übernehmen die Funktion des Überrollbügels bei einem Cabriolett (Foto: Volvo)



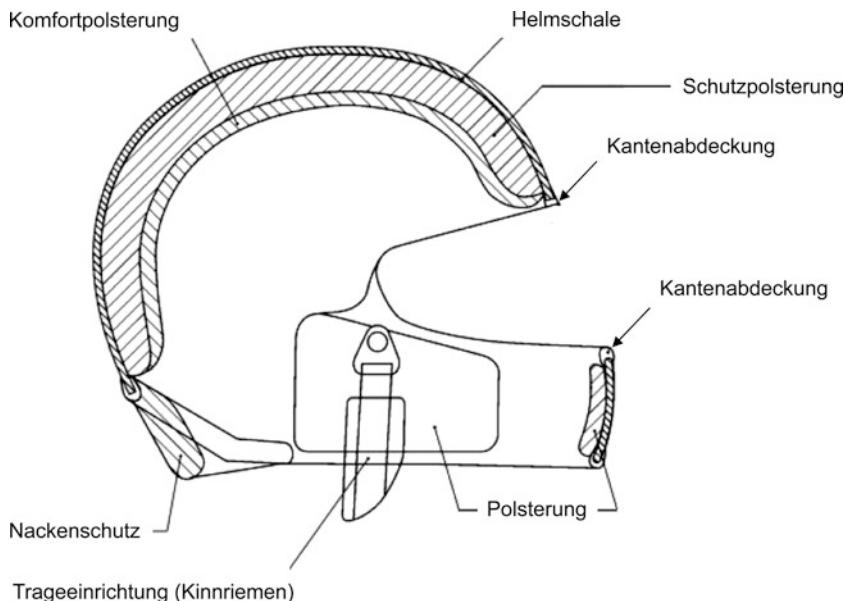
#### 4.3.5 Selbstschutzmaßnahmen für Zweirad-Fahrer

Zweiradfahrer gehören zweifelsfrei zu den Verkehrsteilnehmern mit einem erheblich höheren Verletzungsrisiko beim Unfall im Vergleich zu PKW-Insassen. Begründet ist dies durch die vergleichsweise geringe Deformationsstruktur und das im eigentlichen Sinn nicht vorhandene Rückhaltesystem. Gerade deshalb wurden mit steigender Benutzung von Zweirädern, sowohl motorisiert als auch nicht-motorisiert, und der damit in Verbindung stehenden gestiegenen Unfallrate in den letzten Jahren erhebliche Anstrengungen zur Verbesserung der passiven Sicherheit unternommen.

Einen wirksamen Schutz im Falle eines Sturzes oder eines Aufpralls stellen die – zumindest für motorisierte Zweiradfahrer (Fahrer von Krafträder mit und ohne Beiwagen, von Mopeds und von Fahrrädern mit Hilfsmotor) – gesetzlich vorgeschriebenen Schutzhelme sowie die Schutzkleidung dar.

Motorrad-Helme haben im Wesentlichen die Aufgabe, die Benutzer gegen Stöße zu schützen. Darüber hinaus sollen sie ein Höchstmaß an Trage- und Benutzungskomfort bieten. Die **Schutzhelme** lassen sich in Jet-Helme und Integralhelme unterteilen. Der **Jet-Helm** ist in der Gesichtspartie offen; deshalb ist es unbedingt erforderlich, dass er nur in Verbindung mit einer Motorrad-Schutzbrille, die bruchfeste Gläser und weiche Ränder aufweist, getragen wird. **Integral- oder Vollschutz-Helme** bieten durch ihre geschlossene und damit stabilere Bauform mit Kinnbügel einen höheren Schutz vor Verletzungen beim Unfall.

Der **Aufbau von Schutzhelmen**, dargestellt in Abb. 4.76, ist äußerlich gekennzeichnet durch die stabile, widerstandsfähige Außenschale (Helmschale), die den Helmträger vor Stoß- und Schnittverletzungen schützt; auftretende Stoßkräfte werden gleichmäßig über eine größere Fläche verteilt. Die Schutz- und die Komfortpolsterung, in der Regel aus Polystyrol-Schaum, verhindert die ungedämpfte Weiterleitung der Stoßenergie an den Kopf. Sie kann bereits durch eine einmalige heftige Belastung oder mutwillige Veränderung beschädigt werden. Darüber hinaus sorgt die Polsterung des Schutzhelms für den sicheren Sitz des Helms und einen möglichst hohen Tragekomfort. Dem Nackenpolster fällt die Aufgabe zu, die empfindlichen Halswirbel vor Verletzungen zu schützen. Der



**Abb. 4.76** Typischer Aufbau eines Motorrad-Schutzhelms [40]

untere Teil des Gesichts wird durch den Kinnbügel abgedeckt, der entweder mit dem Helm fest verbunden ist oder, über ein Scharnier mit dem Helm gelenkig verbunden, hochgeklappt werden kann. Das Visier schließlich ist ein vor dem Gesicht im Bereich von Augen und Nase angebrachtes durchsichtiges Schild, das Insekten und Staubpartikel abhält und eine korrekte und verzerrungsfreie Sicht ermöglicht. Im Fall eines Aufpralls soll der Schutzhelm am Kopf verbleiben, hierzu muss die Trageeinrichtung (Kinnriemen) eine ausreichend hohe Festigkeit aufweisen, sie muss sich im Rettungsfall aber auch sicher und schnell lösen lassen. Für Fahrrad-Helme, für die ein gesetzlich vorgeschriebener Tragezwang gelegentlich diskutiert wird, gelten die gleichen Prinzipien, allerdings sind die Anforderungen hinsichtlich der Energieabsorption deutlich geringer. Sie sind erheblich leichter und decken am Kopf lediglich Schädeldach und Hinterkopf ab.

Zur Helmherstellung werden **duroplastische Kunststoffe** eingesetzt. Die im Auflegeverfahren und anschließendem Heißpressen hergestellten GFK- oder Glasfiber-Helme sind unempfindlich gegen Witterungseinflüsse und Lösungsmittel, weisen aber ein verhältnismäßig hohes Gewicht auf. Durch den Ersatz von Glasfaser- durch Kohlefaser-Material wird der Helm leichter, er ist aber in der Regel auch teurer. Duroplastische Kunststoffe sind sehr alterungsbeständig, allerdings verschlechtert sich die Stoßdämpfungseigenschaft der Helm-Innenausstattung bei längerem Gebrauch, so dass GFK-Helme eine geringere Lebensdauer aufweisen. Aus

**thermoplastischen Kunststoffen** gegossene Helme sind von gleichmäßigerer Qualität, leichter und preiswerter als GFK-Helme. Sie besitzen jedoch eine geringere Alterungsbe-

ständigkeit und sind empfindlicher gegen Lösungsmittel, wie z. B. Benzin, Spiritus oder Kleber.

Ein wirksamer Schutz des Nacken- und Wirbelsäulenbereichs ist insbesondere im Rennsport von großer Bedeutung. Dabei wird das Ziel verfolgt, die Gefahr von Verletzungen im Hals-Bereich, des Rückenmarks und des Schlüsselbeins bei schweren Kollisionen durch einen **Nackenschutz** zu verhindern oder zumindest zu reduzieren. Der Kopf kann dabei nach vorne, nach hinten oder zur Seite überdehnt oder aber die HWS durch Krafteinwirkung auf den Helm gestaucht werden. Der Schutzpanzer aus carbonfaserverstärktem Kunststoff, Dämpfungsmaterial und Titan legt sich wie eine Halskrause um Nacken, Schulter und Brust des Helmträgers ohne die Bewegungsfreiheit des Kopfes übermäßig zu beeinträchtigen (Abb. 4.77).

**Abb. 4.77** Nackenschutz für Helmträger (Foto: BMW)

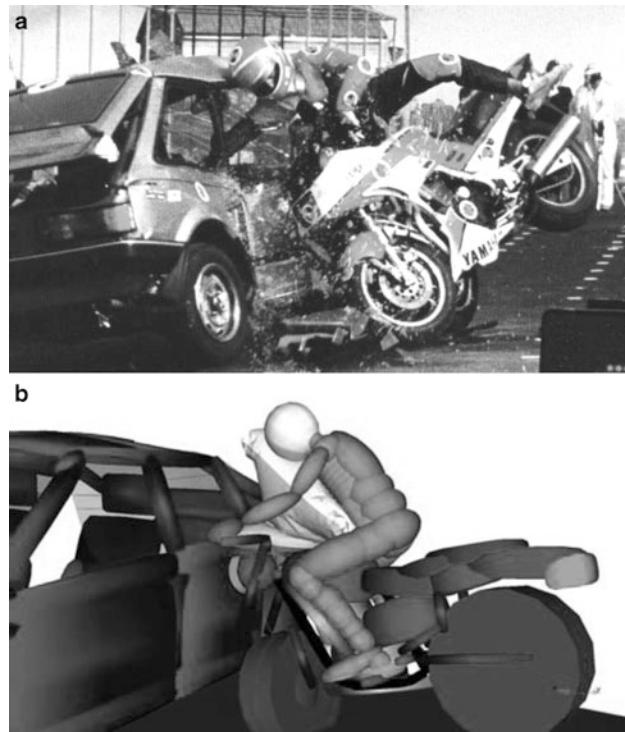


Die **Schutzkleidung** dient sowohl der aktiven als auch der passiven Sicherheit: Neben dem Tragekomfort sind Aspekte wie Wetterschutz, Aerodynamik, Signalbild und Selbstschutz beim Unfall zu berücksichtigen. Sie bestehen traditionell aus Leder oder aus mehrschichtigen Textilien. Die äußere Schicht, z. B. aus einem Material wie Cordura, muss extrem abriebfest sein. Zwischen der Außenschicht und dem inneren Futter werden Ma-

terialien (beispielsweise Goretex oder Sympatex) verwendet, die wasserdicht und gleichzeitig luftdurchlässig sind. Sturzgefährdete Körperpartien, wie Knie, Ellbogen, Schultern und Rücken, werden mit Materialien unterpolstert, die Energie absorbieren und das Abriebverhalten verbessern. Zusätzlich kommen so genannte **Protektoren** zum Einsatz, die sich durch eine hohe Aufpralldämpfung auszeichnen und ein hohes Maß an Tragekomfort aufweisen. Man unterscheidet Protektoren aus energieabsorbierendem Weichschaum und Protektoren aus Weichschaum mit einer zähen Außenschale. Gelegentlich werden auch zwei unterschiedlich feste Weichschäume miteinander verklebt. Der Einsatz äußerer Hartschalen dient der großflächigen Verteilung der auftretenden Stoßenergie und damit der Reduzierung der Belastung bei scharfkantigem Anprall. Stabile und am Handrücken gepolsterte **Handschuhe** sowie dicke, bis über die Waden reichende **Motorrad-Stiefel** ergänzen die wirkungsvolle Schutzbekleidung.

Ein hohes Verletzungsrisiko für Motorradfahrer stellt sich bei Kreuzungsunfällen mit PKW ein, da der Kopf aufgrund der geometrischen Gegebenheiten häufig gegen den steifen Dachrahmen am Automobil prallt (Abb. 4.78). Im Unfallgeschehen zählen derartige Konstellationen zu den häufigsten Todesursachen von Motorradfahrern, denn bereits bei relativ geringen Geschwindigkeiten überschreiten die Kopfbeschleunigungen auch bei Schutzhelm-Benutzung die tolerierbare Schwelle. Eine Möglichkeit, den Anprall zu vermeiden oder die Folgen zumindest zu minimieren, kann in der Verwendung eines

**Abb. 4.78** PKW/Motorrad-Seitenkollision, **a** im Crash-Versuch (aus [41]) und **b** mit Motorrad-Airbag in der rechnerischen Simulation (aus [42])

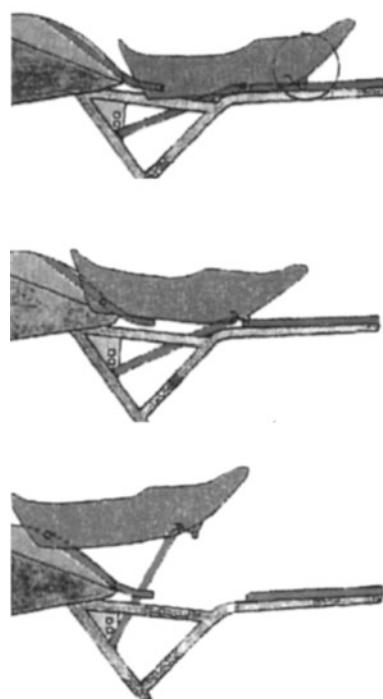


**Motorrad-Airbags** gesehen werden, der auf zwei verschiedene Arten wirken kann: Ähnlich den Airbags für Insassen von PKW soll sich der im Lenker oder im Tank montierte Luftsack vor Kopf und Brust des Motorradfahrers entfalten. Eine zweite Variante besteht darin, die Abwurfbewegung der Aufsassen zu unterstützen. Dies kann durch die Form oder die Einbaulage, beispielsweise unter dem Sitz, realisiert werden. Allerdings besteht generell ein hohes Verletzungspotential durch Out-of-Position-Situationen, die aufgrund erhöhter Halskräfte, -biegemomente sowie Kopf- und Brustbeschleunigungen Verletzungen induzieren können.

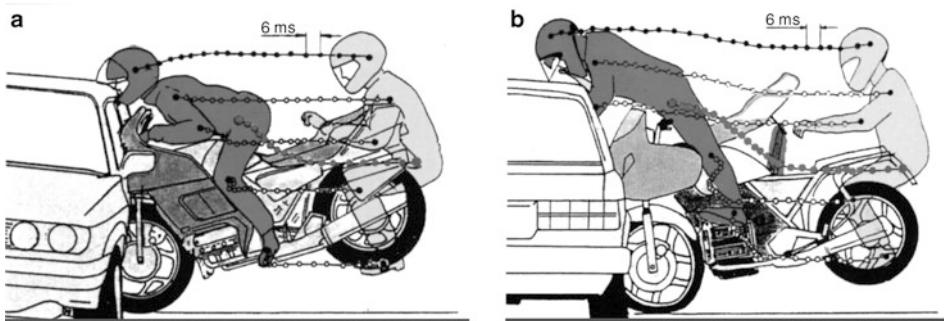
Dass die Anhebung des Kopfes über die Dachkante des PKW hinaus zur Reduzierung der Kopfbelastung führt, konnte für PKW/Motorrad-Kollisionen in verschiedenen Untersuchungen (z. B. in [41]) nachgewiesen werden. Eine solchermaßen gezielt eingesetzte **Beeinflussung der Kinematik** von Motorradfahrern lässt sich zum einen durch die Fixierung der Unterschenkel in dem Sinn erreichen, dass sich der Beugewinkel in den Knien vergrößert und der Oberkörper des Fahrers aufgerichtet wird. Zudem kann eine an die angewinkelten Beine geführte Verkleidung (Fairings) vor Beinverletzungen schützen und die Abwurfbewegung des Fahrers begünstigen. Tank- und Lenkergestaltung besitzen einen wesentlichen Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Motorradfahrers während eines Unfalls. Bei Motorradtanks hat sich ein Winkel von 40 bis 45° als günstig herausgestellt: Ein zu flacher Tank bewirkt einen ungedämpften Oberschenkelanprall auf den Lenker und die Kanzel. Dagegen bewirkt ein zu steiler Tank eine Rotation des Oberkörpers um das Becken, so dass sich der Kopf weiterhin in einer verletzunggefährdenden Position befindet. Die Anordnung des Lenkers nimmt direkten Einfluss auf die Höhe der Sitzposition und auf die Schwere der Oberschenkelverletzungen. Tief angeordnete Lenker (z. B. bei Sportmaschinen) erzwingen eine geduckte Sitzposition, die die Bewegung des Kopfes aus dem Gefahrenbereich heraus verhindert. Hohe Lenker (z. B. bei Choppern) fördern zwar eine aufrechte Sitzposition, allerdings verhakt sich der Körper während einer Kollision am Lenker und kann die angestrebte Flugbahn nicht erreichen. Die günstigsten Eigenschaften bietet ein Tourenlenker. Bei einer anderen Lösung gleitet die Sitzbank im Falle einer Kollision nach vorne und wird mittels eines Hebelmechanismus angehoben [41], dargestellt in Abb. 4.79. Infolge dessen wird der Oberkörper des Motorradfahrers aufgerichtet und so angehoben, dass ein Anprall auf den PKW-Dachrahmen verhindert wird; in Abb. 4.80 ist der Bewegungsablauf ohne und mit dem Abhebemechanismus gezeigt. Der serienmäßige Einsatz der kinematischen Sitzbank hat sich allerdings nicht durchsetzen können.

Bei Alleinunfällen von motorisierten Zweirädern stellt der Kontakt zwischen verunfallten Personen, den so genannten Aufsassen, und dem Motorrad nach dem Sturz ein hohes Verletzungspotential dar. Aus der Analyse von mehreren hundert Alleinunfällen sowie durch experimentelle und umfangreiche rechnerische Simulationen wurde ein Konzept für **Gleit- und Stopper-Einrichtungen** am Motorrad erarbeitet, das darauf beruht, das gestürzte und am Boden rutschende Motorrad durch eine kontrollierte Auslauf-Kinematik in seinem Bewegungsverhalten relativ zum Fahrer so zu beeinflussen, dass sich der Fahrer von der Maschine löst [43]. Dieses Lösen wird durch drei exakt berechnete Auflagepunkte erreicht, die am Motorrad beidseitig in die Vollverkleidung integriert wurden: zwei Stop-

**Abb. 4.79** Anheben der Motorrad-Sitzbank beim Unfall zur Beeinflussung der Fahrer-Kinematik (aus [41])



per vorn und hinten mit dem größtmöglichen Abstand vom Radaufstandspunkt mit einer rutschfesten Oberfläche und einem Gleiter in der Nähe der Fußrasten aus entsprechendem Kunststoff-Material. Sie sorgen dafür, dass dem Motorrad, unabhängig davon, ob das Vorder- oder das Hinterrad wegrutscht, eine Kinematik aufgezwungen wird, die das Tren-



**Abb. 4.80** Wirkungsweise der hebel-kinematischen Motorrad-Sitzbank; **a** konventionell, **b** mit Hebel-Kinematik (aus [41])

nen zwischen Fahrer und Maschine ermöglicht. Überdies verhindert die entsprechend gestaltete Motorradseite das Einklemmen des Fahrers zwischen Motorrad und Fahrbahn.

#### 4.3.6 Selbstschutzmaßnahmen für Nutzfahrzeuge

Vor dem Hintergrund eines weiterhin wachsenden Verkehrsaufkommens, dem Wegfall der innereuropäischen Grenzen und dem somit zunehmenden Angebot an Transportdienstleistungen ist die Erhöhung der Unfallzahlen mit Nutzfahrzeugbeteiligungen unübersehbar.

Aufgrund der besonders unterschiedlichen Größen- und Massenverhältnisse zwischen Nutzfahrzeugen (NFZ) einerseits und andererseits PKW, Krafrädern, Fahrrädern oder Fußgängern handelt es sich bei dieser Kollisionsart, d. h. bei Unfällen mit NFZ-Beteiligung, um eine vielschichtige, wenn nicht sogar die vielschichtigste Gruppe im Straßenverkehr. Daraus lassen sich Forderungen ableiten, die für die passive Sicherheit überaus bedeutsam sind, denn das höhere Verletzungsrisiko liegt eindeutig auf Seiten der involvierten Personen der Kollisionskontrahenten. Dennoch wäre es fahrlässig, den Selbstschutz, also den Schutz der Nutzfahrzeuginsassen, zu vernachlässigen.

In modernen Nutzfahrzeugen stehen heutzutage umfangreiche Sicherheitsausstattungen zum Schutz der Insassen zur Verfügung. Eine Armaturentafel, deren härtere Komponenten tief im Armaturenbrett eingebaut wurden, wirkt als Knieschutzträger und absorbiert die Energie der Insassen. Weiche, nachgiebige und reißfeste Oberflächen vermeiden Schnittverletzungen beim Anprall. Ein weiteres Verletzungspotential bietet die Lenksäule mit dem dominanten Lenkrad. Durch konstruktive Maßnahmen wird eine sehr flache Position des Lenkrades realisiert, so dass in Unfallsituationen der Brustbereich, und nicht den Kopf/Hals-Bereich des Fahrers betroffen ist. Dies ist, wie in Abschn. 3.1.3 ausgeführt, der höher belastbare Teil des Oberkörpers. Zusätzlich verformt sich das Lenkrad und nimmt dabei Energie auf. Airbags weisen mittlerweile Serienreife auf und werden von einigen Herstellern als aufpreispflichtiges Zubehör angeboten. Aufgrund der aufrechten Sitzposition ergibt sich ein günstiger Verlauf des Sicherheitsgurtes, so dass ein Abtauchen (Submarining) und daraus resultierende Becken- und Abdominalverletzungen nicht zu erwarten sind. Allerdings haben Untersuchungen ergeben, dass die Akzeptanz von Gurten bei Fahrgästen von Nutzfahrzeugen (LKW und Omnibusse) sehr gering ist; die Gurtanlege-Quote beträgt hier nur 25,7 % im Vergleich zu der von PKW-Fahrern von immerhin 89,4 % [17]. Aus diesem Grund werden im Fahrersitz integrierte Gurte angeboten, mit denen eine bessere Anpassung an Sitzposition und Körpergröße des Fahrers erreicht wird. Zudem wirken die integrierten Gurte mit einer geringeren und konstanten Federkraft, um das als lästig empfundene Tragegefühl bei gefederten Sitzen zu minimieren. Zusätzlich installierte Gurtwarner unterstützen die Bemühungen um eine höhere Gurtanlege-Quote.

Aufgrund der Längenbegrenzung von Nutzfahrzeugen werden in Europa nahezu vollständig Frontlenkerfahrzeuge eingesetzt. Die Insassen sitzen daher bei Frontalkollisionen im unmittelbaren Gefahrenbereich, da diese Fahrzeuge nicht über eine, wie bei PKW

übliche Deformationsstruktur verfügen. Zur Steigerung der Festigkeit und zur Bereitstellung des erforderlichen Energieaufnahmevermögens werden im Fahrerhaus lange, nicht gekröpfte Fahrerhaus-Längsträger und gerade Schweller verbaut. Diese Strukturen verhindern ein Einknicken und sichern so den Überlebensraum für die Insassen. Ausgesteifte A-Säulen, Profile in der Rückwand und Verstärkungen im Dachbereich fördern zudem die Stabilität des Fahrerhauses. Die in den Strukturprofilen verklebten Scheiben erhöhen die Steifigkeit und verhindern ein Herausschleudern der Passagiere während eines Überschlages. In Tab. 4.3 sind Testverfahren für passive Sicherheitskomponenten von Nutzfahrzeugen dargestellt. Unverständlich allerdings erscheint, dass derzeit keine gesetzlich festgelegten Schutzkriterien für NFZ-Insassen existieren.

**Tab. 4.3** Testverfahren für passive Sicherheitskomponenten von Nutzfahrzeugen

Verfahren	ECE-R 29	VVFS 1994: 22 (Schwidentest)
Front (Pendelschlag)	$m = 1.500 \pm 250 \text{ kg}$ $A = 2.500 \times 800 \text{ mm}$ $v = 25 \text{ km/h}$	$m = 1.500 \pm 250 \text{ kg}$ $A = 2.500 \times 800 \text{ mm}$ $v = 25 \text{ km/h}$
Dach	$m = 10.000 \text{ kg (statisch)}$	$m = 13.000 \text{ kg (statisch)}$
Rückwand (Pendelschlag)	$200 \text{ kg je } 1.000 \text{ kg Nutzlast (statisch)}$	$m = 1.500 \pm 250 \text{ kg}$ $A = 2.500 \times 800 \text{ mm}$ $v = 25 \text{ km/h}$
ECE-R 66		
Überschlag	Rampenhöhe $h = 800 \text{ mm}$	–
Front (Barriere)	–	$m = 20.000 \text{ kg}$ $v = 30 \text{ km/h}$

Die bisher betrachteten Maßnahmen für den Insassenschutz in Nutzfahrzeugen gelten sowohl für Lastkraftfahrzeuge als auch für Kraftomnibusse (KOM). Im Folgenden soll jedoch speziell auf die Schutzeinrichtungen für Fahrgäste in Bussen eingegangen werden.

Bei Omnibussen gilt zuvorderst, den Überlebensraum der Fahrgäste sicherzustellen, damit bei Überschlag-Unfällen Zerstörungen der Struktur, wie in Abb. 4.81 gezeigt, vermieden werden. Dies bedeutet, dass auch für Busse **Überrollbügel** und verstieifende Dachstrukturen zurzeit noch zögerlich, aber dennoch in zunehmendem Maße realisiert werden. Ein weiterer Sicherheitsaspekt wird mit dem Einbau und den Eigenschaften der **Fahrzeugscheiben** verbunden. Im Gegensatz zur Frontscheibe, die nicht ohne weiteres zerstörbar sein darf, werden Seiten- und Heckscheiben als Zweischeiben-Sicherheitsglas hergestellt und sollen im Bedarfsfall durch die Passagiere mit dem Nothammer eingeschlagen werden, um als Notausstieg zu dienen. Bei einer Schlagbelastung zerfallen die Scheiben in nicht-scharfkantige Würfel und ermöglichen so ein schnelles und sicheres Verlassen des Fahrzeugs. Neuere Überlegungen gehen dahin, die Scheiben so auszulegen, dass sie in verstärktem Maße eher eine Schutzfunktion für die Passagiere darstellen und darüber hin-

**Abb. 4.81** Die abknickende Dachstruktur von Omnibussen lassen bei Überroll-Unfällen die verheerenden Verletzungsfolgen für die Passagiere erahnen (aus [1])



aus eine Erhöhung der Struktursteifigkeit des Fahrzeuges übernehmen sollen. Dies macht jedoch für den Evakuierungsfall eine Systemerweiterung zur „Öffnung“ der Scheiben erforderlich. Ein erstes System hierfür ist in der, in gepanzerten Limousinen bereits eingeführten Verwendung von Sprengschnüren zu sehen. Diese trennen die Scheibe vom Fahrzeug und sollen sowohl von innen als auch von außen ausgelöst werden können. Allerdings sind hierfür Schutzmaßnahmen gegen Missbrauch vorzusehen.

Die höchste Aufmerksamkeit zur Verbesserung der passiven Sicherheit in Omnibussen ist auf die **Sitze** zu richten, da sie die Schnittstelle zwischen Passagieren und Fahrzeug darstellen [44]. Die Anforderungen an deren Konstruktion und Befestigung sind in den Vorschriften ECE-R 80 bzw. 2001/85 EG formuliert. Diese Anforderungen gehen jedoch entweder nicht weit genug oder sind zu wenig konkret, so dass es noch immer möglich ist, reisekomfort-erhöhende Ausstattungen wie Aschenbecher, Klapptische und Haltegriffe im Anprallbereich der Insassen zu montieren (vgl. Abb. 4.82a). Die Ergebnisse der ECBOS-Studie auf der Basis experimenteller und rechnerischer Simulation [45] zeigen jedoch eine hohes Verbesserungspotential auf: So sollen künftig die potenziellen Kontaktstellen für Kopf und Brust von derartigen Einbauteilen freigehalten (vgl. Abb. 4.82b) und das Versagen der Sitz- und Lehnensstruktur durch eine verbesserte Auslegung vollständig vermieden werden. Weiterhin wird dort vorgeschlagen, zur Verbesserung der Sicherheit mitreisender Kinder in Überland- und Reisebussen die Befestigung von Kindersitzen nach dem ISOFIX-System einzuführen. Dies würde zweifellos die Mitnahme von Kindern im Kindersitz vereinfachen und zudem sicherer gestalten.

Die wirksamste Sicherheitsmaßnahme ist auch bei Omnibussen in der Verwendung von **Sicherheitsgurten** zu sehen, deren Einbau seit 1997 für alle Plätze in Bussen mit einem zulässigen Gesamtgewicht von mehr als 3,5 t vorgeschrieben ist. Für gefährdete Sitze – das sind Sitze, vor denen sich keine weitere Sitzreihe befindet – sind Dreipunktgurt, für

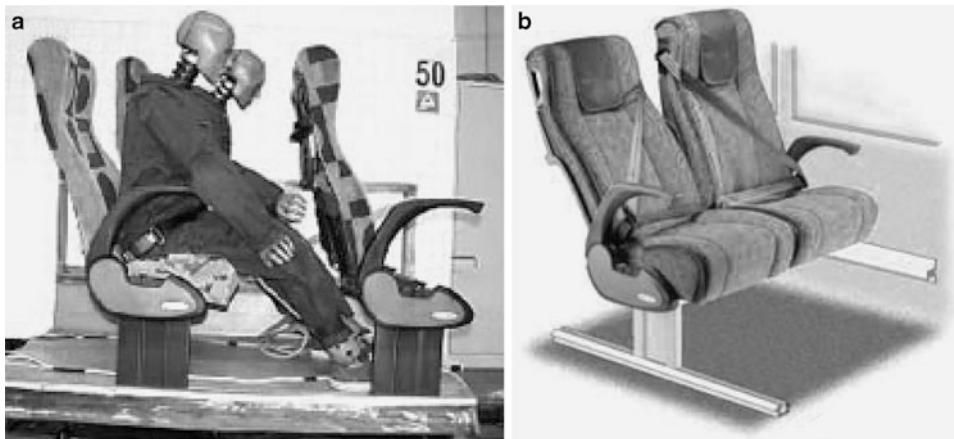


**Abb. 4.82** Komfort-Einrichtungen (Aschenbecher, Haltegriffe und Klapptische) stellen ein Verletzungspotential dar (a), lassen sich aber verletzungsvermeidend anbringen (b) – Foto: Vogelsitze

die restlichen Sitze Zweipunktgurte, also Beckengurte, einzusetzen. Dem gegenüber sind für Kleinbusse, wie z. B. VW T4 oder T5, die neu zugelassen oder wieder dem Verkehr zugeführt werden, seit 1999 Dreipunktgurt gesetzlich gefordert. Dies führte zu Diskussionen, auch für Überland- und Reisebusse Dreipunktgurtsysteme einzuführen, die zudem mit Gurtstraffern ausgestattet sein sollen, um das Herausdrehen des Passagiers aus dem Schultergurt zu verhindern [44]. In Abb. 4.83 sind mit Zwei- und Dreipunktgurtsystemen ausgerüstete Sitze dargestellt.

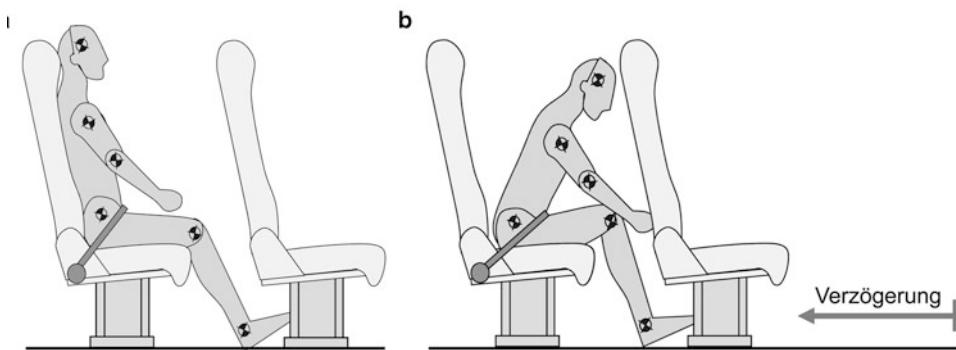
Ein weiterer Diskussionspunkt bei Rückhaltesystemen in Omnibussen konzentriert sich immer wiederkehrend auf die Verwendung und den Einbau von **Airbag-Systemen** als Alternative zum Einsatz von Schrägschulter-Gurten. Allerdings wird ihrer flächendeckenden Anwendung nach dem heutigen Stand der Technik kaum eine Realisierungschance eingeräumt, da die Einbaukosten bei neuen Bussen und die Reparaturkosten im Falle eines Unfalles zu hoch erscheinen. Abgesehen von den Kosten ist davon auszugehen, dass die mit einer Auslösung verbundene Geräuschentwicklung bei der gleichzeitigen Zündung von bis zu 60, bei Doppelstockbussen sogar bis zu 80 Airbags ein unkalkulierbares Risiko für Gehörschäden bedeuten könnte. Zudem lassen sich Out-of-Position-Situationen für die Passagiere nicht ausschließen, so dass sich deren Verletzungsrisiko eher erhöhen könnte als sich reduzieren zu lassen.

Eine Grundsatzuntersuchung auf der Basis der rechnerischen Insassensimulation zur Beantwortung der Frage, inwieweit ein Rückhaltesystem zum Einsatz gebracht werden könnte, das durch einen Beckengurt in Verbindung mit einer **energieabsorbierenden Rückenlehne** zum Auffangen des Oberkörpers und der Kopf/Hals-Region charakterisiert



**Abb. 4.83** Beispiele für Gurtsysteme in Omnibussen, **a** Zweipunktgurt im Versuch, **b** Dreipunktgurtsystem (Foto und Grafik: Vogelsitze)

wird (Abb. 4.84), konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Bei Variation der Steifigkeiten und des Energieaufnahmevermögens der Rückenlehne konnten hinsichtlich der Insassenbelastung überraschend günstige Ergebnisse erzielt werden, die zu weiterführenden Arbeiten ermuntern.



**Abb. 4.84** Passagier in Ausgangssituation (**a**) und bei Verzögerung des Omnibusses (**b**)

Eine Gefährdung für den Insassenschutzes stellen immer wieder die **Gepäckablagen** dar, da Gepäckstücke aus offenen Staufächern bei Kurvenfahrten und sonstigen Fahrmanövern herabfallen und die Fahrgäste gefährden können. Aus diesem Grunde gewinnen verschließ- und verriegelbare Ablagen, wie sie im Flugverkehr üblich sind, in zunehmendem Maße an Bedeutung.

In Linienbussen ist dem Umstand Rechnung zu tragen, dass die Fahrgäste nur kurzzeitig die Sitze einnehmen und häufig im Gang stehen. Daher sind den **Halteinrichtungen**

gen besondere Aufmerksamkeit zu widmen: Die Erreichbarkeit muss den anthropometrischen Anforderungen genügen und bei Kurvenmanövern sowie bei Brems- und Beschleunigungsvorgängen durch die Fahrgäste schnell und sicher greifbar sein. Darüber hinaus sind Ecken und Kanten durch Abrundungen und Polsterungen entschärft, um in Unfallsituationen günstige Anprall-Geometrien zu bieten (Abb. 4.85). Zur Verbesserung der Standsicherheit sind die Bodenbeläge aus rutschfestem Kunststoffmaterial hergestellt und mit dem Boden verklebt.



**Abb. 4.85** Innenraumgestaltung bei Linienbussen geprägt durch günstige Greif Sicherheit der Halteeinrichtungen und Entschärfung von Ecken und Kanten (rechte Darstellungen aus [44])

Eine besondere Bedeutung bei Unfallereignissen ist bei Omnibussen in der Forderung nach einer möglichst schnellen **Evakuierung** zu sehen. Hierzu sind gezielte Vorgaben für die Anzahl und die Größe der Fluchtwiege, d. h. Öffnungen wie Türen, Scheiben und Dachluken, nach der Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO §35) gesetzlich vorgeschrieben. Sie werden von den Herstellern in der Regel auch eingehalten oder gar überschritten, um diese Sicherheitsanforderung zu gewährleisten. Eine weitere Verbesserung der Fluchtmöglichkeiten ließe sich allerdings durch eine Auslösemöglichkeit der vorhandenen Not-Entriegelung erreichen, die von außen betätigt werden kann. Derartige Maßnahmen sind jedoch in Deutschland gesetzlich nicht vorgeschrieben.

## 4.4 Maßnahmen zum Kontrahentenschutz

Mitunter bezeichnet man Kontrahentenschutz auch als „Partner“-Schutz, obwohl sich im Zusammenhang mit Unfällen der Begriff „Partner“ beinahe von selbst verbietet. Beim Kontrahentenschutz also werden Maßnahmen unterschieden, die geeignet erscheinen, das Verletzungsrisiko des jeweiligen Kollisionskontrahenten zu minimieren. Die Kontrahenten

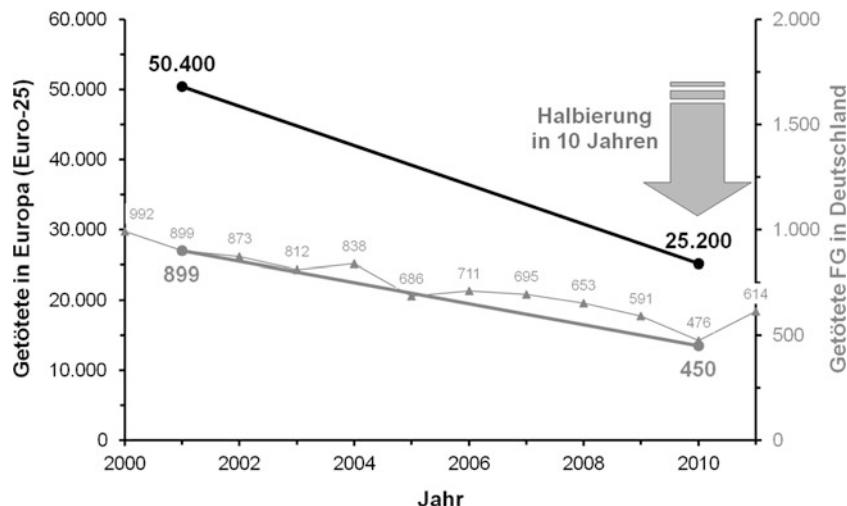
sind, wie Abb. 4.2 zeigt, zum einen aus der Sicht des PKWs (Kollisionsobjekt) die äußeren Verkehrsteilnehmer (motorisierte und nicht-motorisierte Zweiradfahrer sowie Fußgänger), zum anderen aber auch PKW-Insassen bei Kollisionen zwischen Nutzfahrzeugen (NFZ) und Personenkraftwagen (PKW).

#### 4.4.1 Maßnahmen am PKW zum Schutz äußerer Verkehrsteilnehmer

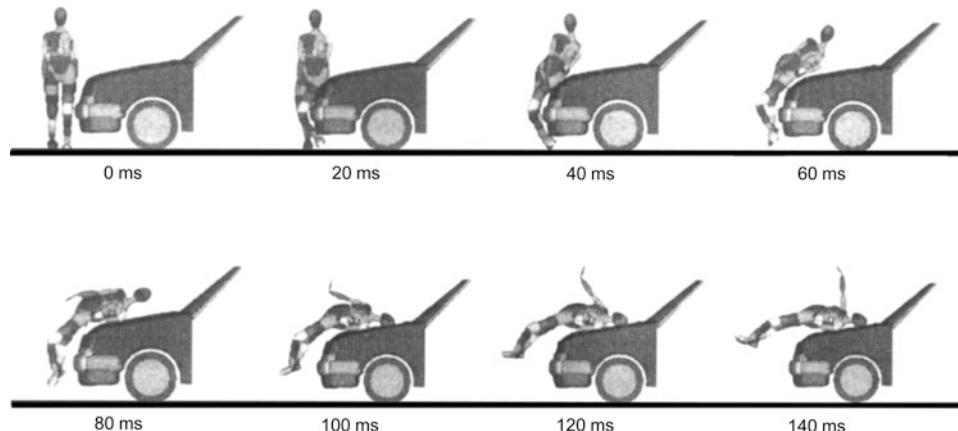
Im Jahre 2011 betrug der Anteil der getöteten Fußgänger am gesamten Verkehrsunfallaufkommen ca. 15,5 % und etwa 12,9 % der Verletzungskosten. Dabei sind die Frontalkollisionen zwischen PKW und Fußgängern von besonderer Bedeutung, da hier mehr als zwei Drittel (68,5 %) der tödlich verletzten Fußgänger (mit 71,4 % der Verletzungskosten) zu beklagen sind [1]. Konsequenterweise wurden daher Beratungen der Europäischen Kommission bereits im Jahre 1998 mit dem Ziel geführt, zur Verbesserung des Fußgängerschutzes ein Testverfahren zu etablieren, mit dessen Hilfe sichergestellt werden soll, dass bei Kollisionen mit PKW der ungeschützte Verkehrsteilnehmer (Fußgänger) durch fußgänger-„freundliche“ Fahrzeuge keine schwerwiegenden Verletzungen erleiden dürfe. Im Jahr 2003 trat demzufolge die Richtlinie 2003/102/EC zum Fußgängerschutz mit Veröffentlichung im Amtblatt in Kraft (vgl. Abschn. 6.2.3). Werden die bei Fußgänger-Unfällen getöteten Verkehrsteilnehmer auf die Zielsetzung des Weißbuches der EU-Kommission bezogen, nach der die Zahl der Verkehrstoten in Europa innerhalb einer Dekade, beginnend im Jahr 2001, halbiert werden soll (Abschn. 6.4.4), so lässt sich anhand der in Abb. 4.86 gezeigten Grafik feststellen, dass der Trend zwar Erfolg versprechend erscheint, aber dennoch große Anstrengungen unternommen werden müssen, diesem Globalziel auch weiterhin im Detail gerecht zu werden.

Bei der Betrachtung des Verletzungsrisikos von Fußgängern wird heute üblicherweise eine Kollisionsgeschwindigkeit von  $v = 50 \text{ km/h}$  zugrunde gelegt, da mit 71,2 % die weitaus meisten Unfälle zwischen PKW und Fußgängern im Innerortsbereich (mit einer Geschwindigkeitsbeschränkung bei 50 bzw. 30 km/h) auftreten [46]. Derartige Unfälle zeichnen sich durch drei **charakteristische Phasen** aus: Bein/Stoßfänger-, Becken/Haubenvorderkante- und Kopf/Haube- bzw. Kopf/Windschutzscheiben-Anprall; ein typischer Bewegungsablauf bei einer Kollision zwischen einem Fußgänger und einem konventionellen PKW mit ausgeprägter Haube ist in Abb. 4.87 gezeigt. Bei Kollisionen mit Großraum- oder Kompakt-Fahrzeug ohne Fronthaube erfolgt der Anprall gegen die gleichen Kontaktbereiche, jedoch in zeitlich kürzerer Abfolge und daher ohne größere Relativbewegung benachbarter Körperteile. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass sich für beide Beispiele eine gänzlich unterschiedliche Abwurffkinematik einstellt.

Bei den Anstrengungen zur Reduzierung des Verletzungsrisikos von Fußgängern, insbesondere von kindlichen, beziehen sich die Maßnahmen deshalb maßgeblich auf die Ausgestaltung der Kontaktbereiche Stoßfänger, Haubeneinfassung und Haubenvorderkante, Windfang sowie Windschutzscheiben und deren Einfassung. Diese Maßnahmen beziehen sich allerdings nicht nur auf die Karosserie-Außenteile, sondern gleichermaßen



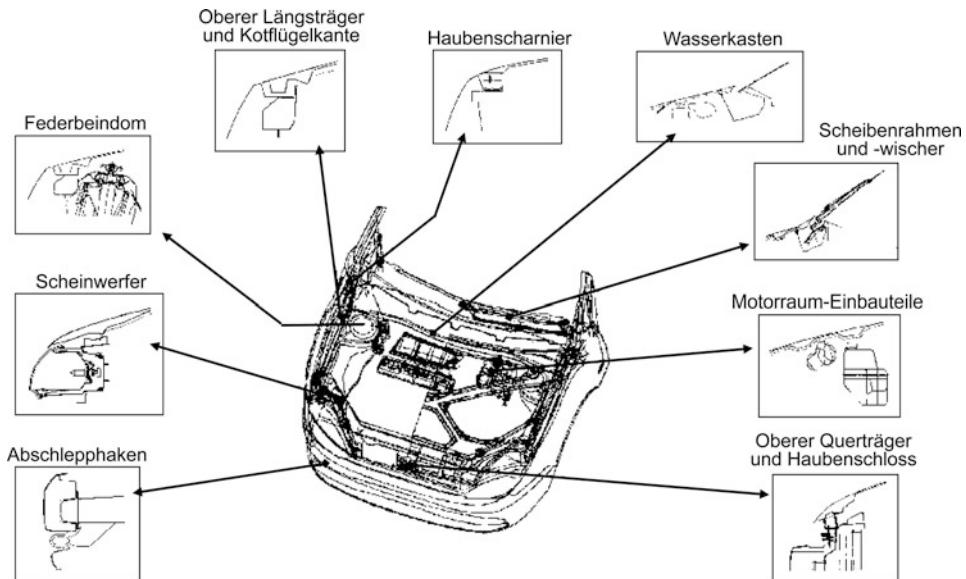
**Abb. 4.86** Zielsetzung der EU-Kommission zur Halbierung der Anzahl von Verkehrsunfallopfern und Realisierung; übertragen auf Fußgänger-Unfälle in Deutschland bis 2011



**Abb. 4.87** Charakteristische Phasen bei PKW/Fußgänger-Kollisionen bei Fahrzeugen mit einer ausgesprägten Fronthaube

auf **kritische Strukturen** unterhalb der Karosserie-Außenhaut, damit bei Kontakt menschlicher Körperteile ausreichend große Deformationswege bereitgestellt werden können. In Abb. 4.88 sind charakteristische Strukturbereiche am Fahrzeug-Vorbau zusammengefasst [46].

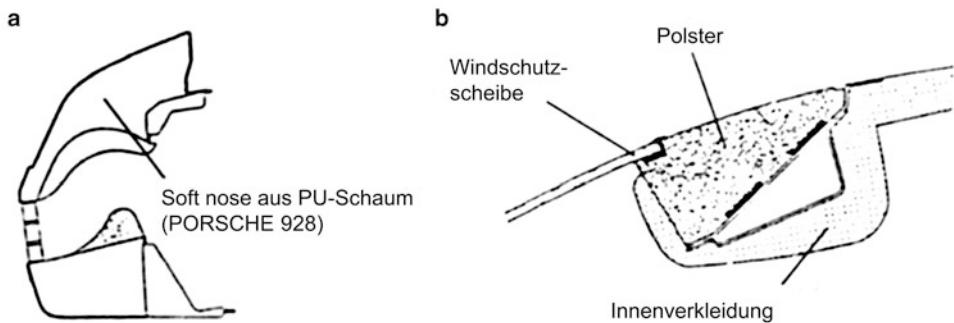
Die **Maßnahmen** zum Schutz äußerer Verkehrsteilnehmer folgen in gleicher Weise wie die zur Verbesserung der inneren Sicherheit dem Prinzip des Geschwindigkeitsangleichs (vgl. Abschn. 4.2.4). Neben der Bereitstellung ausreichend groÙe Deformationswege im



**Abb. 4.88** Kritische Stellen hinsichtlich des Fußgängerschutzes am Fahrzeug-Vorbau (aus [46])

Kontaktbereich ist gleichzeitig dafür Sorge zu tragen, dass die Kraftübertragung großflächig eingeleitet wird. Kontaktstellen dürfen daher keine hervorstehenden Kanten aufweisen. Aus diesen Gründen werden Stoßfänger großflächig ausgelegt und sind weiter nach unten gezogen. Durch den Einsatz von **energieabsorbierenden Frontstrukturen**, verformbarer Prallflächen und nachgiebiger Struktur, z. B. verformbare Kühlergrill- und Scheinwerferbefestigungen oder der Verwendung energieaufnehmender Materialien wie Polyurethan-Schaum, lässt sich nachweislich das Verletzungsrisiko von Fußgängern, aber auch von Zweirad-Fahrern reduzieren. In Abb. 4.89 sind beispielhaft entsprechende Lösungen dargestellt, links ein Frontend und rechts ein nachgiebiger Frontscheibenrahmen [13]. Weiterhin soll ein Abstand von etwa 10 Zentimetern zwischen Motor und Motorhaube eine Deformationszone bilden, die den Aufprall abmildert und die Verletzungsschwere reduziert. Darüber hinaus führten Überlegungen dazu, starre, unverformbare Bauteile im Motorraum nicht unmittelbar unter der Haube zu platzieren, da sie beim unfallbedingten Anprall von Körperteilen eine unzulässig hohe Belastung hervorrufen und damit ein unnötiges Verletzungsrisiko darstellen würden. Aus diesem Grund wird die Möglichkeit zum Absenken verschiedener Aggregate im Motorraum berücksichtigt. Zudem werden beispielsweise Flüssigkeitsbehälter flacher konstruiert oder in einem größeren Abstand zur Haubenoberfläche eingebbracht.

Kann durch eine konstruktive Auslegung des Fahrzeug-Vorbaus der zum Energieabbau erforderliche Abstand nicht bereitgestellt werden, reichen also stationäre Lösungsmöglichkeiten nicht aus, sehen instationäre Lösungen die Schaffung eines ausreichenden Deformationsweges durch eine sensor-gesteuerte Motorhaube vor, die sich aufstellen kann, sobald



**Abb. 4.89** Maßnahmen zum Schutz äußerer Verkehrsteilnehmer; **a** Weichschaum-Masse nach Porsche, **b** Frontscheibenrahmen am UNI-CAR (aus [13])

ein Anprall an der Stoßstange registriert wird. Durch Sensoren am Stoßfänger wird eine Federeinrichtung freigegeben oder ein pyrotechnischer Mechanismus gezündet, der das drehbare Aufstellen der Haube um die vordere Haubenbefestigung (meist der Schlossträger) aktiviert. Derzeit werden PreCrash-Sensoren entwickelt, die bei Kollisionsobjekten zwischen Fußgänger und sonstigen Gegenständen unterscheiden sollen.

Das Aufstellen der Motorhaube lässt sich jedoch auch mit Hilfe eines unter der wasserkasten-nahen Haubenkante angebrachten Airbags realisieren. Dieser Airbag, ein Beispiel zeigt Abb. 4.90, deckt den Hauben-Öffnungsspalten ab und schützt zusätzlich vor einem Anprall auf die wegen ihrer hohen Steifigkeit kritischen Bereiche des unteren Scheibenrahmens und der A-Säulen [47].

**Abb. 4.90** Konzept einer Airbag-Lösung zur Hauben-Aufstellung und zur Abdeckung des unteren Bereichs von Scheibenrahmen und A-Säule (aus [47])



Weitere Schutzmaßnahmen für äußere Verkehrsteilnehmer sind zu sehen in der Verlagerung der Befestigungspunkte der Motorhaube nach hinten, in der Verlagerung der

Haubenöffnungskanten in den äußeren Bereich der Kotflügel, in der Abrundung der Karosserieformen sowie in versenkten Scheibenwischerachsen und Türgriffen. Einklappbare Rückspiegel, ein günstig gestalteter Übergang zwischen Motorhaube einerseits und dem Windlauf und den Rückspiegeln andererseits, das Weglassen kantiger Regenleisten und die Verwendung versenkbarer Scheinwerferwaschdüsen runden in hervorragender Weise den wirksamen Schutz am PKW gegenüber den äußeren Verkehrsteilnehmern ab.

Im Gegensatz zu den erfolgreichen Maßnahmen, die in den letzten Jahren Eingang in die PKW-Serienentwicklung gefunden haben, stellt der bei Geländefahrzeugen zu beobachtende Trend des Einsatzes von starren Frontschutzbügeln eine Gefährdung äußerer Verkehrsteilnehmer, insbesondere kindlicher Verkehrsteilnehmer dar (Abb. 4.91). Experimentelle Untersuchungen mit Geländefahrzeugen, die mit einem Frontschutzbügel ausgestattet waren, zeigten, dass das Risiko für Kopfverletzungen bei einer Anprallgeschwindigkeit von 20 km/h genau so groß ist wie bei einer Kollision mit herkömmlichen PKW bei doppelter Geschwindigkeit. Es wurde daher 2005 eine EU-Richtlinie zum Testen von Frontschutzbügeln (vgl. Abschn. 6.2.3) erlassen, die geeignet erscheint, das Risikopotential zu reduzieren.

**Abb. 4.91** Frontschutzbügel an einen Off road-Fahrzeug und Relation zur Geometrie kindlicher Verkehrsteilnehmer

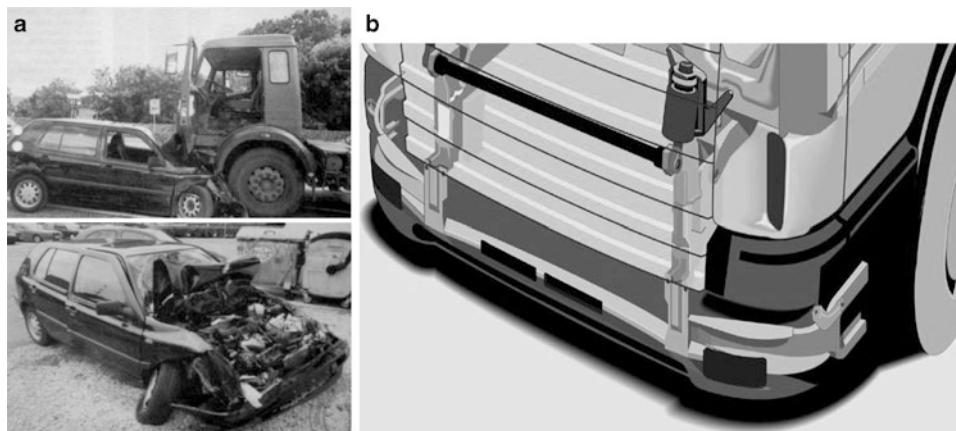


#### 4.4.2 Maßnahmen am NFZ zum Schutz von PKW-Insassen und äußeren Verkehrsteilnehmern

Bei Kollisionen zwischen Nutzfahrzeugen und PKW, Krafträder, Fahrrädern oder Fußgängern liegt das Verletzungsrisiko eindeutig auf Seiten der involvierten Personen der Kollisionskontrahenten. Die meisten Unfälle von Nutzfahrzeugen ereignen sich mit PKW-Beteiligung. Daher sind die wesentlichen Maßnahmen zum Schutz der PKW-Insassen im Kontrahentenschutz am Nutzfahrzeug in Form von Unterfahrschutz-Einrichtungen zu sehen, deren Abmessungen und Prüfbedingungen gesetzlich vorgeschrieben sind: Für Front-Unterfahrschutz-Einrichtungen nach ECE-R 92, für Einrichtungen der Seite nach ECE-R 73 und für die am Fahrzeugheck nach ECE-R 58. Sie bieten Sicherheit durch ihren Abweis-Effekt für Fußgänger und Fahrer von motorisierten und nicht-motorisierten

Zweirädern, sodass diese nicht unter das Nutzfahrzeug geraten und von den Rädern erfasst werden können. Zum anderen nehmen sie je nach Ausführung einen Teil der kinetischen Energie auf, der dort in Formänderungsarbeit umgewandelt wird und zur Deformation der Unterfahrschutz-Einrichtung führt.

Der **Front-Unterfahrschutz** soll das Unterfahren der Front von Lastkraftwagen (LKW) durch PKW verhindern und helfen, die beaufschlagten Deformationsstrukturen effektiver zu nutzen (Abb. 4.92). Derartige Unterfahrschutz-Einrichtungen sind erst seit August 2003 für Neufahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse von 3,5 bis 12 t sowie für die über 12 t (Fahrzeugkategorien N<sub>2</sub> bzw. N<sub>3</sub>) in der Richtlinie ECE-R 92 gesetzlich vorgeschrieben. Ausnahmen gelten lediglich für geländegängige Fahrzeuge, für LKW, deren Verwendungszweck mit den Bestimmungen für einen vorderen Unterfahrschutz nicht vereinbar ist, und für Fahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse von 7,5 t und einer Bodenfreiheit von nicht mehr als 400 mm.



**Abb. 4.92** Unfallfolgen bei einer Frontalkollision zwischen LKW und PKW (a) und Konzept einer Front-Unterfahrschutz-Einrichtung (b)

Bei der Überprüfung wird die Unterfahrschutz-Einrichtung einer definierten Kraft ausgesetzt, wobei maximal zulässige Deformationen und Mindest-Widerstandszeiten als Kriterien dienen. Bei den danach gestalteten Unterfahrschutz-Einrichtungen weist die Unterkante einen maximalen Abstand zur Fahrbahn von 400 mm auf. Sie verfügen über eine Profilhöhe von mindestens 100 mm für Fahrzeuge der Kategorie N<sub>2</sub> bzw. 120 mm für LKW der Kategorie N<sub>3</sub> und sind ausreichend widerstandsfähig gegen Kräfte ausgelegt, die im Wesentlichen parallel zur Längsachse des Fahrzeuges einwirken. Zudem dürfen die seitlichen Enden des Querträgers nicht nach vorn gebogen und die Außenkanten mit einem Krümmungsradius von mindestens 2,5 mm versehen sein. Die Außenflächen der Schutzeinrichtungen sind überwiegend glatt gestaltet oder auch in horizontaler Richtung gewellt ausgeführt, wobei die Schrauben und Nieten nicht weiter als 10 mm herausragen dürfen.

Bei Frontalkollisionen zwischen LKW und PKW wird so das zunächst zwar verzögerungsarme Unterfahren weitgehend unterbunden, doch würde ohne Schutzeinrichtung die geometrische Inkompatibilität zu ausgeprägten Intrusionen am PKW mit dem einhergehenden hohen Verletzungsrisiko führen. Wird bei derartigen Kollisionen dagegen der Unterfahrschutz beaufschlagt, so erfährt der PKW zwar eine höhere Verzögerung, die jedoch durch die Deformationsstrukturen kontrolliert, in Verbindung mit dem PKW-Rückhaltesystem insgesamt niedrigere Insassenbelastungen zur Folge haben dürfte.

Mit den **seitlichen Unterfahrschutz-Einrichtungen** wird vor allem das Ziel verfolgt, zu verhindern, dass Fußgänger sowie Fahrer von Fahrrädern und motorisierten Krafrädern seitlich unter den Lastkraftwagen (LKW) geraten. Sie wirken daher lediglich als Abweiser und weniger als energieabsorbierende Deformationsstruktur. Die Ausrüstungspflicht entsprechend der Richtlinie ECE-R 73 gilt für LKW der Kategorien N<sub>2</sub> und N<sub>3</sub> sowie für Anhängerfahrzeuge (Klassen O<sub>3</sub> bzw. O<sub>4</sub>), sofern die seitliche Aufbau-Unterkante im unbeladenen Zustand eine Höhe von mehr als 550 mm aufweist (Abb. 4.93).



**Abb. 4.93** Ausführungsbeispiele für seitliche Unterfahrschutz-Einrichtungen

Für die Auslegung der seitlichen Unterfahrschutz-Einrichtung gilt grundsätzlich, dass sie die Gesamtbreite des Fahrzeuges nicht vergrößern darf, jedoch soll der Hauptteil ihrer Außenfläche, um wirksam sein zu können, nicht mehr als 120 mm, vom äußeren Umriss des Fahrzeuges aus gemessen, nach innen ragen. Zur geometrischen Auslegung des hinteren Endes der Schutzeinrichtung ist vorgesehen, dass, bezogen auf den äußeren Rand der Hinterradreifen, der Abschluss auf einer Länge von mindestens 250 mm nicht mehr als 30 mm nach innen reichen darf. Damit soll eine bündige Montage des Schutzsystems erreicht werden. Die Außenfläche der Einrichtung ist glatt ausgelegt und von vorn nach hinten möglichst durchgängig gestaltet, ohne offenen Lücken zu lassen. Überlappungen benachbarter Teile sind nur in den Fällen zulässig, in denen der hintere Anschlussteil nicht über den vorderen herausragt. Wie bei den Frontschutz-Einrichtungen dürfen auch bei den seitlichen Maßnahmen abgerundete Muttern, Nietköpfe oder ähnlich geformte Bauteile nicht weiter als 10 mm über die Oberfläche hinausragen, und alle Ecken und äußeren Kanten weisen einen Abrundungsradius von mindestens 2,5 mm auf. Als Materialien werden Aluminiumlegierungen, Stahlprofile oder Kunststoff-Konstruktionen verbaut, sofern sie die Prüfanforderungen erfüllen. Diese Prüfanforderungen sehen vor, dass bei der Einwirkung einer statischen Kraft an einer beliebigen Stelle der Schutzeinrichtung eine bestimm-

te Deformation nicht überschritten wird, wobei der Nachweis auch rechnerisch erfolgen kann.

Mit der Einführung des seitlichen Unterfahrschutzes steht eindeutig der Schutz von Fußgängern und Zweiradfahrern im Vordergrund. Daher erscheint es zunächst einmal verständlich, dass eine statische Prüfkraft in Höhe von lediglich 1 kN als ausreichend angesehen wird. Als Referenz für eine seitliche Beaufschlagung durch einen PKW, z. B. bei einer Seitenkollision, ist diese Kraft völlig unzureichend, und der PKW würde den LKW seitlich unterfahren. Die Folge wäre das Eindringen der steifen Trägerstrukturen des LKW in die Fahrgastzelle des PKW. Einige Hersteller von Aufliegern und NFZ-Aufbauten sind daher dazu übergegangen, widerstandsfähige Konstruktionen zu entwickeln, bei denen die tragenden Rahmenelemente abgesenkt und gleichzeitig nach außen verlagert werden. Allerdings sind diese Entwicklungen über ein konzeptionelles Stadium nicht hinaus gekommen.

Der **Heck-Unterfahrschutz** ist mit Einführung nach StVZO § 32 b und ECE-R 58 im Jahr 1975 die erste Unterfahrschutz-Einrichtung für Lastkraftwagen (LKW) sowie für Anhänger ab einer zulässigen Gesamtmasse von 3,5 t. Er soll PKW beim Aufprall gegen das Heck eines LKW einen wirksamen Schutz gegen das Unterfahren bieten (Abb. 4.94).

**Abb. 4.94** Gefahr bei PKW-Heckkollisionen mit LKW ohne Heck-Unterfahrschutz-Einrichtung (aus [48])



Analog zum Front-Unterfahrschutz ist die rückwärtige Schutzeinrichtung für Kräfte ausgelegt, die überwiegend parallel zur Fahrzeug-Längsachse wirken. Heck-Unterfahrschutzsysteme weisen in unbeladenem Zustand einen Abstand von maximal 550 mm über der Fahrbahn auf und ragen nicht weiter als 400 mm über das Fahrzeugheck hinaus, dabei beträgt die Höhe des Querträgerprofils mindestens 100 mm. Bei der Festigkeitsprüfung werden in den Heck-Unterfahrschutz horizontale Kräfte eingeleitet, die von der zulässigen Gesamtmasse abhängig sind.

Im Vergleich zur front-seitigen Schutzeinrichtung sind beim Heck-Unterfahrschutz deutlich mehr Ausnahmen zugelassen: Neben land- und forstwirtschaftlichen Fahrzeugen mit erhöhter Geländegängigkeit dürfen auch zweirädrige Anhänger zum Transport

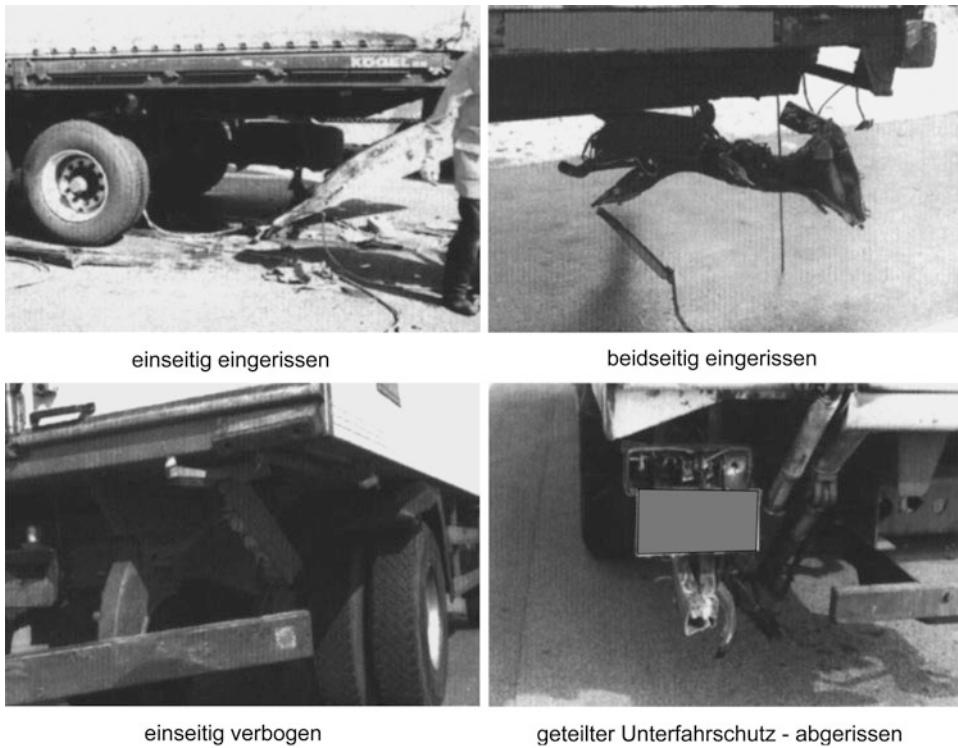
von Langmaterial und Fahrzeuge, die aufgrund ihrer Nutzung eine Verwendung des Heck-Unterfahrschutzes nicht zulassen (z. B. Müll- und Baustellenfahrzeuge), ohne diese Schutzeinrichtung am Straßenverkehr teilnehmen. Da die Anzahl dieser Fahrzeuge jedoch einen nicht unerheblichen Anteil am Gesamtaufkommen der Nutzfahrzeuge aufweist, geht von ihnen ein beträchtliches Risiko für PKW und deren Insassen aus. Ein weiterer Problempunkt aus Sicht des Kontrahentenschutzes ist in der Höhe des Unterfahrschutzes zu sehen, da sich aufgrund der geometrischen Inkompatibilität bei Auffahrunfällen die Deformationsstruktur der PKW-Längsträger nicht am zu hohen Unterfahrschutz am LKW-Heck abstützen kann. Verschärfend wirkt sich zusätzlich das mögliche Bremsnicken des PKW und das dabei auftretende Absenken des PKW-Stoßfängers aus. Dass bei derartigen Kollisionen das LKW-Heck trotz der eingesetzten Schutzeinrichtung von PKW unterfahren wird, konnte in [49] überzeugend nachgewiesen werden: Die steifen Strukturen des Nutzfahrzeugs drangen beim Unterfahren tief in den Fahrgastrraum ein und hatten für die Frontinsassen ein schwerwiegendes Verletzungsrisiko zur Folge. Zudem sind die Prüfkräfte für die heck-seitigen Unterfahrschutz-Einrichtungen zu niedrig angesetzt, so dass nach [48] der Unterfahrschutz häufig zu schwach ausgelegt wird und im Kollisionsfall nach vorn wegknicken oder abreißen kann (Abb. 4.95).

Dem **Fußgängerschutz** sowie dem **Schutz von Zweirad-Fahrern** müsste aufgrund der auftretenden Verletzungshäufigkeit und deren Folgekosten (vgl. Abb. 2.15) bei der sicherheitstechnischen Auslegung von Nutzfahrzeugen zweifellos eine höhere Priorität eingeräumt werden. Aufgrund der strukturellen Beschaffenheit von Nutzfahrzeugen in Form der hohen Steifigkeiten und der übergroßen Massenunterschiede werden hierfür jedoch äußerst enge Grenzen aufgezeigt. Besonderer Wert, so konnte gezeigt werden, wird an der Front und an den Seiten der Nutzfahrzeuge auf eine möglichst glatte, durchgängige Oberfläche mit großen Kantenradien gelegt, da sich diese Maßnahmen verletzungsmindernd auswirken. Zudem wurde auf den Abweis-Effekt der seitlichen Strukturen eingegangen, der das Überrollen von Unfallbeteiligten vermeiden soll. Trotz aller Bemühungen werden diese Schutzmaßnahmen in ihrer Wirkung auf die Verletzungssituation äußerer Verkehrsteilnehmer jedoch nur einen mäßigen Einfluss zeitigen, sofern es nicht gelingt, derartige Unfallkonstellationen von vornherein und nachhaltig zu vermeiden. Wesentliche Maßnahmen hierzu sind in Aktivitäten zu sehen, die die Sichtverhältnisse für den NFZ-Fahrer sowohl nach vorne als auch nach der Seite und nach hinten verbessern helfen. Dies scheint maßgeblich allerdings nur durch die Bereitstellung zusätzlicher Warn- und Informationseinrichtungen möglich zu sein.

---

## 4.5 Nachkollisionäre und sonstige Sicherheitsmaßnahmen

Bisher wurden fahrzeugtechnische Sicherheitsmaßnahmen zum Selbst- und zum Kontrahentenschutz erläutert. Im Folgenden soll nun abschließend noch auf Sicherheitsmaßnahmen eingegangen werden, die zum einen auf den Menschen als Verkehrsteilnehmer und zum anderen auf die Verkehrsumwelt abzielen (vgl. hierzu Abb. 1.1).



**Abb. 4.95** Beschädigungen an vorhandenen Unterfahrschutz-Einrichtungen am Heck von Nutzfahrzeugen (aus [48])

Eine nicht zu unterschätzende Rolle spielt hierbei die **Motivation** zur Benutzung von Schutzeinrichtungen. Dies bezieht sich sowohl auf Fahrer und Passagiere von Kraftfahrzeugen als auch auf Fußgänger und Benutzer von Zweiradfahrzeugen, wegen der weitaus höheren Fahrgeschwindigkeit aber besonders auf Motorrad-Fahrer. Die Überzeugungsarbeit zur Nutzung der Insassenschutz-Systeme für Erwachsene, aber auch für Kinder stellt für Verkehrspychologen und -pädagogen zweifellos eine besondere Herausforderung dar. Die zahlreichen Kampagnen, die das Ziel verfolgten, Autofahrer zum Anlegen des Sicherheitsgurtes zu bewegen, sind jedoch bei manchen Sicherheitsexperten nicht unumstritten, da sie die Auffassung vertreten, dass großflächige Plakatwerbungen kaum geeignet sein dürften, „Gurtmuffel“ von der Vorteilhaftigkeit des Gurtragens zu überzeugen. Die Erfahrungen hierzu sind durchaus enttäuschend, wenn man sich vergegenwärtigt, dass trotz zahlloser und kostenintensiver Werbeaktionen erst die Bußgeld-Bewehrung für die Nicht-Nutzung des Sicherheitsgurtes im August 1984 zu einer sprunghaften Zunahme der Gurtanlage-Quote (von etwa 60 auf mittlerweile annähernd 90 %) geführt hat. In die gleiche Richtung gehen die Bemühungen, Zweirad-Fahrer von der Nutzung von Schutzhelmen zu überzeugen. Für Fahrer motorisierter Zweiräder allerdings wurde die Lösung darin gesehen, das

Helmtragen gesetzlich vorzuschreiben. Hier bleibt noch ein breites Betätigungsfeld, die Vorteile des Tragens geeigneter Motorrad-Kleidung, von Handschuhen und von speziellen Motorrad-Stiefeln den potentiellen Benutzern nahe zu bringen. Zudem sind Radfahrer und Fußgänger zu motivieren, die vorgesehenen und bereitgestellten Fahr- und Fußwege zu nutzen und sich auf Verkehrsregelungen einzulassen.

Es dürfte unbestritten sein, dass der Erfolg von **Unfall-Rettungsmaßnahmen**, auf die später noch einzugehen sein wird, zuvorderst von möglichst zeitnahen Maßnahmen abhängt. Daher sind Verkehrsteilnehmer aufgefordert, sich im Falle eines Unfalles nicht in eine Beobachterrolle zurück zu ziehen, sondern proaktiv die Unfallstelle mit Hilfe geeigneter Einrichtungen, wie Warndreieck, Warnleuchte und Schutzwesten, zu sichern, **Erste Hilfe** zu leisten und erforderlichenfalls Rettungsmaßnahmen durch Absetzen eines Notrufs einzuleiten. Durch diese Maßnahmen lassen sich nicht nur weitere Unfälle vermeiden, sondern sie sind auch geeignet, die Unfallfolgen reduzieren zu helfen. Hierzu scheint eine intensivere Aus- und häufigere Weiterbildung aller Verkehrsteilnehmer zum Verhalten am Unfallort unumgänglich zu sein.

Der **Versicherungsschutz** dient zweifellos in erster Linie der finanziellen Absicherung von Personen, die in Unfälle verwickelt wurden, und zwar hinsichtlich sowohl der unfallbedingten Personen- als auch der Sachschäden. Die Regulierung der monetären Unfallfolgen erfolgt durch die Versicherungsgesellschaften zwar oftmals unbürokratisch. Den Versicherungen fällt aber auch die Aufgabe zu, durch Reduzierung der Beitragsprämien den Erwerb, den nachträglichen Einbau und die Nutzung von Sicherheitsmaßnahmen zu fördern. Dieser Grundsatz ließe sich zweifellos zum Vorteil der automobilen Gesellschaft, aber auch der Versicherungsgesellschaften selbst verstärkt anwenden.

Eine Maßnahme, die sich auf das Verkehrsumfeld bezieht, ist in der **Straßenrandentschärfung** zu sehen. Dabei handelt es sich um die Installation passiver Schutzeinrichtungen, die geeignet sind, von der Fahrbahn abkommende Fahrzeuge abzuweisen oder aufzuhalten. Die festgelegten Anforderungen sind in Richtlinien zwar definiert, unterliegen jedoch derzeit einem Wandel hinsichtlich der zunehmenden Harmonisierung innerhalb der Europäischen Union. Für die Schutzplanken sind bestimmte Aufhaltevermögen für den jeweiligen Aufprall mit PKW, Bussen und Lastkraftwagen festgelegt (vgl. [50]), die in Tab. 4.4 zusammenfassend dargestellt sind.

Die **Schutzeinrichtungen** werden hinsichtlich ihrer Wirkungsweise und ihres Aufprallverhaltens unterschieden in abweisende und aufhaltende Maßnahmen. Die abweisenden sind längs zur Straße verbaute **Schutzplanken** in Form von Stahl-Schutzplanken oder Beton-Gleitwände, die von der Fahrbahn abkommende Fahrzeuge so auffangen und umlenken, dass sie an der Schutzeinrichtung durch Gleiten zum Stillstand kommen. Aufhaltende Schutzeinrichtungen, so genannte Anpralldämpfer, werden bei zu erwartenden größeren Anprallwinkeln ( $>30^\circ$ ) eingesetzt. Dabei wird die Aufprallenergie möglichst wirksam in Deformationsenergie umgewandelt. Beim Aufprallverhalten unterscheidet man zwischen plastischer und elastischer Nachgiebigkeit oder starren Systemen. Verformen sich die Stahl-Schutzplanken, Stahl-Gleitschwellen oder auch Anpralldämpfer beim Auffangen aufprallender Fahrzeuge, gelten sie als nachgiebige Schutzeinrichtungen,

**Tab. 4.4** Aufhaltestufen und Aufprallkonfigurationen für Schutzplanken

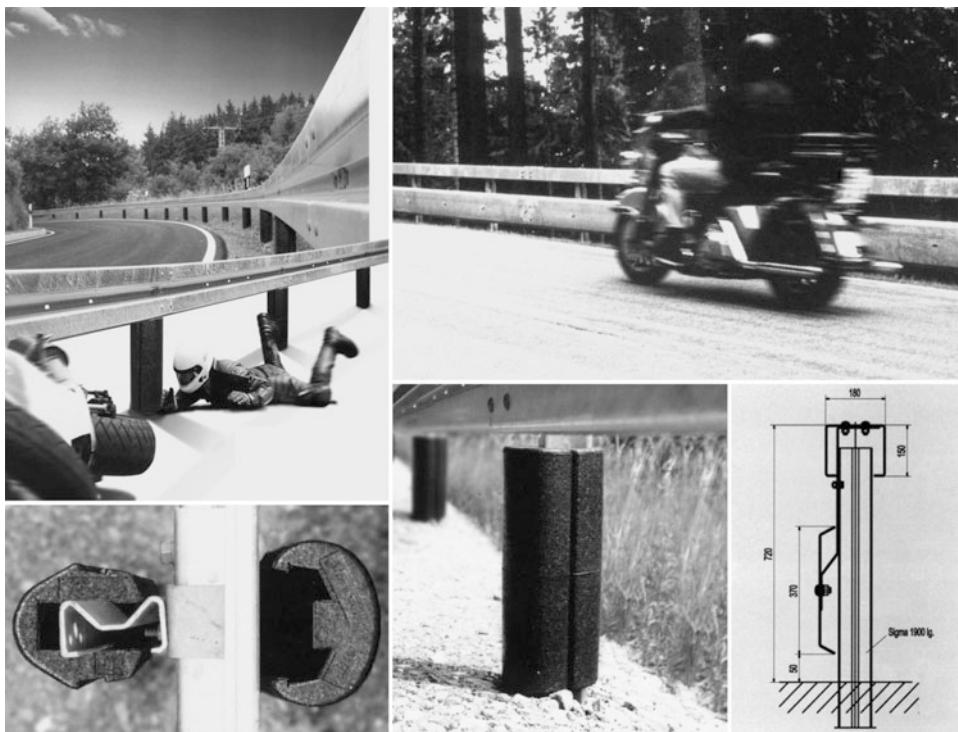
Bezeichnung	Aufhalte-Stufe	Aufprall-geschw.	Aufprall-winkel	Fahrzeug-masse
	[ - ]	[km/h]	[°]	[kg]
Normales Aufhaltevermögen	N 1	80	20	1.500
	N 2	110	20	1.500
	N 2	100	20	900
Höheres Aufhaltevermögen	H 1	70	15	10.000
	H 1	100	20	900
	H 2	70	20	13.000
	H 2	100	20	900
	H 3	80	20	16.000
	H 3	100	20	900
Sehr hohes Aufhaltevermögen	H 4a	65	20	30.000
	H 4a	100	20	900
	H 4b	65	20	38.000
	H 4b	100	20	900

**Abb. 4.96** Schutzeinrichtungen mit abweisender (a) oder aufhaltender Wirkung (b, c)

bleiben sie beim Aufprall dagegen nahezu unnachgiebig, wie z. B. Beton-Gleitwände, so werden sie den starren Schutzeinrichtungen zugerechnet (Abb. 4.96).

Durch die Installation von Schutzplanken ergibt sich allerdings ein Interessenskonflikt, der darin besteht, dass sie zwar für Insassen von PKW und Nutzfahrzeugen einen Schutz bieten, für gestürzte und rutschende Motorradfahrer jedoch ein Verletzungsrisiko darstellen. Denn die Schutzeinrichtungen bilden überaus steife Kontaktstellen und weisen, insbesondere bei Stahlkonstruktionen, scharfe Oberkanten und scharfkantige Befestigungsposten auf, die bei Körperkontakt von Zweiradfahrer ein großes Verletzungspotential in sich bergen. Diesem Umstand wird seit einigen Jahren dadurch Rechnung getragen, dass die

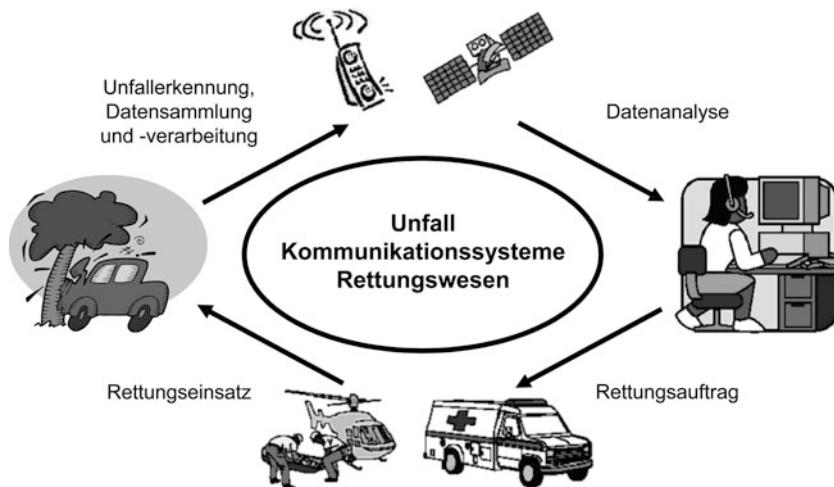
sich ergebende Aggressivität durch eine Ummantelung der Pfosten mittels energieabsorbierender Protektoren aus Schaumstoff abgeschwächt wird. Zusätzlich werden Maßnahmen getroffen, mit deren Hilfe ein Durchrutschen unter den Schutzplanken verhindert wird (Abb. 4.97). Dabei werden zusätzlich unter den Schutzplanken ein oder mehrere Metallunterzüge montiert, die eine Auffangwirkung bieten.



**Abb. 4.97** Ummantelung und Verkleidung von Schutzplanken zur Vermeidung von Verletzungen gestürzter Motorrad-Fahrern (aus [50])

In den letzten Jahrzehnten wurde das **Rettungswesen** erheblich ausgebaut und wird auch künftig durch neue Rettungskonzepte erweitert. Hierzu zählen die Verbesserungen der in Abb. 4.98 dargestellte Rettungskette und ihrer Einzelelemente.

Das Verbesserungspotential ist vor allem in der schnellen und zuverlässigen Information der Unfallkonstellation an die Einsatz-Leitstelle zu sehen. Daneben wurden modernste verkehrsunfall-chirurgische Einrichtungen in verkehrsgünstig gelegenen Krankenhäusern verlagert, die Ausbildung von Unfallchirurgen und Einsatzkräften verbessert und die Transportmöglichkeiten durch leistungsfähige Kranken- und Notarztwagen sowie durch Hubschrauber-Einsätze beschleunigt. Zudem ermöglichen Notrufsysteme, die in modernen Fahrzeugen integriert sind, die automatische Übermittlung einer Notfallmeldung. Diese abgesetzten Meldungen enthalten Informationen über die Unfallstelle des Fahrzeuges



**Abb. 4.98** Die Informationskette mit Kommunikationswegen zum Einsatz des Rettungswesens (aus [51])

mittels GPS-Positionsbestimmung sowie nähere Unfallumstände wie Aufprallart (Front-, Seite- oder Heckkollision), ausgelöste Airbags u. a. m. mittels ausgewerteter Sensor-Daten. Parallel dazu ist der Aufbau einer bidirektionalen (zweiseitigen) Sprachverbindung zu den Fahrzeuginsassen vorstellbar, um durch direkte Ansprache zielorientierte Informationen über den Zustand der Insassen aus dem Fahrzeug zu erhalten.

Durch die Komplexität der aufwändigen Gestaltung der Fahrzeuge werden herstellerseitige „Leitfäden für die Rettung“ herausgegeben. Die darin enthaltenen fahrzeugspezifischen Aspekte, wie z. B. Batterieposition, Materialbeschaffenheit und Profilstärke der Karosseriestrukturen oder die Lage der Airbag-Gasgeneratoren, stellen für Rettungskräfte eine zuverlässige und zeitsparende Orientierung dar.

Die **Sicherung der Unfallstelle** umfasst die Notrufmeldung an Polizei-Dienststellen, die ihrerseits im Bedarfsfall Informationen für die Verkehrsnachrichten an die Rundfunkstationen absetzen, damit evtl. auftretende verkehrstechnische Behinderungen durch Stauwarnungen umfahren werden können. Weitere polizeiliche Aufgaben wie Einsatzleitung, Absperrungen und Sicherung der Örtlichkeit, Unfalldaten-Aufnahme sowie die Vernehmung von Unfallbeteiligten und Zeugen zählen ebenfalls dazu, um nach dem Abtransport der beschädigten Fahrzeuge und der Versorgung und Verbringung unfallbeteigter Personen wieder einen reibungslosen Verkehr nach „Räumung der Unfallstelle“ sicherzustellen.

Abschließend soll an dieser Stelle noch auf den **Brandschutz**, d. h. die Vermeidung von Fahrzeugbränden, eingegangen werden. Die Ursachen dafür können sein:

- Die Folge eines Verkehrsunfalls: Dabei können Zündfunken entstehen, die den auslaufenden Treibstoff unmittelbar beim Unfall selbst aber auch bei den darauf folgenden

Bergungsarbeiten entzünden. Deshalb ist eine Stromunterbrechung nach einem Unfall wichtig.

- Bremsen, die bei längeren Bergabfahrten oder durch einen technischen Defekt überhitzen, können einen Fahrzeugbrand auslösen.
- Schadhafte Autoreifen, insbesondere bei Zwillingsbereifung von Nutzfahrzeugen häufig auftretend. Auch ein geringer Luftdruck in der Bereifung kann zur Überhitzung der Reifen führen, die schließlich in Brand geraten.
- Bei gebrochenen oder überlasteten Kabeln besteht die Gefahr, dass der Kabelbaum verschmort und in Folge dessen zu einem Kabelbrand führt.
- Durch auslaufendes Benzin: Dies geschieht eher bei älteren Fahrzeugen mit Vergasern. Der Kraftstoff läuft aus und entzündet sich dann an den heißen Teilen im Motorraum sowie am Auspuff.

**Fahrzeugbrände** in PKW, LKW oder Bussen, aber auch bei Motorrädern sind überaus gefährlich, da sich häufig Personen in unmittelbarer Umgebung des brennenden Fahrzeugs befinden können, die dann entweder direkt den Flammen oder aufgrund verwendeter Materialien im und am Fahrzeug (Kunststoffteile, Reifen usw.) dem manchmal toxischen Brandrauch ausgesetzt sind. Die Zahl der Brände mit technischer Ursache ist seit Wegfall der Vergasermotoren deutlich zurückgegangen. In Versicherungsstatistiken weisen allerdings Schmorbrände in der Elektrik eine steigende Tendenz auf.

Die Entwicklung von **Brandschutz-Einrichtungen** für Kraftfahrzeuge geht im Gegensatz zu der in anderen Sicherheitsbereichen nur in kleinen Schritten voran. Dies liegt zweifellos daran, dass ein Fahrzeugbrand als Ursache oder als Folge eines Verkehrsunfalls eher selten auftritt. Der effektivste Brandschutz ist in der Verwendung schwer entflammbarer Materialien zu sehen, deren Zusammensetzung und Herstellung vorgeschrieben ist und für die Entflamm-Untersuchungen durchgeführt werden müssen (vgl. Auflistung in Tab. 6.1 und 6.2). Eine weitere, bereits in Serienfahrzeugen angewandte Schutzmaßnahme betrifft die Unterbrechung der Stromzufuhr. Dabei schützt die Sicherheitsbatterieklemme, die im Falle eines Unfalls automatisch abgesprengt wird und damit den Stromkreis unterbricht, vor der Entstehung eines Brandes durch einen Kurzschluss. Die Innenraum-Beleuchtung und die Warnblinkanlage bleiben dabei jedoch funktionsfähig. Auf die Lage des **Kraftstofftanks** und die Verlegung der -leitungen im Fahrzeug wurde bereits in Abschn. 4.3.1 eingegangen. Deren Weiterentwicklung verhindert weitgehend eine Brandentstehung und reduziert die Ausbreitung, falls dennoch ein Brand entstehen sollte; die Auslegung der Tankanlage ist somit ebenfalls eine hervorragend geeignete Maßnahme zur Minderung der Unfallfolgen. Ein weiterer Aspekt soll nicht unerwähnt bleiben, der sich auf **automatische Löschanlagen** bezieht. Sie sind derzeit bereits in Motorsportfahrzeugen im Einsatz. Doch wird immer öfter darüber nachgedacht, sie in Straßenfahrzeugen ebenfalls einzusetzen. Der prinzipielle Aufbau umfasst Hitzesensoren, die gleichmäßig im Motorraum verteilt verlegt werden. Dadurch wird eine flächendeckende Überwachung des gesamten Motorraumes sichergestellt. Sollte nämlich tatsächlich ein Fahrzeugbrand entstehen, so wird im Motorraum eine bestimmte Auslösetemperatur (z. B. 120 bis 130 °C) erreicht und

die Löschanlage automatisch ausgelöst. Der dabei aktivierte Feuerlöscher besteht aus einem Druckbehälter, der mit etwa 2 kg Spezial-Löschnpulver mit verstärkter Löschwirkung gefüllt ist. Eine akustische und optische Fahrer-Warneinrichtung im Fahrgastraum informiert die Fahrzeuginsassen, die das Fahrzeug bereits vor dem Auslösen der Löschanlage verlassen können.

---

## Literatur

1. Kramer, F.: Passive Sicherheit/Biomechanik I/II. Vorlesungsskript zur gleichnamigen Lehrveranstaltung an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden (2012).
2. Kramer, F., Scholpp, G., Otte, D.: Das Verletzungsrisiko in unterschiedlich schweren Fahrzeugen und daraus abgeleitete Erfordernisse für verbesserte Rückhaltesysteme. VDI/BMW-Gemeinschaftstagung „Sicherheit im Straßenverkehr“. München (1993).
3. Kramer, F.: Unfallrekonstruktion. Vorlesungsskript zur gleichnamigen Lehrveranstaltung an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden (2010/11).
4. Kramer, F.: Schutzkriterien für den Fahrzeug-Insassen im Falle sagittaler Belastung. Fortschritt-Berichte, VDI-Reihe 12. Bd 137. (1989). Dissertation an der Technischen Universität Berlin.
5. Richter, B., Appel, H., Hoefs, R., Langwieder, K.: Entwicklung von PKW im Hinblick auf einen volkswirtschaftlich optimalen Insassenschutz. Abschlußbericht des Forschungsprojekts TV 8036 des Bundesministers für Forschung und Technologie. (1984).
6. Kramer, F., Appel, H., Adomeit, H.-D.: Der Einfluss von Strukturparametern auf die Belastung und Kinematik von PKW-Insassen. Internationaler Kongress der VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik „Berechnung im Automobilbau“. Würzburg (1990).
7. Niederer, P.F.: Der Stoßgürtel – Ein Sicherheitskonzept für Leichtfahrzeuge. Leichtmobil-Symposium. Wildhaus (CH) (1992).
8. Frei, P., Kaeser, R., Wingeier, L., Dragan, A. et al.: Crashworthiness and Compatibility of Low Mass Vehicles in Collisions. SAE 970122 in SP-1231. SAE Congress, Detroit, MI (USA) (1997).
9. Stache, M.: Einfluss der Fahrzeuggmasse auf Auslegungskriterien von Personenkraftwagen und die Möglichkeit der Gewichtsreduzierung. Studienarbeit Nr. 17/91. Technische Universität Berlin (1991).
10. Kramer, F., Deter, T.: Zur Quantifizierung der Straßenverkehrssicherheit. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik. 1992(1) (1992). Verlag Information Ambs GmbH, Kippenheim.
11. NCAP Crash Test Scores for Previously Tested Motor Vehicles 2004. <http://www.safercar.safercar.gov/ncap/cars>. (Nov. 2005).
12. Appel, H., Krabbel, G.: Kompatibilität – Ein Leitbild der passiven und aktiven Fahrzeugsicherheit. Tagung „Bedeutung der Rückhaltesysteme in der passiven Fahrzeugsicherheit“. Haus der Technik, Essen (1995).
13. Appel, H., Kramer, F.: Biomechanik und Kraftfahrzeugsicherheit. Umdruck zur gleichnamigen Vorlesung am Institut für Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität Berlin (1987).
14. Lutter, G., Kramer, F., Appel, H.: Evaluation of Child Restraint Systems on the Basis of Suitable Assessment Criteria. International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impacts. Berlin (1991).

15. Janssen, E.G., Huijskens, C.G., Beusenberg, M.C.: Reduction in Seat Belt Effectiveness due to Misuse. International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impacts. Verona (Italy) (1992).
16. Walz, F.H., Mackay, M., Gloor, B.: Airbag Deployment and Eye Perforation by a Tobacco Pipe. *J Trauma* **38**(8), 498–501 (1995).
17. Kramer, F., Kramer, M., Lüder, M., Herpich, T., Class, U.: Die Bedeutung von OoP-Situationen im Straßenverkehr hinsichtlich künftiger Auslegung von Insassenschutz-Systemen. VDI-Tagung „Innovativer Kfz-Insassen- und Partnerschutz“, Berlin (2003).
18. Fürbeth, V., Grosser, W., Müller, G.: HWS-Biomechanik – 98 Sonderfälle zum Verletzungsrisiko. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, Heft Nr. 2 (1999).
19. Meyer, S., Becke, M. et al.: FIP-Forward Inclined Position – Insassenbelastung infolge vorgebeugter Sitzposition bei leichten Heckkollisionen. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, Heft Nr. 7/8 (1999).
20. BMW AG: BMW – Neue Automobile. München (1991)
21. Niederer, P., Walz, F., Zollinger, U.: Adverse Effects of Seat Belts and Causes of Belt Failures in Severe Car Accidents in Switzerland during 1976. Proceedings 21st Stapp Car Crash Conference, New Orleans, LA (USA) (1977).
22. Volkswagen AG: PKW-Sicherheit in Forschung und Serie. Wolfsburg (1986).
23. Lippert, H.: Anatomie – Text und Atlas, 6. Aufl. Urban & Schwarzenberg, München, Jena (1995). überarb. und erweiterte Auflage.
24. Gehre, C., Kramer, S., Schindler, V. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: (Hrsg) Seitenairbag und Kinderrückhaltesysteme. Bd F 50. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven (2004).
25. Kock, H.-O.: Gegenwärtiger Stand und Trends bei Gurtsystemen. Autoliv-Sonderdruck. ATZ (1999).
26. „Das Experimental-Sicherheits-Fahrzeug ESF 2009 – Belt Bag: Clevere Kreuzung aus Gurt und Airbag“ in Technologie & Innovationen aus <http://www.daimler.com> (Abruf am 21.10.2012).
27. Schlott, S.: Airbag: die zündende Idee beim Insassenschutz. Die Bibliothek der Technik. Bd 121. Landsberg/Lech (1996).
28. Klanner, W., Ambos, R., Paulus, H., Hummel, T., Langwieder, K., Köster, H.-W. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: (Hrsg) Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbag. Bd F53. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven (2004).
29. Vieweg, C.: Mercedes-Benz AG (Hrsg): Alles über die Mercedes-Benz E-Klasse. Stuttgart (1995).
30. Glatter, J.: Nutzwert- und Risikobetrachtung eines Knieairbags aus Sicht der Unfallforschung. Diplomarbeit an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden (2005).
31. Aliabadi, R., Hahn, D., Adomeit, H.-D.: Innovation Knieairbag. Kollisionschutz im Straßenverkehr. (2000).
32. TRW Repa GmbH: Sicherheitssysteme im Vordersitz. Alfdorf (1993).
33. Kramer, F. et al.: Insassenschutz-Systeme. Unveröffentlichtes TRW-Repa-Präsentationspapier für Kunden. Alfdorf (1995).
34. Kramer, F., Ellerbek, N., Klotzbücher, P., Brenner, R.: Development of a World Marked Airbag System: Requirements and Trends. 1993 SAE International Congress and Exposition. Detroit (MI), USA (1993).
35. Schindler, V., Kühn, M., Siegler, H.: Intelligente Rückhaltesysteme. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Bd F 52. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven (2004).

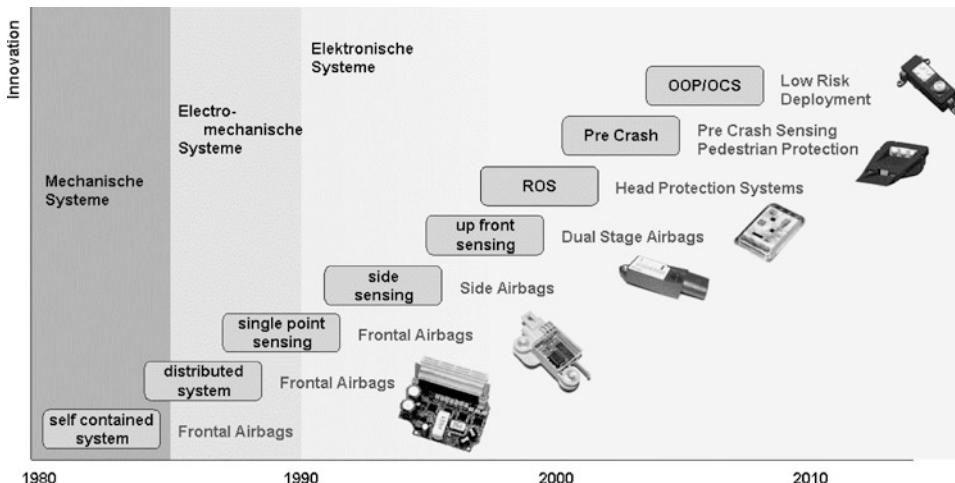
36. Geier, S.: Neugewichtung bei den Schadensersatzleistungen für Personen- und Sachschäden? Deutscher Verkehrsgerichtstag in Goslar (1996).
37. Estep, C.R., Lund, A.K., Vann, D.T.: Measurement and Evaluation of Head Restraints in 1995 Vehicles. Report of the Institute for Highway Safety. Arlington (VA), USA (1995).
38. Audi AG: Die Passive Sicherheit des Audi 100. Ingolstadt (1991).
39. Mercedes-Benz AG: Service-Unterlagen. Stuttgart (1988/89).
40. ECE-Regelung 22.
41. Sicherheitsmotorrad. Werbebrochure der DEKRA AG. Stuttgart (1995).
42. Kramer, F., Hönig, M., Leithold, L.: Airbag für Motorräder. Berichte und Informationen der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden 15(2) (2007).
43. Kontrollierter Sturz mindert Verletzungen. Zeitschrift „Gute Fahrt“, Heft 10 (1986).
44. Neitsch, A.: Konzepte von Maßnahmen zur Verbesserung der inneren Sicherheit von Kraftomnibussen. Diplomarbeit an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden (2005).
45. Gwehenberger, J., Bende, J., Bogenberger, T., Langieder, K.: ECBOS Work-Package 1, Task 1.3 – Database Integration, 2004. Ergebnisse der Studie unter <http://www.dsd.at/ECBOS.htm>, (Nov. 2005).
46. Kramer, F.: Fußgängerschutz – eine Herausforderung unserer Tage. 4. Internationales CTI-Fachforum „Fußgängerschutz – Pedestrian Protection“, Frankfurt/Main (2005).
47. Kalliske, I., Kühn, M., Heinrich, T., Schindler, V., Otte, D.: Fahrzeugseitige Maßnahmen zum Schutz des Kopfes eines Fußgängers – eine ganzheitliche Betrachtung. VDI Tagung „Innovativer Kfz-Insassen- und Partnerschutz“, Berlin (2003).
48. Langwieder, K. et al.: Heckunterfahrschutz bei Nutzfahrzeugen. Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Heft Nr. 103 (2001).
49. Seeck, A.: Einfluss der Bodenfreiheit der EEVC-Barriere im Vergleich zum Fahrzeug/Fahrzeug-Seitenaufprall, Bundesanstalt für Straßenwesen. (Juli 1994).
50. Kramer, F.: Straßenverkehrsanlagen. Vorlesungsskript zur gleichnamigen Lehrveranstaltung an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden (2010/11).
51. Kramer, F.: Automobil und Umwelt. Vorlesungsskript zur gleichnamigen Lehrveranstaltung an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden (2011/12).

Seit den 1980er Jahren gehört die passive Sicherheit zur Standardausrüstung der meisten Automobile; neben der Sicherheitsfahrgastzelle gehören dazu auch Gurt- und Airbag-Systeme. Diese Insassenschutz-Systeme sind heute ohne die notwendige Elektronik für Sensierung und Diagnose sowie für die zeitgerechte Ansteuerung undenkbar. Die Entscheidung, ob die Insassenschutz-Systeme wie Straffer und Kraftbegrenzer des Gurtsystems sowie Fahrer-, Beifahrer-, Kopf- und Thorax-Airbags beim Unfall aktiviert werden sollen, hängt von den Signalen ab, die von den eingesetzten Sensoren detektiert werden. Sowohl in den Airbag-Steuergeräten als auch in den unterstützenden Front- und Seiten-Sensoren werden heute in der Regel mikromechanische Beschleunigungssensoren verwendet. Bei Seitenkollisionen kommen aber auch Druck-Sensoren zum Einsatz, die in den Fahrzeugtüren installiert sind.

Die Entwicklung moderner Insassenschutz-Systeme folgt dem allgemein anzutreffenden Trend hin zum verstärkten Einsatz von individuell kontrollierten Sicherheitseinrichtungen, wie beispielsweise mehrstufige Airbag-Module oder variable Abströmöffnungen im Luftsack. Die ersten Systeme zum Beispiel waren mit einstufigen Gasgeneratoren ausgerüstet, und in der weiteren Entwicklung kamen zweistufige Gasgeneratoren, so genannte Dual Stage Inflators, zum Einsatz. Der neueste Entwicklungstrend geht dahin, mehrstufige Gasgeneratoren zu verwenden oder auch variable Generatoren, bei denen die Generatorleistung in gewissen Grenzen stufenlos einstellbar ist, zu entwickeln. Zur effektiven Aktivierung dieser neuartigen Systeme wird es im Vergleich zu den heutigen Systemen künftig mehr Sensoren sowie mehr Sensor-Netzwerke in Kraftfahrzeugen geben. Bei der Auswahl geeigneter Sensoren ist dabei entscheidend, in welcher Phase des Unfalls die Sensierung erfolgen soll: Beschleunigungs- und Druck-Sensorik ist ausschließlich auf die Sensierung innerhalb der Crash-Phase beschränkt. Soll jedoch die Sensierung in der PreCrash-Phase erfolgen, muss auf entsprechend vorausschauende Umfeld-Sensorik zurückgegriffen werden.

Die heutigen Insassenschutz-Systeme erfahren eine gewaltige Veränderung: So konzentriert sich die Entwicklung der Sicherheitssysteme auf eine verbesserte Rückhalte-

Funktion, wobei der Schutz auch äußerer Verkehrsteilnehmer immer stärker in den Vordergrund rückt. Diese Anforderung erfordert eine neue Generation von Sensoren zur Insassenerkennung und zur Klassifizierung, in der PreCrash-Phase und zur Umfeld-Detektion (Abb. 5.1). Dabei findet ein zunehmender Informationsfluss zwischen PreCrash- und der InCrash-Phase statt, um dem steigenden Sicherheitsbedürfnis gerecht werden zu können.



**Abb. 5.1** Entwicklung der Insassenschutz-Systeme und der geeigneten Sensorik (aus [1])

## 5.1 Entwicklung der Sensorik

Die Einführung der verschiedenen Arten von Airbag-Systemen bedingt weitergehende Forderungen nach verschiedenen Typen von Crash-Sensoren. Für die ersten Airbag-Systeme, die nur aus Fahrer- und Beifahrer-Airbag bestanden, war eine zentrale Crash-Sensierung ausreichend. Dabei sind die elektronischen Module mit einem einzigen Beschleunigungsaufnehmer ausgerüstet und in Fällen, in denen ein Offset-Crash erkannt werden soll, mit zwei Aufnehmern ausgestattet. Diese Sensoren sind im Winkel von 90° zueinander ausgerichtet und häufig in einer  $\pm 45^\circ$ -Ausrichtung relativ zur Fahrzeulgängsachse angebracht. Diese Anordnung wird für die meisten Airbag-Systeme angewandt.

### 5.1.1 Mechanische Sensoren

Nur der Vollständigkeit halber sei hier erwähnt, dass bei den ersten Airbag-Systemen mechanische Sensoren zum Einsatz gekommen sind; sie basieren auf dem Aufschlagzünder-Prinzip. Bei diesen Lösungen sind die Gasgeneratoren mit einer Zündkapsel ausgestattet,

die von einem Aufschlagzünder aktiviert wird: Bei einer ausreichend großen Beschleunigung überwindet die definierte Masse eine Federkraft und schlägt auf die Zündkapsel, die wiederum das Treibmittel des Gasgenerators entzündet. Eine Abstimmung auf die Unfallsituation ist bei diesen Systemen nur in sehr eingeschränktem Maße möglich. Zudem ist bei mechanischen Sensoren nachteilig, dass die Auslösung nicht synchronisiert werden kann. In Extremfällen kann es vorkommen, dass bei einem Frontalaufprall im unteren Geschwindigkeitsbereich nur einer der Airbags ausgelöst wird. Derartige Systeme wurden aus den genannten Gründen nur sehr begrenzt zum Einsatz gebracht und von Systemen mit elektromechanischen Sensoren abgelöst.

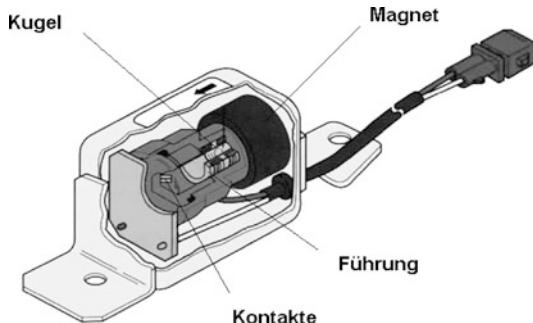
### 5.1.2 Elektromechanische Sensoren

Die Einführung elektrischer Anzünder ging mit der Verwendung elektromechanischer Crash-Sensoren einher. Dabei werden zwei grundlegend unterschiedliche Arten von elektromechanischen Sensoren unterschieden: Bei den ersten Airbag-Systemen sind sie direkt in den Zündkreis integriert und an der Auslösung der Airbags unmittelbar beteiligt; sie werden als Crash-Sensoren bezeichnet. Mit dem Aufkommen von mikromechanischen Beschleunigungsaufnehmern und dem zunehmenden Einsatz der Elektronik wurden die elektromechanischen Sensoren im Frontbereich des Fahrzeugs eliminiert und innerhalb der Airbag-Elektronik als so genannte Safing- oder Trigger-Sensoren eingesetzt.

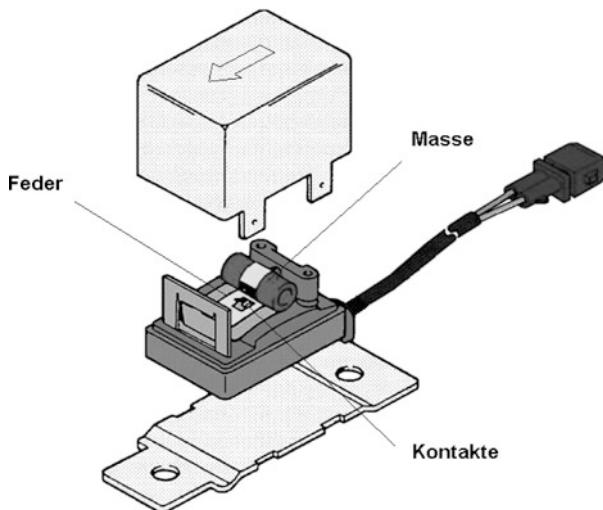
Die bekanntesten **Crash-Sensoren** sind Kugel- und Rollmassen-Sensoren, die auf den Radhäusern im Frontbereich des Fahrzeugs montiert und daher als „Front-Crash-Sensoren“ bezeichnet werden. Ein weiterer, baugleicher Sensor ist zur Sicherheit und Plausibilisierung im Steuergerät (SDM: Sensing and Diagnostic Module) installiert. Diese Sensoren basieren auf dem Feder-Masse Prinzip: Beim Aufprall werden durch die Sensoren die elektrischen Kontakte eines Stromkreises geschlossen und die Airbags aktiviert. Eine abgestufte Bewertung des Crash-Signals ist mit dieser Art von Sensoren nicht möglich.

Beim **Kugel-Sensor** (Ball-in-Tube-Sensor) von BREED (heute: KEY SAFETY SYSTEMS) ist eine Stahlkugel in einem präzise gefertigten Zylinder untergebracht (Abb. 5.2). Dabei repräsentiert die Stahlkugel die Sensor-Masse; sie wird von einem Dauermagneten in Ruhelage gehalten. Im Falle einer definierten Verzögerung, die ausreicht, die Haltekraft des Magneten zu überwinden, löst sich die Kugel aus ihrer Ruhelage und schließt die elektrischen Kontakte. Bemerkenswert ist der Umstand, dass sich die Kugel innerhalb der exakten Führung gegen ein Luftpolster bewegt und damit eine Tiefpass-Charakteristik aufweist. Bei hochfrequenten Beschleunigungen wird die Bewegung der Kugel auf diese Weise gedämpft, und der Sensor ist weitestgehend unempfindlich gegen Vibrationen im Fahrzeug. Wird der Stromkreis geschlossen, so werden die Airbags gezündet und die Insassenschutz-Systeme ausgelöst. Zur besseren Leitfähigkeit sowie zur Vermeidung von Korrosionen sind Stahlkugel und Kontakte vergoldet. Das Sensor-Gehäuse besteht aus einem hermetisch verschweißten Stahlgehäuse und wird in Fahrtrichtung, gekennzeichnet durch einen Pfeil auf der Oberseite des Gehäuses, eingebaut.

**Abb. 5.2** Kugel-Sensor (Ball in Tube-Sensor), aus [2]



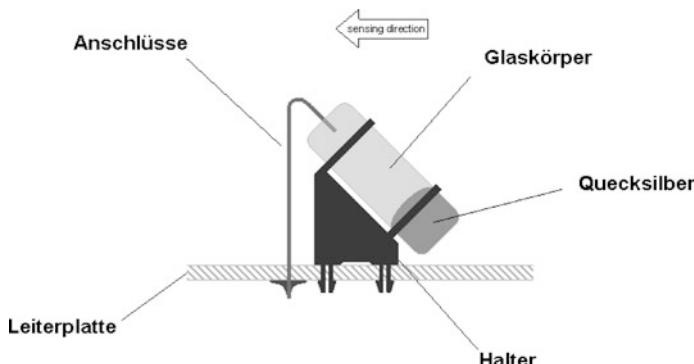
**Abb. 5.3** Rollmassen-Sensor (Ralamite-Sensor), aus [3]



Beim **Rollmassen-Sensor** (Ralamite von TRW) bewegt sich eine als Rolle ausgebildete Masse, die durch eine Bandfeder in der Ausgangslage gehalten und geführt wird. Bei einer definierten Verzögerung bewegt sich die Rolle über eine gewölbte Lauffläche und überfährt dabei eine Kontaktfeder, die den Stromkreis zur Aktivierung des Zünders schließt (Abb. 5.3). Über eine Justierschraube kann der Sensor auf einen bestimmten Schwell- oder Ansprechwert eingestellt werden. Auch bei diesem Sensor wird eine Tiefpass-Charakteristik durch die über die gewölbte Fläche gespannte Bandfeder realisiert: Hochfrequente Beschleunigungen, die beispielsweise von Vibrationen herrühren, werden so von der Rolle abgehalten und deren Bewegungsmöglichkeit eingeschränkt. Ebenso wie beim Kugelsensor ist das Gehäuse des Rollmassen-Sensors hermetisch verschlossen, seine Einbaurichtung ist durch einen kennzeichnenden Pfeil am Stahlgehäuse vorgegeben.

Seit dem Einsatz von mikromechanischen Beschleunigungsaufnehmern wurde die Anforderung nach einer zweiten, unabhängigen Bestätigung des Verzögerungssignals zur Auslösung verschiedener Insassenschutz-Systeme formuliert. Die dafür verwendeten

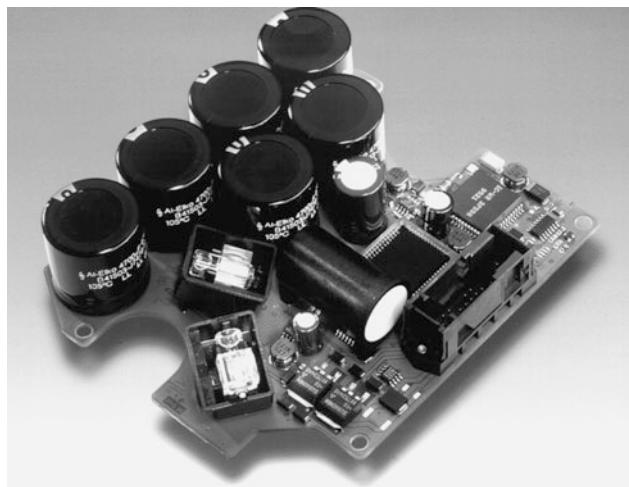
Sensoren werden als Safing-Sensoren bezeichnet, sie basieren ebenfalls auf dem Feder/Masse-Prinzip. Eine frühe Bauform dieser in der Airbag-Elektronik zum Einsatz gebrachten Safing-Sensoren besteht aus einem mit Quecksilber angefüllten Glaskörper, daher **Quecksilber-Safing-Sensor**. Der geneigte Glaskörper ist mittels einer Halterung auf der Leiterplatte in Fahrtrichtung aufgestellt, an dessen oberen Ende Kontakte angebracht sind (Abb. 5.4). Wirkt auf den Sensor eine ausreichend hohe Verzögerung, so bewegt sich aufgrund seiner Trägheit das Quecksilber innerhalb des schräg stehenden Glaskörpers und schließt am oberen Ende die Kontakte. Wegen des undefinierten Schaltverhaltens während einer Kollision, aber auch aus Gründen des Umweltschutzes, wurde diese Art von Safing-Sensoren nur kurz eingesetzt.



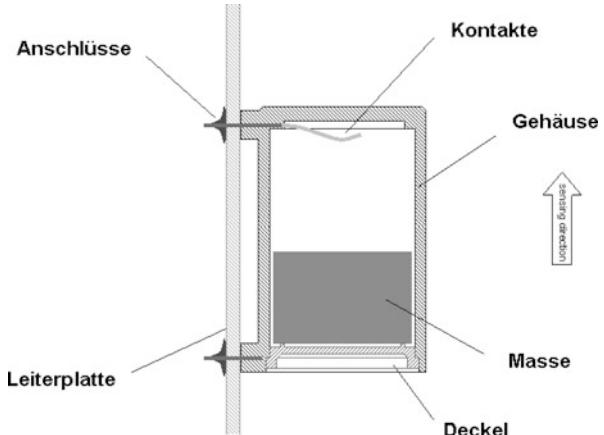
**Abb. 5.4** Aufbau eines Quecksilber-Safing-Sensors

Bei Überroll-Sensoren, wie sie in Cabrios installiert sind, kommen als Alternative dazu mehrere mit Flüssigkeit (Alkohol) gefüllte Libellen zum Einsatz. Hierbei wird die Position der in der Libelle befindlichen Luftblase mit einer Lichtschranke überwacht. Kommt es zum Überschlag, so verändert sich die Position der Luftblase und die Überroll-Schutzeinrichtungen werden aktiviert. Derartige Sensoren werden heute noch in Überrollsystemen für Cabrios verwendet. In Abb. 5.5 sind die beiden Flüssigkeitslibellen zu erkennen, die Luftblase befindet sich am oberen Ende, zwischen der Lichtschranke. Rechts daneben befindet sich noch ein G-Sensor, der bei einem Überschlag zusätzlich einen elektrischen Kontakt schließt. Die Elektronik wird senkrecht im Fahrzeug montiert, dadurch wirkt der G-Sensor in z-Achse, d. h. in vertikaler Fahrzeugrichtung. Die Sensorsignale werden von einem Mikrokontroller eingelesen und mit einem auf das Fahrzeug abgestimmten Algorithmus bewertet. Die sechs großen Kondensatoren dienen der Energiereserve zur Ansteuerung des elektromagnetischen Entriegelungssystems für die Überrollbügel. Beim **G-Sensor** handelt es sich im einfachsten Fall um eine in einem Gehäuse beweglich gelagerte Masse. Am oberen Ende des Gehäuses befinden sich Kontakte, die von der Masse geschlossen werden sobald der Sensor umgedreht wird (Abb. 5.6); durch die Gravitation wird die Masse gegen die Kontakte gedrückt.

**Abb. 5.5** Überroll-Sensor mit Flüssigkeitslibelle

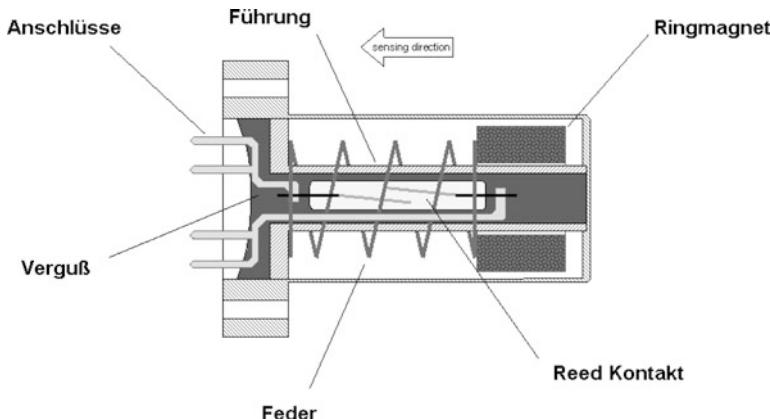


**Abb. 5.6** Aufbau eines G-Sensors (aus [1])



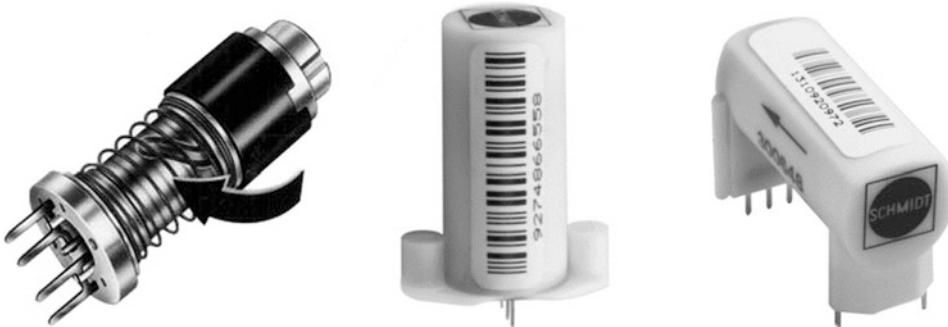
Der **Safing-Sensor mit Reed-Kontakt** besteht aus einer Führungshülse, auf der ein Rundmagnet und eine aus Edelstahl hergestellte Spiralfeder angebracht ist; dem im Spritzgussverfahren aus Kunststoff gefertigten Rundmagnet sind magnetische Partikel beigemischt. In der Führungshülse ist ein Reed-Kontakt (Reed = Zunge) als Schalter integriert, dessen Kontakte in einem mit Schutzgas gefüllten Glaskörper hermetisch dicht eingeschweißt sind (Abb. 5.7). Ein von außen wirksames Magnetfeld schließt den Kontakt, sodass ein Strom fließt. Bei Auftreten einer definierten Verzögerung auf den Safing-Sensor wird die Masse des Ringmagneten gegen die Feder bewegt und der Stromkreis zur Aktivierung der Insassenschutz-Systeme geschlossen. Die erforderliche statische Verzögerung zum Schalten des Safing-Sensors beträgt ca. 2 bis 3 g.

Um eine ausreichend lange Schließzeit der Kontakte zu erreichen, wird die in Abb. 5.8 (linke Darstellung) gezeigte Sonderbauform eingesetzt: Der Magnet wird in einer schrau-



**Abb. 5.7** Aufbau eines Safing-Sensors mit Reed-Kontakt

benförmigen Nut in der Führungshülse geführt und die Masse des Magneten bei einer Verzögerung in Longitudinalrichtung in eine rotatorische Bewegung über dem Schaltpunkt des Reed-Kontakt versetzt. Dadurch wird die längere Schließzeit des Safing-Sensors erreicht.



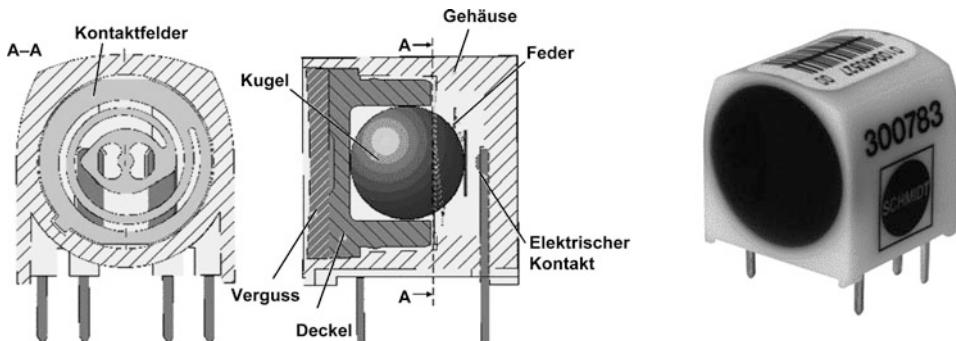
**Abb. 5.8** Unterschiedliche Bauformen von Safing-Sensoren mit Reed-Kontakt

Die Safing-Sensoren werden in stehenden und liegenden Bauformen verwendet. Bei der liegenden Bauform werden unterschiedlich lange Anschlussfahnen eingesetzt. Die langen Anschlussfahnen bieten den Vorteil eines größeren Abstands zur Leiterplatte, so dass unter dem Sensor weitere Bauelemente platziert werden können; sie erlauben so eine höhere Bestückungsdichte. Bei Safing-Sensoren wird auf den sonst üblichen integrierten Widerstand verzichtet. Die Anschlüsse der Kontakte sind aus Diagnosegründen doppelt ausgeführt, damit über einen Prüfstrom eine einwandfreie Kontaktierung der Sensoren auf der Leiterplatte überwacht werden kann. Das Gehäuse des Safing-Sensors besteht aus Kunststoff, die Führungshülse wird mit dem integrierten Reed-Kontakt, der Edelstahlfeder

und dem Ringmagneten eingepresst und mit einem PU-Material vergossen. Ein Fahrtrichtungspfeil auf der Oberseite des Gehäuses kennzeichnet eindeutig die Einbaurichtung des Sensors.

Durch die komplexen Insassenschutz-Systeme wird eine möglichst lange Schließzeit angestrebt, die mit den direkt schaltenden Safing-Sensoren nicht in ausreichendem Maße realisiert werden kann. Dies führte zur Entwicklung der **Trigger-Sensoren**, mit deren Hilfe das Signal zur Auslösung der Rückhaltesysteme durch einen elektronischen Schaltkreis künstlich verlängert wird. Dieser Schaltkreis ist in der Regel ein konfigurier- und programmierbares Bauteil, ein so genannter Monoflop, mit dem die Schaltdauer entsprechend den verschiedenen Anforderungen eingestellt werden kann.

Auch bei den Trigger-Sensoren kommt das Feder/Masse-Prinzip zum Einsatz: Die Masse ist als Stahlkugel ausgebildet, die gegen eine Spiralfeder aus Edelstahl drückt. Hinter der Spiralfeder befindet sich ein Kontaktpaar, das bei einer ausreichend großen Beschleunigung durch die Feder geschlossen wird und so das Trigger-Signal liefert (Abb. 5.9). Die erforderliche statische Verzögerung zum Schalten des Trigger-Sensors beträgt etwa 1,5 bis 2,0 g. Aus Diagnosegründen sind die Anschlüsse der Kontakte doppelt ausgeführt. Die einwandfreie Kontaktierung des Trigger-Sensors kann mit einem Prüfstrom kontrolliert werden. Das komplette Gehäuse, in das die Kontakte eingespritzt und die Feder und Kugel eingesetzt sind, besteht aus Kunststoff und ist mit einem Deckel verschlossen. Es wird zur Sicherheit mit einem PU-Material vergossen. Ein Fahrtrichtungspfeil auf der Oberseite des Gehäuses kennzeichnet die Einbaurichtung des Trigger-Sensors.

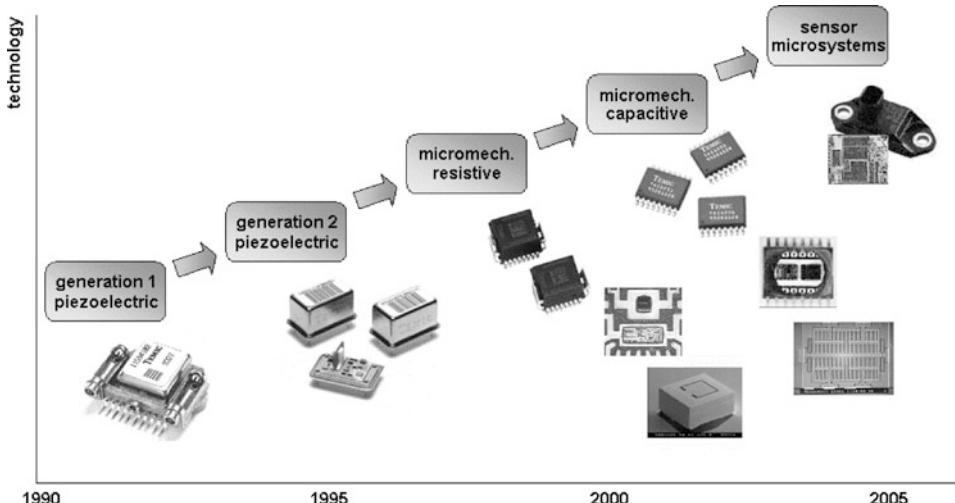


**Abb. 5.9** Aufbau und Realisierung eines Trigger-Sensors

### 5.1.3 Elektronische Sensoren

Der nächste Entwicklungsschritt bei Airbag-Steuergeräten ist in der Einführung der so genannten Single-Point-Sensing-Systeme zu sehen (vgl. Abb. 5.1). Diese neue Generation wurde erst durch die Bereitstellung elektronischer Beschleunigungssensoren ermöglicht.

Die ersten Varianten dieser elektronischen Sensoren waren piezoelektrische Sensoren, die von so genannten „bulk-micro-machined“ und „surface-micro-machined“ Crash-Sensoren abgelöst wurden (Abb. 5.10). Damit wurde eine verbesserte Erkennung des Crash-Signals erreicht und die gezielte Analyse der Verzögerung ermöglicht.



**Abb. 5.10** Entwicklungsstufen bei elektronischen Sensoren (aus [4])

Elektronische Sensoren verfügen über einen Messbereich von ungefähr 30 bis 50 g. Zur Auswertung der Airbag-Elektronik steht ein analoges oder ein digitales Ausgangssignal zur Verfügung. Bei analogen Systemen beträgt die Ausgangsspannung etwa 40 mV/g und entspricht damit bei einer Betriebsspannung von  $U_b = 5$  V einem Messbereich von  $\pm 50$  g. Um zu erreichen, dass sowohl Verzögerung als auch Beschleunigung gemessen werden können, wird der Nullpunkt der Ausgangsspannung üblicherweise bei  $0,5 \cdot U_b$  eingestellt. Bei digitalen Systemen beträgt die typische Datenbreite 8 Bit und ergibt somit eine Auflösung des Messbereichs von –128 bis +127 Werten.

Bei **piezoelektrische Sensoren** wird der Piezo-Effekt genutzt: Ein Piezo-Keramik-Element wird dabei auf einen Träger montiert und liefert eine elektrische Spannung. Wirkt eine Verzögerung auf das Piezo-Element, so wird es deformiert und es erfolgt ein Anstieg der Piezo-Spannung, die als Analogwert am Ausgang zur weiteren Auswertung bereitsteht. Dabei verhält sich die Ausgangsspannung proportional zur Verzögerung.

Bei den piezoelektrischen Sensoren der ersten Generation waren die Gehäuse mechanisch stabil ausgeführt und zur besseren Pulsübertragung in der Airbag-Elektronik verschraubt. Bei der zweiten Generation wurde Wert darauf gelegt, einen erheblich leichteren und kleineren Aufbau zu realisieren. Damit wurde ermöglicht, die Sensoren auf der Leiterplatte zu verlöten und dennoch die Pulsübertragung zu gewährleisten.

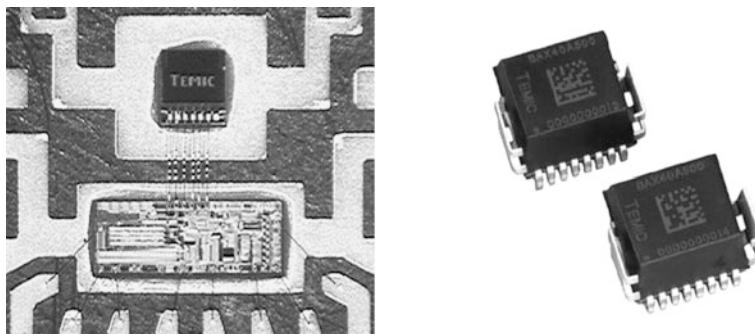
In Abb. 5.11 ist in der linken Darstellung ein piezoelektrischer Sensor gezeigt, bei dem das Piezo-Element im Halter senkrecht aufgestellt ist, um eine Sensierung in horizontaler Richtung realisieren zu können. Die rechte Darstellung zeigt einen Sensor mit einem liegenden Element; die Sensierungsrichtung ist hierbei senkrecht zur horizontalen Ebene. Um ein hermetisch dichtes Gehäuse bereitzustellen, wird die  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramik auf dem Gehäuseboden verlötet und mit den Anschlüssen in Form von Glas/Metall-Durchführungen verbunden. Die Gehäuse der Sensoren bestehen aus vernickeltem Stahl, wobei der Deckel mit dem Gehäuseboden verschweißt ist.



**Abb. 5.11** Unterschiedliche Bauformen piezoelektrischer Sensoren (aus [1])

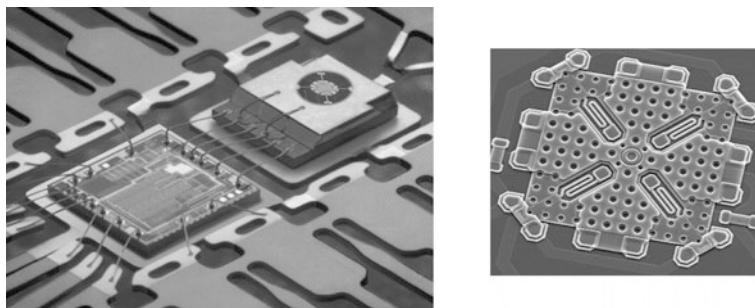
Zur Herstellung von **mikromechanischen Sensoren** werden wirtschaftliche und rationelle Fertigungsverfahren eingesetzt, die die moderne Halbleiter-Industrie bietet; es handelt sich dabei um die so genannte MEMS-Technologie (MEMS: Mikro-elektrische mechanische Systeme). Dabei sind das Sensor-Element und die entsprechende Auswertung in einem elektronischen Bauelement integriert. Dem gegenüber bestanden die ersten mikromechanischen Sensoren aus dem Sensor-Element und einer extern aufgebauten Signalverarbeitung. Ein Beispiel dafür war der SA20-Sensor von SensoNor, der in hohen Stückzahlen in der Airbag-Elektronik eingesetzt wurde.

Bei mikromechanischen Sensoren wird zwischen Single-Chip- und Dual-Chip-Design unterschieden: Das Single-Chip-Design kommt heute in der Regel bei so genannten surface-micro-machined Sensoren zum Einsatz, während das Dual-Chip-Design bei bulk-micro-machined Sensoren angewandt wird. In Abb. 5.12 ist ein Dual-Chip-Sensor dargestellt: Die beiden Chips bilden das Sensor-Element und die erforderliche Auswerteschaltung, in der Regel auf ASIC-Basis (ASIC: Application Specific Integrated Circuit). Durch die Auswerteschaltung werden die Signale des Sensor-Elements verstärkt und gefiltert und stehen schließlich am Ausgang der Airbag-Elektronik für die weitere Verarbeitung zur Verfügung.



**Abb. 5.12** Mikromechanischer Dual Chip-Sensor mit Sensorelement und Auswerteschaltung (aus [1])

Im oberen Teil der linken Darstellung in Abb. 5.12 ist das Sensor-Element, darunter die Auswerteschaltung (ASIC) zur Signalauswertung gezeigt. Beide Chips sind auf einem gemeinsamen Rahmen montiert und über Drähte elektrisch miteinander verbunden. Der komplette Sensor wird in einem speziellen Transfer-Molding-Prozess mit Kunststoff umspritzt, wobei die Anschlüsse für eine so genannte „Chip-on-Board-Montage“ vorgeformt sind.



**Abb. 5.13** Mikromechanischer kapazitiver Dual Chip-Sensor (aus [1])

In Abb. 5.13 ist ebenfalls ein Dual Chip-Sensor dargestellt, der allerdings auf dem Kapazitätsprinzip basiert. Die Montage der beiden Chips und deren elektrische Verbindung sind mit dem in Abb. 5.12 gezeigten Sensor vergleichbar. Im rechten Bildteil sind die mittels SEM-(Scanning Electronic Microscope-)Vergrößerung dargestellte *g*-Zellen des auf dem kapazitiven Messverfahren basierenden Sensors zu erkennen. Die meander-förmige Struktur dient der flexiblen Aufhängung der seismischen Masse. Dem entsprechend ist die Sensierungsrichtung dieses Sensors senkrecht zur horizontalen Ebene.

Bei der Herstellung der **mikromechanischen Sensor-Elemente** werden zwei grundlegende Verfahren unterschieden, dem bulk-micro-machining- und dem surface-micro-machining-Verfahren. Beim bulk-micro-machining-Verfahren wird die seismische Masse aus einem relativ dicken, bis zu  $500\text{ }\mu$  starken Siliziummaterial als dreidimensionale Struktur herausgeätzt. Um sie gegen Umwelteinflüsse und sonstige Verunreinigungen zu schützen, ist die Masse zwischen zwei dünneren, etwa  $200$  bis  $300\text{ }\mu$  starken Siliziumschichten eingeschlossen. Bei den Sensor-Elementen erfolgt die Messung entweder durch eine Widerstands-, eine Kapazitäts- oder eine Frequenzänderung, die durch eine Beschleunigung bzw. eine Verzögerung hervorgerufen wird.

**Abb. 5.14** Bulk-micro-machined Sensor-Element  
(aus [5])

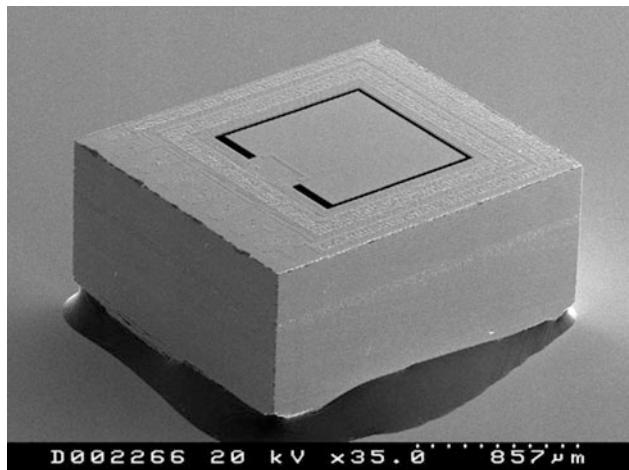
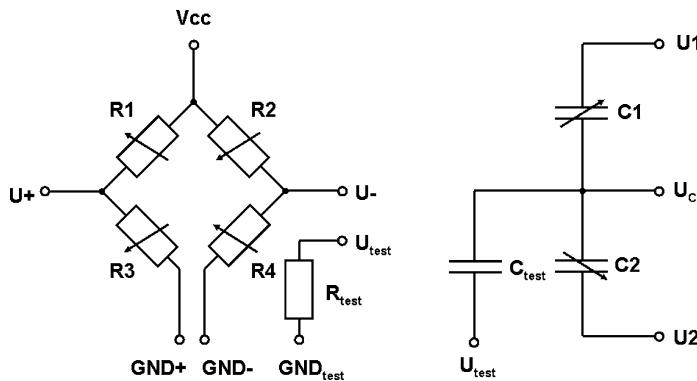


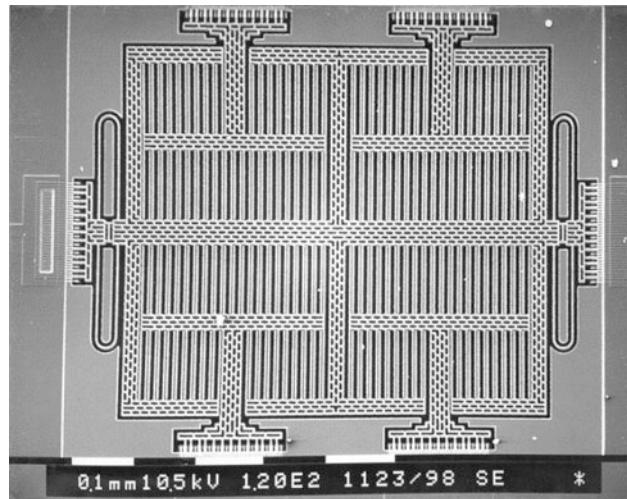
Abbildung 5.14 zeigt ein im bulk-micro-machining-Verfahren hergestelltes Sensor-Element; die drei-dimensionale Struktur ist zu erkennen, die als obere Abdeckung vorgesehene Siliziumschicht allerdings noch nicht aufgebracht. Zur Messung der Beschleunigung wird bei einem derartigen Sensor-Element ein Masse-Element verschoben und ergibt eine Widerstandsänderung, denn die Widerstände befinden sich in den Verbindungselementen zwischen der seismischen Masse und dem Rahmen. Sie sind als Wheatstonsche Brücke geschalten (Abb. 5.15), wobei aus Diagnosegründen die Masseanschlüsse getrennt vom Sensor-Element herausgeführt werden. Zur Diagnose wird ein zusätzlicher Widerstand eingesetzt, der gleichzeitig die gesamte Struktur abdeckt. Bei eventuell auftretenden Brüchen in der Struktur wird der Widerstand hochohmig. Basiert der Sensor auf dem kapazitiven Prinzip, so ist die seismische Masse als Kondensatorplatte ausgeführt. Die obere und untere Abdeckung des Sensors ist gegenüber dem Träger durch eine Glasschicht isoliert, die als weitere Kondensatorplatte dient. Dadurch ist es möglich, die Verzögerung durch ein kapazitives Differenzmess-System zu erfassen. Bei diesen Sensoren wird eine zusätzliche Elektrode angebracht, die es ermöglicht, das Sensor-Element durch Aufbringung einer Spannung elektrostatisch auszulenken und zu detektieren.



**Abb. 5.15** Ersatzschaltbild für widerstands- und für kapazitätsbasierte Sensoren

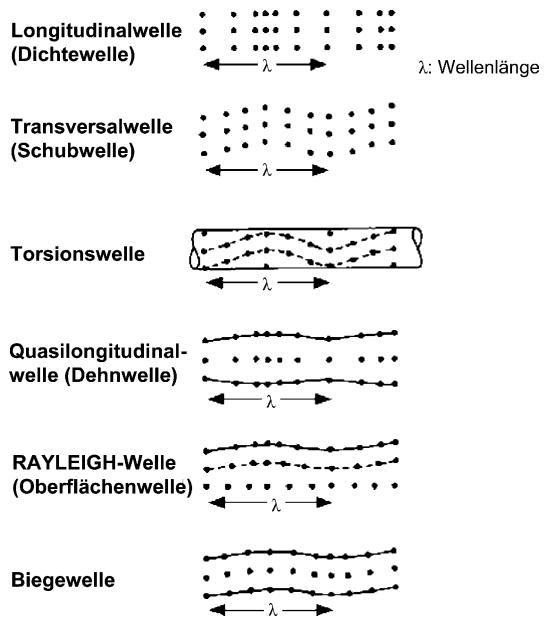
Bei einem im surface-micro-machining-Verfahren hergestellten Sensor wird erheblich weniger Silizium als beim bulk-micro-machining-Verfahren benötigt; ein erheblicher Kostenvorteil ist die Folge. Diese Sensoren basieren üblicherweise auf dem kapazitiven Messprinzip. Die seismische Masse des Sensors, dargestellt in Abb. 5.16, ist als Kammstruktur ausgebildet und flexibel auf dem Träger gelagert. Der Träger selbst ist ebenfalls als, allerdings fest gelagerte Kammstruktur ausgebildet und greift in die Kammstrukturen der seismischen Masse ein. Die dabei ineinander greifenden Zähne der beiden Kämme wirken so als Kondensatorplatten, zwischen denen die Kapazität nach dem Differenz-Messprinzip erfasst wird. Ein erheblicher Vorteil des surface-micro-machining-Verfahrens besteht darin, dass die komplette Signalaufbereitung auf dem Chip untergebracht werden kann. Dadurch lassen sie sich äußerst preisgünstige Sensoren, so genannte Single-Chip-Sensoren, herstellen.

**Abb. 5.16** Surface-micro-machined Sensor-Element  
(aus [1])



Dem Einsatz von **Körperschall-Sensoren** liegen folgende Überlegungen zugrunde: Der Begriff „Körperschall“ wird für Schwingungen im Festkörper verwendet, sie liegen im Bereich des menschlichen Hörvermögens (20 bis 20.000 Hz). Die bei heutigen Airbag-Systemen angewandten Beschleunigungssensoren sind aufgrund ihres Frequenzgangs lediglich dazu geeignet, die während einer Kollision auftretende Biegewelle zu erfassen (vgl. Abb. 5.17). Diese breitet sich mit einer mittleren Geschwindigkeit von 300 m/s aus. Um jedoch eine schnellere Erfassung des Verzögerungssignals zu ermöglichen, sind Sensoren erforderlich, die auftretende Dichtewellen, so genannte Longitudinalwellen, detektieren. Diese Wellenform tritt in unendlich ausgedehnten Medien auf, d. h. die Ausdehnung des Mediums ist in allen Richtungen groß im Vergleich zur Länge der Longitudinalwelle. Die mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwellen beträgt 5.000 m/s und ermöglicht eine erhebliche kürzere Sensierungszeit. Dieses Prinzip findet Anwendung bei Körperschall-Sensoren, die für den Einsatz in der Airbag-Elektronik konzipiert sind. Sie sind in der Lage, ein Signal bis zu einer Frequenz von 20 kHz aufzunehmen. Zu berücksichtigen ist dabei allerdings, dass die Konstruktion des Fahrzeugs einen erheblichen Einfluss auf die Signalübertragung aufweist. Die Eigenschaft der Pulsübertragung hängt von den verwendeten Materialien, von der Anzahl und von der Art der Verbindungen ab.

**Abb. 5.17** Wellenformen des Körperschalls

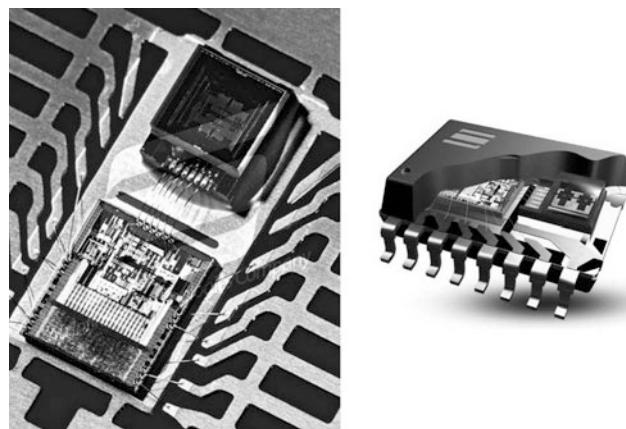


Durch den Einsatz eines Körperschall-Sensors kann zur zeitgerechten Plausibilisierung auf die Verwendung zusätzlicher externer Sensoren verzichtet werden, ohne die Systemanforderungen einzuschränken. In naher Zukunft erscheint der Einsatz eines Körperschall-Sensors in externen Seiten- und Up-Front-Sensoren realisierbar.

Um das Überschlagen von Automobilen (z. B. Cabrios, Geländefahrzeuge und Limousinen der Oberklasse) frühzeitig zu erkennen und vorhandene Sicherheitsmaßnahmen

wie Kopfschutz-Systeme und Gurtstraffer zeitgerecht zu aktivieren, werden **Überroll- oder Rollraten-Sensoren** (Abb. 5.18) eingesetzt. Auch bei diesen Sensoren werden mikromechanische Sensor-Systeme verwendet. Sie basieren zumeist auf dem Coriolis-Effekt: Die mikromechanische Struktur, z. B. eine Stimmgabel oder eine rotatorisch oszillierende, mikromechanische Struktur, wird dazu in Schwingung versetzt. Wird die Struktur nun durch eine externe Rotation beaufschlagt, wird die Corioliskraft wirksam und es stellt sich eine dem entsprechende Gegenkraft ein, die gemessen werden kann und ein Maß für die Rollrate darstellt. Diese Rollrate entspricht einer Drehgeschwindigkeit und wird in Grad pro Sekunde angegeben; derartige Sensoren haben einen Messbereich üblicherweise von 200 bis 300°/s. Überroll-Sensoren sind in der Regel in Steuergeräten integriert, sie können aber auch als separate Module eingesetzt werden, in denen die Überroll-Sensorik integriert ist, die ein Signal zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung stellt.

**Abb. 5.18** Rollraten-Sensor



Schließlich soll zum Abschluss dieses Abschnitts eine Zusammenfassung der heute in der Fahrzeug-Sicherheit verwendeten **MEMS-Sensor** (MEMS: Mikro-elektrisches, mechanisches System), allerdings ohne Anspruch auf Vollständigkeit, gezeigt werden. Sie ist in Tab. 5.1 aufgelistet.

---

## 5.2 Sensor-Anwendungen

Die derzeit eingesetzten Sensoren sollen nachfolgend unterschieden werden in die Sensorik, die bei Frontal-, Seiten- und Überschlag-Unfällen Anwendung findet, wobei zu trennen ist in Beschleunigungs-, Winkelgeschwindigkeit-, Druck- und Stoßwellen-Sensoren. Zudem werden Sensoren zur Erkennung von Insassen und äußeren Verkehrsteilnehmern sowie von Verkehrssituationen erläutert. Schließlich werden die Assistenz-Systeme dargestellt, die sich heute bereits in vielen PKW eingesetzt werden.

**Tab. 5.1** Übersicht zu MEMS-Sensoren

Sensor	Hersteller	Typ	Achse	Messbereich
<b>Beschleunigung</b>	ADI	ADXL78	x	±35 bis ±70 g
		ADXL278	x/y	±35 bis ±70 g
	Bosch	SMB050/052	x	±35 bis ±50 g
		SMB060/062	x/y	±35 bis ±50 g
		SMB065/067	x/-x	±35 bis ±50 g
		SMB180	x	±50 bis ±100 g
		SMB190	x	±200 g
		SMB25x	x	±35 bis ±200 g
		SMB26x	x/y	±35 bis ±200 g
	Freescale	Hera	x/y	±20 bis ±100 g
<b>Low g-Beschleunigung</b>	ADI	ADXL103	x	±1,7 g
		ADXL203	x/y	±1,7 g
	Bosch	SMB220	x	±4,7 g
	Kionix	KXM60-1120	x	±1 bis ±6 g
		KXM60-1130	x/y	±1 bis ±6 g
	Memsic	MXR7150V	x/y	±2 g
	Freescale	Colossus	z	±1,5 bis ±10 g
	ST-M	LIS2L02AL	x/y	±2 g
	VTI	SCA610	x	±0,5 bis ±1,7 g
		SCA1000	x/y	±1,7 g
		SCA1020	z/y	±1,7 g
<b>Drehraten-Sensoren</b>	ADI	ADXRS150	x	±150 °/s
		ADXRS300	x	±300 °/s
	BAE <sup>1)</sup>	CSR05		±50 bis ±200 °/s
	BEI <sup>2)</sup>	MicoGyro		±75 bis ±300 °/s
	Bosch	SMG040	x	±250 °/s
		SMG060	x	±240 °/s
		SMG061	x	±240 °/s
		SMG070	x	±187 °/s
	Freescale	Newton	x	±300 °/s
		Galilée	z	±300 °/s
	Honeywell	<sup>*)</sup>		
	Kionix	KGF01-300	x	±300 °/s
	Melexis	<sup>*)</sup>		
	muRata	GYROSTAR	x	±300 °/s
	Panasonic	EWTS62	x	±300 °/s
	SensoNor	SAR10	x	±250 °/s
<b>Mehrach-Sensoren <sup>3)</sup></b>	ADI	<sup>*)</sup>		
<b>Druck-Sensoren</b>	Bosch	SMD085	-	60 bis 115 kPa
	infineon	KP106	-	60 bis 130 kPa

Anmerkungen:

<sup>1)</sup> Silicon Sensing Systems<sup>2)</sup> Sytron Donner Automotive Division<sup>3)</sup> Kombinierter Sensor z.B.: Drehrate und low g-Sensor<sup>\*)</sup> Kundenspezifische Entwicklung, keine Daten verfügbar

### 5.2.1 Up-Front-Sensoren

Die Up-Front-Sensoren (Abb. 5.19) sind im Frontbereich des Automobils angebracht; ihre Aufgabe besteht darin, eine Kollision in einer möglichst frühen Phase zu erkennen. Dabei wird das Ziel verfolgt, eine sicherheitstechnisch orientierte Abstufung verschiedener Crash-Szenarien zu erreichen, insbesondere aber die Schwere eines Unfalls zu detektieren. Das aufgenommene Signal wird digital an die Airbag-Elektronik übertragen und über einen geeigneten Crash-Algorithmus bewertet. Damit wird ermöglicht, in Abhängigkeit von der Unfallschwere angepasste, so genannte adaptive Insassenschutz-Systeme zeitgerecht und abgestuft zu aktivieren. Aufgrund der exponierten Installation im Frontbereich des Fahrzeugs müssen Up-Front-Sensoren gegen Spritzwasser geschützt sein und über wasserdichte Steckverbindungen verfügen. Zudem sind sie für einen höheren Temperaturbereich, bis zu 105 °C; ausgelegt.

**Abb. 5.19** Up Front-Sensor  
(aus [1])



### 5.2.2 Seiten-Sensoren

Mit der Einführung der Seiten-Airbags wurden zusätzliche Sensoren erforderlich, um eine Seitenkollision rechtzeitig detektieren zu können. Aufgrund der Signallaufzeiten in der Fahrzeugstruktur war jedoch die zeitgerechte Erkennung einer drohenden Kollision mit Hilfe von herkömmlichen Sensoren nicht möglich. Abhilfe schafften hier erst ausgelagerte Sensoren, so genannte Seiten-Sensoren.

Die ersten Seiten-Sensoren bestanden aus einem **Beschleunigungsaufnehmer** und einem Mikrokontroller, der mit Hilfe eines Algorithmus die Signal-Vorverarbeitung bewirkte (Abb. 5.20). Das zur Airbag-Auslösung erforderliche Signal wurde als PWM-Signal (PWM: Pulsweiten-Modulation) in drei Stufen an die Airbag-Elektronik übertragen: Dabei entsprach das Impuls/Pause-Verhältnis der Unfall- oder Aufprallschwere. Zwei weitere Stufen wurden einmal als „Life“-Signal und zum Anderen als Fehler-Signal verwendet, sodass insgesamt fünf unterschiedliche Stufen für die Signalübertragung realisiert werden konnten.

Die aktuell eingesetzten Seiten-Sensoren sind dem gegenüber mit einer digitalen Kommunikationseinheit ausgestattet, mit der das Crash-Signal unmittelbar an die Airbag-Elektronik übertragen wird. Das Signal wird dann mit Hilfe eines Crash-Algorithmus nach vorher definierten Kriterien bewertet, und die Insassenschutz-Systeme werden aktiviert.

**Abb. 5.20** Seiten-Sensor mit integrierter Signal-Vorverarbeitung (aus [6])



Der in Abb. 5.21 dargestellte Seiten-Sensor besteht aus dem mikromechanischen Sensor-Element und der integrierten, anwendungsspezifischen ASIC-Einheit (ASIC: Application Specific Integrated Circuit). Das Beschleunigungssignal wird der Airbag-Elektronik digital zur Verfügung gestellt.

**Abb. 5.21** Seiten-Sensor mit digitaler Datenübertragung (aus [1])



Ein anderes Prinzip bei der Detektierung von Seitenkollisionen wird bei **Drucksensoren** angewandt: Diese Sensoren sind in der Fahrzeugtür installiert und messen mit Hilfe eines Druckaufnehmers den Druckanstieg bei einem seitlichen Aufprall. Sie sind ebenfalls mit einer digitalen Kommunikationseinheit ausgestattet, mit der der aktuelle Druckverlauf an die Airbag-Elektronik übertragen wird. Das Signal wird über einen Crash-Algorismus für die Aktivierung der Insassenschutz-Systeme aufbereitet und bewertet. Bei dem in Abb. 5.22 dargestellten Druck-Sensor ist rechts das mikromechanische Sensor-Element mit der erforderlichen Einströmöffnung zu erkennen. Der ASIC-Schaltkreis dient der Signalaufbereitung und der Übertragung des Drucksignals an die Airbag-Elektronik.

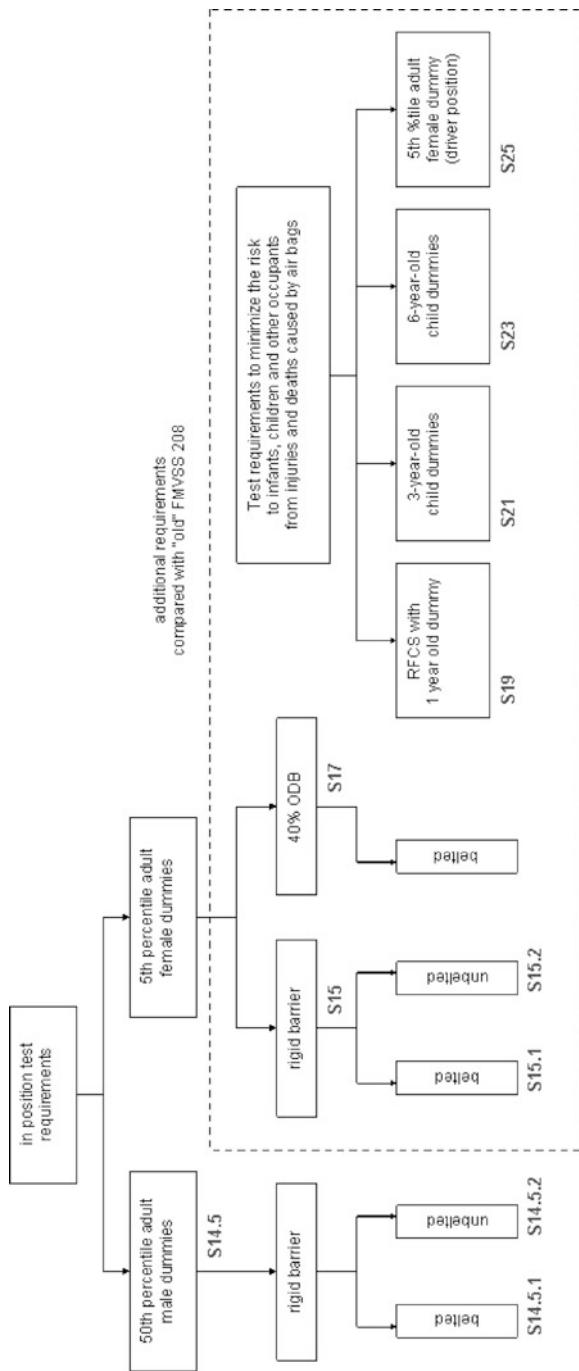
**Abb. 5.22** Druck-Sensor mit digitaler Kommunikationseinheit (aus [1])



### 5.2.3 Systeme zur Insassen-Erkennung

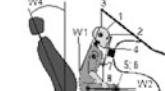
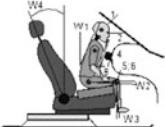
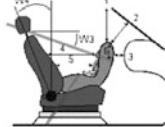
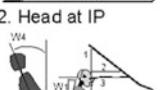
Um das Verletzungsrisiko der Insassen im Falle einer Airbag-Auslösung so gering wie möglich zu halten, wird in der US-amerikanische Sicherheitsgesetzgebung ein geringes Risiko bei Airbag-Entfaltung (Low risk deployment) und/oder eine Airbag-Abschaltung (Suppression of airbags) bei OoP-(Out-of-Position-)Situationen oder bei Anwesenheit von Insassen gefordert (vgl. Abb. 5.23). Hierbei ist die unterschiedliche Auslegung von Airbag-Systemen in Europa und in den USA zu berücksichtigen, denn in den USA sind im Gegensatz zu Europa die Airbag-Systeme auch für den nicht angegurteten Insassen auszulegen. Die Folge davon ist, dass Airbags innerhalb der gleichen Aufblaszeit mit einer größeren Gasmenge gefüllt werden müssen. Die für den nordamerikanischen Markt ausgelegten Airbags sind dadurch aggressiver als die in Europa verwendeten; es könnten so OoP-Situationen zu schweren, mitunter sogar zu fatalen Verletzungen der Insassen führen. Für die Einführung der den gesetzlichen Anforderungen nach FMVSS 208 gerecht werdenen Systeme ist eine definierte Ausrüstungsquote vorgegeben. Die schrittweise Einführung sieht zwei Phasen mit unterschiedlichen Testbedingungen vor: Phase I startete im Oktober 2005, und die Phase II begann im Jahr 2010. Sie betrifft zudem alle neuen Fahrzeuge, die bis 2015 erstmalig in den Markt gebracht werden. Erst danach wird von einer Ausrüstungsquote von 100 % ausgegangen.

Die Versuche mit geringem Risiko bei einer Airbag-Entfaltung umfassen Tests, bei denen die Beifahrerseite mit einem 12-monatigen Kinder-Dummy in 23 verschiedenen



**Abb. 5.23** Testanforderungen nach FMVSS 208 (aus [1])

Sitzpositionen, mit einem 3-jährigen Kinder-Dummy (mit und ohne Sitzerhöhung) sowie mit einem 6-jährigen Kinder-Dummy besetzt ist. Bei Versuchen für den Nachweis des verminderten Risikos des Fahrer-Airbags ist die Fahrerseite mit einem 5 % female-Dummy zu besetzen; die Versuche werden in verschiedenen Testkonfigurationen durchgeführt (Abb. 5.24).

	Driver side	Passenger side		
Dummy:	Hybrid III 5% female	1 year old child	3 year old child	6 year old child
Configuration:	1. Chin on module  2. Chin at rim 	Dummy in 23 different child safety seats 	1. Chest at IP  2. Head at IP 	1. Chest at IP  2. Head at IP 

**Abb. 5.24** Test-Anforderungen nach FMVSS 208 (Low Risk Deployment), aus [1]

Um den Nachweis für ein geringes Risiko bei Airbag-Entfaltung und/oder für eine Airbag-Abschaltung bei OoP-Situationen oder bei Anwesenheit von Insassen zu erbringen, ist die Auslösung des Airbags auf den Insassen bzw. in Abhängigkeit von der Belegung des Sitzes abzustimmen. Zu diesem Zweck wird bei heutigen Systemen die Sitzbelegung durch Messung des Gewichts auf dem Sitz ermittelt und eine dementsprechende Klassifizierung vorgenommen.

Zur kurzfristigen Lösung für das Abschalten des Beifahrer-Airbags bei **Benutzung von Kindersitzen** wurde zunächst ein manuell zu betätigender Schalter, ein **Airbag-off-Schalter**, im Fahrzeuge installiert. Mit diesem Schalter, der mit dem Zündschlüssel betätigt wird, kann der Beifahrer-Airbag vom Benutzer aktiviert und deaktiviert werden. Eine geeignete Anzeige im Instrumentenfeld zeigt den jeweiligen Systemzustand an. Der gravierende Nachteil eines derartigen Systems besteht darin, dass der aktuelle Belegungszustand nicht automatisch angezeigt werden kann. Die Aktivierung und die Deaktivierung des Systems hängt somit ausschließlich vom Verantwortungsbewusstsein und der Aufmerksamkeit (oder von der Vergesslichkeit) des Benutzers ab.

Eine Alternative zu den Airbag-off-Schaltern stellt der Einsatz von **Kindersitz-Transpondern** zur Erkennung von Kindersitzen dar. Bei diesem System ist eine Antenne in der Fläche des Fahrzeugsitzes integriert; die Kommunikation erfolgt über ein Hochfrequenz-Feld mit dem im Kindersitz untergebrachten Transponder. Damit kann das Vorhandensein, aber auch die Ausrichtung des Kindersitzes ermittelt werden, sodass detektiert werden

kann, ob der Kindersitz vorwärts oder rückwärts ausgerichtet auf dem Fahrzeugsitz eingesetzt ist. Der Nachteil dieses Systems ist darin zu sehen, dass diese Maßnahme nur mit Kindersitzen funktioniert, die über einen speziell angebrachten Transponder verfügen. Zurzeit existieren keine einheitlichen, hersteller-unabhängigen Standards, aber Bestrebungen zur Lösung dieser Unzulänglichkeit wurden vor geraumer Zeit initiiert.

Die in heutigen Fahrzeugen eingesetzten sitzgebundenen Insassen-Erkennungssysteme werden dazu verwendet, das Vorhandensein und im positiven Fall, das Gewicht des Beifahrers zu erfassen. Je nach gemessener Masse erfolgt eine Klassifizierung, um zwischen kindlichen und erwachsenen Insassen zu unterscheiden. Dazu wird üblicherweise die in Tab. 5.2 zusammenfassend dargestellte Einteilung vorgenommen.

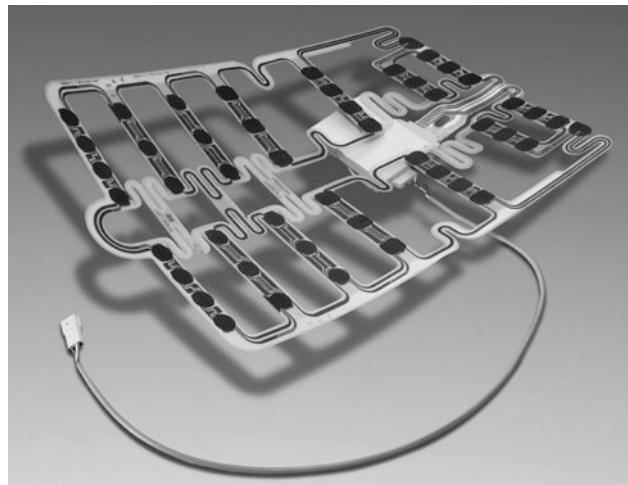
**Tab. 5.2** Übersicht typische Gewichtsklassen

Klasse	Bedeutung	Massenklaße
0	Leer oder Kindersitz	0 bis $\leq 15$ kg
1	Belegt mit Kindersitz oder mit Kind bis 6 Jahre	$> 15$ bis $\leq 30$ kg
2	Belegt mit 5 %-Frau oder größer	$> 30$ kg

Die in Tab. 5.2 dargestellten Massenklassen geben allerdings nur Anhaltswerte wieder; die tatsächlich verwendeten Werte hängen von den Anforderungen des Fahrzeugherrstellers und vom eingesetzten Insassen-Erkennungssystem ab. Hierbei werden zwei grundlegend unterschiedliche Prinzipien angewandt: das sitzflächen-integrierte und das sitzstruktur-integrierte Erkennungssystem.

Beim **sitzflächen-integrierten Erkennungssystem** handelt es sich um Sitzmatten, die sich zwischen dem Sitzpolster und dem Bezug befinden. Die am meisten verbreiteten Systeme sind die Sitzmatten der Firmen IEE und DELPHI. Bei den IEE-Sitzmatten ist in eine Folie eine bestimmte Anzahl von druckabhängigen Widerständen integriert (Abb. 5.25). Die Form der Sitzmatte und die Anzahl der Messpunkte werden der jeweiligen Sitzfläche angepasst. Ist die Anzahl der Messpunkte groß genug, kann das Profil des Insassen auf dem Sitz ausreichend genau ermittelt werden. Bei der als Bladder (= Blase) bezeichneten DELPHI-Sitzmatte wird ein mit Silikon gefülltes Kissen eingesetzt, das über einen Schlauch mit einem Druckaufnehmer verbunden ist. Die durch den Insassen auf den Sitz wirkende Belastung hat einen definierten Druckanstieg im Kissen zur Folge, der mit dem Druckaufnehmer gemessen wird. Der wesentliche Nachteil der in der Sitzfläche integrierten Systeme ist die hohe Empfindlichkeit gegenüber mechanischen und thermischen Beanspruchungen in der Sitzoberfläche, die bei einer langjährigen Benutzung eines Fahrzeugs auftreten. Beim Einsatz von sitzflächen-integrierten Systemen ist eine zusätzlichen Elektronik-Ausstattung erforderlich, die das eigentliche Erkennungssignal bewertet und als Ergebnis an die Airbag-Elektronik im direkten Anschluss oder über die Fahrzeug-CAN-Verbindung (CAN: Controller Area Network) überträgt.

**Abb. 5.25** Sitzmatte als sitzflächen-integriertes Erkennungssystem (aus [1])



Eine Alternative dazu ist in den **sitzstruktur-integrierten Erkennungssystemen** zu sehen. Dabei werden Gewichts-Sensoren verwendet, mit denen das Insassengewicht, das auf die Sitzstruktur wirkt, gemessen wird (Abb. 5.26). Die Gewichtsmessung erfolgt an den Sitz-Befestigungspunkten. Bei den Gewichtssensoren werden verschiedene Technologien angewandt: Es werden kapazitive Messverfahren, das Tauchspulen-Prinzip, Hall-Sensoren oder Dehnungsmessstreifen (DMS) eingesetzt. Die Gewichtssensoren werden entweder einzeln oder über ein Bus-System mit der Airbag-Elektronik verbunden.

**Abb. 5.26** Gewichts-Sensor als sitzstruktur-integriertes Erkennungssystem (aus [7])



Die auf Gewichtsmessung basierenden Erkennungssysteme, ob in der Sitzfläche oder in der Sitzstruktur integriert, haben einen gemeinsamen, gravierenden Nachteil: Ein zur Vermeidung von Gurtlose mit großer Kraft auf dem Sitz befestigter Kindersitz wird bei gleichzeitig gesperrtem Gurtautomat als hohes Gewicht interpretiert. Um diese Fehlinterpretation zu kompensieren und somit eine Verwechslung zwischen Kindersitz und einem erwachsenen Insassen ausschließen zu können, werden zusätzliche Gurtkraft-Sensoren verwendet, um so eine Eindeutigkeit der Detektierung sicher zu stellen.

Die generelle Zielsetzung künftiger Insassen-Erkennungssysteme besteht darin, das Vorhandensein der Insassen zu detektieren und im positiven Fall zu klassifizieren, um eine auf den jeweiligen Insassen angepasste Wirkung der Insassenschutz-Systeme zu realisieren. Dabei werden sowohl die körperlichen Merkmale der Insassen, wie Gewicht, Größe und Sitzposition, sowie die aktuelle Unfallsituation hinsichtlich Unfallschwere, Anprallrichtung und beaufschlagter Fahrzeugstruktur berücksichtigt. Darüber hinaus ist ein weiterer Schwerpunkt der neueren Sensorentwicklung darin zu sehen, eine riskante Vorverlagerung der Insassen, d. h. eine mögliche OoP-Situation (OoP: Out of Position) zu erkennen, um eine Airbagauslösung gezielt zu steuern oder gar zu unterbinden.

Bei den **optischen Insassen-Erkennungssystemen** konzentriert sich die aktuelle Entwicklung auf den Einsatz digitaler Kameras. Mit Hilfe einer oder mehrerer derartiger Kameras wird die zu beurteilende Szenerie (möglichst drei-dimensional) aufgenommen und über eine nachgeordnete Bildverarbeitung ausgewertet. Als Bildaufnehmer lassen sich Stereokameras sowie zwei- und drei-dimensionale Kameras (2D- und 3D-Kameras) verwenden. Bei der Verwendung von Stereo-Kameras wird die drei-dimensionale Szenerie aus mehreren, mindestens aber zwei Einzelbildern zusammengesetzt und somit der räumliche Eindruck vermittelt. Dem gegenüber wird beim Einsatz von 2D-Kameras zusätzlich die Laufzeit des Lichts für jeden Bildpunkt (pixel-orientiert) gemessen. Bei 3D-Kamera-Systemen wird moduliertes Licht eingesetzt und die Phasenverschiebung zwischen dem emittierten und dem reflektierten Licht ermittelt. Über diese Phasenverschiebung erhält man eine exakte Laufzeitbestimmung und damit den Abstand des Kollisionsobjekts für jeden Pixel.

In Tab. 5.3 werden ohne Anspruch auf Vollständigkeit aktuell verwendete Sensoren und die weitere Entwicklungen von Sitzbelegungssystemen zusammenfassend dargestellt. Damit soll ein Überblick zum Stand der Technik von Insassen-Erkennungssystemen aufgezeigt werden.

## 5.2.4 PreCrash-Sensorik

Die steigenden Anforderungen an moderne Insassenschutz-Systeme erfordern eine neue Generation von Sensoren. So werden herkömmliche Schutzsysteme erst aktiviert, wenn die Kollision bereits stattgefunden hat. Dem gegenüber sollen künftige Sicherheitsmaßnahmen so ausgelegt werden, dass sie schon vor dem Anprall aktiviert sind, um zeitliche Verzögerungen zu vermeiden oder um Sicherheitseinrichtungen, so genannte reversible Systeme, prophylaktisch wirksam werden zu lassen. Dazu sind Sensoren erforderlich, die eine drohende oder gar eine unvermeidliche Kollision bereits im Voraus, d. h. vor dem eigentlichen Anprall, dem Beginn der InCrash-Phase, erkennen und bewerten können. Es handelt sich also um PreCrash-Sensoren, mit deren Hilfe erforderlich erscheinende Schutzsysteme frühzeitig aktiviert werden. Diese Sensoren müssen in der Lage sein, Kollisionskontrahenten in der unmittelbaren Umgebung des Fahrzeugs zeitlich und räumlich erkennen zu können.

**Tab. 5.3** Übersicht zu Insassen-Erkennungssystemen

Hersteller	Typ	Prinzip	Installation
<b>Autoliv</b>	OWS	DMS	Sitzstruktur
<b>Bizerba</b>	*)	Tauchspule	Sitzstruktur
<b>Bosch</b>	OCS <sup>1)</sup>	Druck	Sitzfläche
	iBolt	Hall	Sitzstruktur
	iVision	Stereo-Kamera	Dachkonsole
<b>Delphi</b>	PODS	Druck	Sitzfläche
	*)	Stereo-Kamera	Dachkonsole
<b>IEE</b>	CPOD	Transponder	Sitzfläche
	OC	Druck	Sitzfläche
	BodySense	Druck/Kapazität	Sitzfläche/Fußraum
		3D-Kamera	Dachkonsole
<b>Magna</b>		2D-Kamera	Dachkonsole
<b>MSI/TI</b>	OWS	Piezoresistenz	Sitzstruktur
<b>SiemensVDO</b>	OCS <sup>1)</sup>	Druck	Sitzfläche
	AWS	DMS	Sitzstruktur
	*)	Stereo-Kamera	Dachkonsole
<b>Temic</b>	PMD	3D-Kamera	Dachkonsole
<b>TRW</b>		Hall/DMS	Sitzstruktur
		Stereo-Kamera	Dachkonsole

Anmerkungen:

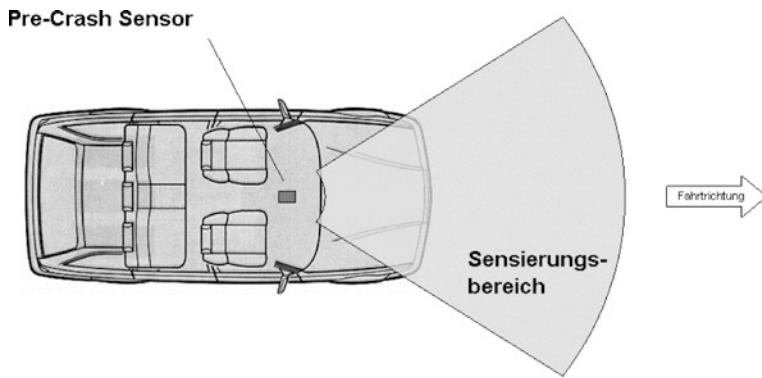
1) siehe auch IEE

\*) Kundenspezifische Entwicklung, keine Daten verfügbar

Die erste Generation derartiger Sensoren wirken im Nahbereich als optische PreCrash-Sensoren. Sie ermöglichen, den Abstand, die Geschwindigkeit und die Richtung eines Kollisionskontrahenten in Fahrtrichtung des Kollisionsobjekts zu erkennen. Damit lässt sich bereits frühzeitig eine drohende Kollision detektieren, welche Art von Unfall zu erwarten ist und welche Stufen der Insassenschutz-Systeme aktiviert werden müssen. Aktuelle Forschungsarbeiten befassen sich damit, die Unfallschwere des zu erwartenden Aufpralls zu bestimmen und so einen optimalen Insassenschutz zu gewährleisten. Die vom PreCrash-Sensor bereitgestellten Informationen werden dazu genutzt, Insassenschutz-Einrichtungen wie reversible Gurtstraffer und adaptive Kraftbegrenzer anzusteuern.

PreCrash-Sensoren werden vorzugsweise im oberen Bereich der Windschutzscheibe in der Nähe des Rückspiegels montiert. Dadurch wird eine lückenlose Abdeckung des

Überwachungsbereichs vor dem Fahrzeug ermöglicht. Das Prinzip derartiger Sensoren basiert auf einer Laufzeitmessung. Gepulstes infrarotes Laserlicht mit einer Wellenlänge von 905 nm wird dabei emittiert und von Objekten, die sich in der Reichweite des Sensors befinden, reflektiert. Der Decoder berechnet die Laufzeit zwischen dem emittierten und dem reflektierten Laserimpuls. Der Sensor hat ein mehrfaches Strahlensystem, so dass die Umgebung in einem definierten Winkelbereich vor dem Fahrzeug bestrichen wird (Abb. 5.27). Mit Hilfe des mehrfachen Strahlensystems wird die Richtung des sich nähernden Objektes bestimmt und die Geschwindigkeit aus wiederholten Entfernungsmessungen berechnet. Diese Sensoren lassen sich zudem mit Sekundärfunktionen wie Regen- und Helligkeitssensoren ausstatten.

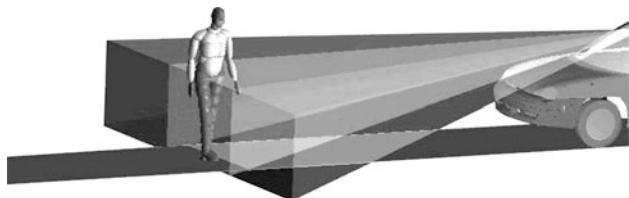


**Abb. 5.27** PreCrash-Sensor und der frontale Sensierungsbereich (aus [7])

Mit den Informationen, die durch einen PreCrash-Sensor bereit gestellt werden, ist es aber nicht nur möglich, beispielsweise reversible Gurtsysteme frühzeitig zu aktivieren, sondern sie gestatten zudem die Substituierung der bei herkömmlichen Systemen verwendeten Up-Front-Sensoren. Der künftige PreCrash-Sensor liefert darüber hinaus eine von der Fahrtrichtung des Kollisionsobjekts unabhängige Annäherungsgeschwindigkeit des Kollisionskontrahenten und gestattet damit eine weitaus präzisere Vorausbestimmung der bei gegebenen Umständen erforderlichen Airbag-Auslösung als dies bei konventionellen Systemen möglich ist.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit für PreCrash-Sensoren ist in der Aktivierung von Fußgängerschutz-Systemen zu sehen, die in Europa seit Mitte 2005 gefordert und eingeführt wurden. Mit einem derartigen Sensor lässt sich der Bewegungsablauf eines Kollisionskontrahenten vor einem drohenden Aufprall analysieren (Abb. 5.28) und erlaubt nach Bewertung der Sensor-Informationen eine Unterscheidung zwischen „harten“ und „weichen“ Objekten. Wird ein „weiches“ Objekt, das den Fußgänger charakterisiert, erkannt und treffen weitere Auswahlkriterien für Parameter wie beispielsweise Objektgeometrie und Annäherungsgeschwindigkeit zu, können über den im Steuergerät integrierten Algorithmus die entsprechenden Fußgängerschutz-Systeme gezielt aktiviert werden.

**Abb. 5.28** PreCrash-Sensor für Fußgängerschutz (aus [1])



### 5.2.5 Assistenz-Systeme

Der größte Risikofaktor beim Fahren ist immer noch der Mensch: In Deutschland waren im Jahr 2011 nach den Unfallzahlen des Statistischen Bundesamtes [8] etwa 87 % aller erfassenen Unfälle mit Personenschäden auf Fehlverhalten des Fahrzeuglenkers zurückzuführen. Im INVENT-Bericht [9] ist die Unfallursache bei rund 85 % aller Unfälle mit Personenschäden auf den Fahrer zurückzuführen. Dem gegenüber wird in [10] festgestellt, dass nur 36 bis 50 % aller Unfälle mit menschlichem Versagen erklärt werden können. Unabhängig vom wirklichen Anteil der Unfallursachen können Fahrerassistenzsysteme Abhilfe leisten, die den Fahrer einerseits in anspruchsvollen, gefährlichen Situationen unterstützen, ihm aber auch andererseits bei monotonem Fahrbetrieb bei abnehmender Aufmerksamkeit entlastende Handlungsfreiräume anbieten.

Fast jeder Autofahrer kennt das ohnmächtige Gefühl, wenn ein Auto beim heftigen Bremsen mit blockierenden Rädern stur geradeaus rutscht und nicht mehr lenkbar ist. Wirkungsvoll ist hier eine Intervallbremsung, die aber nur wenige Fahrer in einer Notsituation beherrschen können. In solchen Situationen greift das **Anti-Blockier-System** (ABS) automatisch helfend ein und verhindert das Blockieren der Räder beim Bremsen: Das Fahrzeug bleibt auch bei starken Bremsungen lenkbar und fahrstabil. Damit ist der Fahrer in der Lage, einem Hindernis auszuweichen, ohne die Bremse wieder lösen zu müssen.

Ermöglicht wird dies durch an den Rädern angebrachte Raddrehzahlsensoren, die Signale an ein Steuergerät senden. Das Steuergerät regelt den Bremsdruck und kann das Blockieren einzelner Räder verhindern. Automatisches Lösen und Anziehen der Bremse wechseln dabei ab und bewirken, dass das Fahrzeug trotz Vollbremsung durch den Fahrer lenkbar bleibt.

Die **Antriebsschlupf-Regelung** (ASR bzw. DSC, DTC, TCS oder TRACS) bzw. Traktionskontrolle basiert auf den ABS-Sensoren, wertet die Drehzahl der einzelnen Räder aus und erkennt so beim Anfahren oder Beschleunigen ein Durchdrehen einzelner oder mehrerer Räder. Die Funktion von Antriebsschlupf-Regelung ist vergleichsweise einfach: Stellt das System beim Beschleunigen übermäßigen Schlupf fest, so reduziert es die Motorleistung. Um in heiklen Situationen ein Abwürgen des Motors zu vermeiden, erlaubt die Regelung einen Mindestschlupf (bis zu 20 %). Inzwischen sind die Funktionen der Antriebsschlupf-Regelung meist in die Fahrdynamik-Regelung (ESC) integriert. Bei Nutzfahrzeugen oder Sportwagen lassen sich aber durchaus noch Hersteller finden, die zusätzlich eine reine ASR-Funktion bieten und dabei ESC-Funktionen deaktivieren.

Neben einer Reduzierung der Motorleistung arbeiten einige Fahrzeughersteller auch mit Bremseingriffen. Dies hat den Vorteil, dass zum Beispiel bei einem durchdrehenden Rad dieses gebremst wird und dem Rad mit Haftung über das Ausgleichsgetriebe mehr Drehmoment zugeleitet wird, sodass das Fahrzeug beschleunigt werden kann. Je nach Auslegung des Systems spricht man auch von elektronischem Bremsdifferenzial, weil ASR mit Bremsfunktion teilweise die Funktion einer Differenzialsperre übernehmen kann. ASR-Systeme, die auch noch den Lenkwinkel berücksichtigen, arbeiten bereits nahe an der Grenze zum ESC.

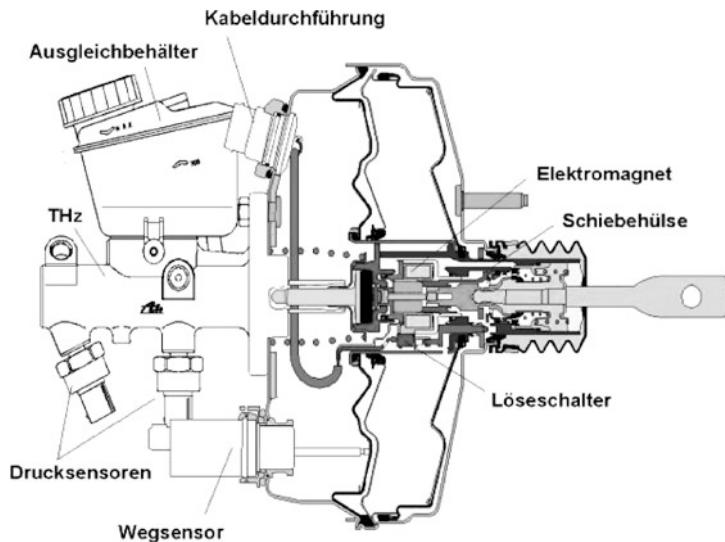
In Umkehrung des ASR bieten einige Hersteller auch eine Motor-Schleppmoment-Regelung (MSR) an. Geht der Fahrer plötzlich vom Gas oder kuppelt zu schnell ein, kann es bei rutschigem Untergrund durch das Schleppmoment des Motors zum Blockieren der Antriebsräder sowie einer Instabilität des Fahrzeugs kommen. MSR verhindert diese Blockierneigung, indem es das Gas nur so weit zurück regelt bzw. beim zu schnellen Einkuppeln so hoch regelt, dass der Effekt nicht auftreten kann.

Beim **Brems-Assistenten** (BAS) unterschiedet man zwei Ausprägungen: Den Brems-Assistent, der eine Notbrems situation alleine aus der Fahrerreaktion ableitet und keine Umfeld-Informationen einbindet und den Brems-Assistent, der zusätzlich Umfeld-Informationen (in der Regel Abstand zum Hindernis) in die Funktion einbezieht.

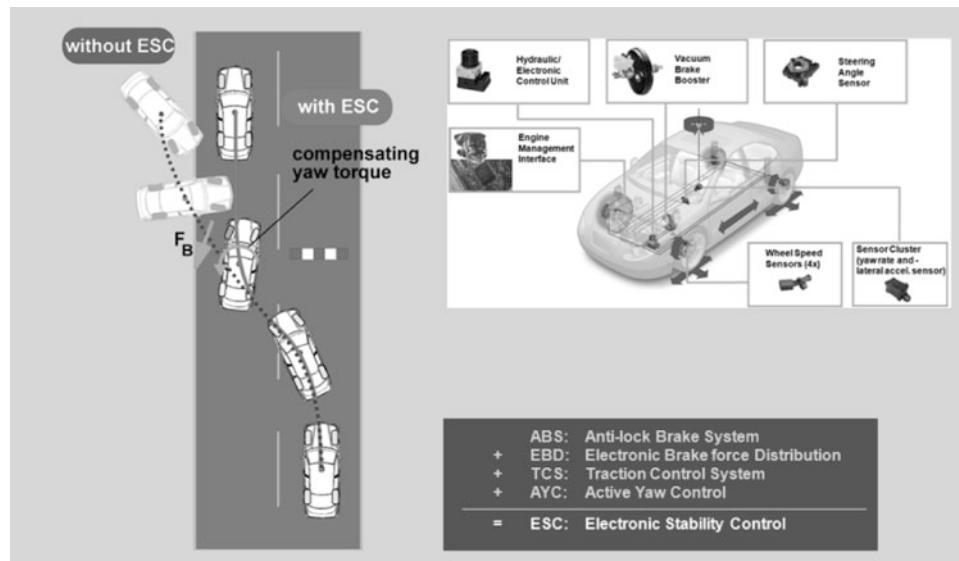
Erstmals von Mercedes-Benz 1996 in der S-Klasse eingeführt, sensiert er die Betätigungs-Geschwindigkeit des Bremspedals (über entsprechende Pedalweg-Sensoren). Der Brems-Assistent (BAS oder iBrake, Active City Stop, Predictive Safety System oder Pre-Safe-Bremse) sorgt unabhängig vom Fahrer für maximalen Bremsdruck. Zahlreiche Untersuchungen zeigen, dass die meisten Autofahrer in einer Gefahrensituation zwar bremsen, das Pedal aber nicht weit genug durchdrücken, um maximalen Druck und damit höchstmögliche Verzögerung aufzubauen, oder zu früh lösen. Der Brems-Assistent erkennt anhand der charakteristischen Pedalbewegungen – Zeit vom Umsetzen des Fußes vom Gas-aufs Bremspedal, Zeit beim Loslassen des Gaspedals sowie Geschwindigkeit, mit der das Bremspedal betätigt wird –, dass eine Notsituation vorliegt und baut unabhängig vom Fahrer Bremsdruck auf.

Seine Wirksamkeit erreicht der Brems-Assistent (Abb. 5.29) durch einen Bremskraftverstärker mit teil-evakuierter Kammer, die beim Notbremsvorgang mit atmosphärischem Luftdruck beaufschlagt wird. So vergrößert sich wenn nötig die Bremskraftverstärkung. Eine Vergrößerung des Bremsdruckes erfolgt bei manchen Systemen auch über eine Hydraulikeinheit. Ausgelöst wird der Brems-Assistent über eine elektronische Steuerung. Um das ungewollte Blockieren der Räder zu vermeiden, ist der Brems-Assistent mit ABS und/oder ESC gekoppelt. Im Gegensatz zum Notbrems-Assistent arbeitet er aber nur nach Betätigung des Bremspedals durch den Fahrer und kann selbsttätig keine Verzögerung auslösen.

Die **Fahrdynamik-Regelung** (ESC: Electronic Stability Control, auch ESP<sup>®</sup>: Elektronisches Stabilitätsprogramm genannt sowie DSC, VSC, PSM, u. a.) ist eine Kombination aus dem Anti-Blocker-System ABS, der Antriebsschlupf-Regelung ASR, der Elektronischen Bremskraftverteilung EBV und der Giermoment-Regelung GMR (Abb. 5.30). Durch gezielte Bremseingriffe in einzelne Räder und in die Motorsteuerung (bei ausgebautem



**Abb. 5.29** Brems-Assistent



**Abb. 5.30** Komponenten und Funktion der Fahrdynamik-Regelung (ESC)

System auch in die Lenkung) kann ein Schleudern des Fahrzeugs im Rahmen physikalischer Grenzen verhindert werden. Die elektronische Fahrstabilitäts-Regelung ESC kombiniert die Funktionen der Radschlupf-Regelungen (ABS, EBD, ASR) mit der Giermoment-Regelung (GMR).

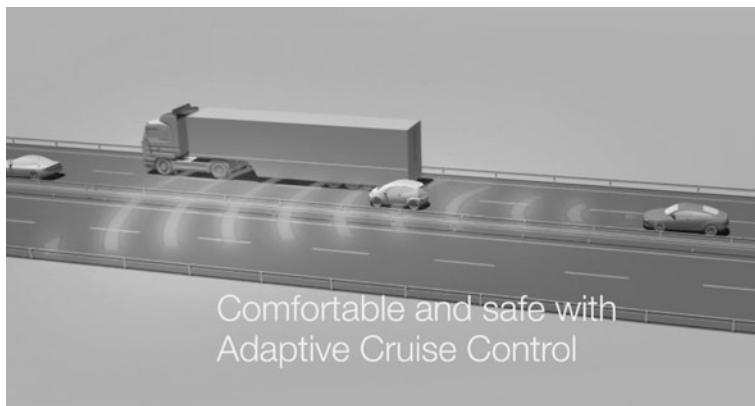
Mit Hilfe einer Modellbildung errechnet ESC aus den Radgeschwindigkeiten, dem Lenkradwinkel und dem ggf. vom Fahrer eingesteuerten Hauptzylinderdruck das vom Fahrer beabsichtigte Fahrzeugverhalten. Das tatsächliche Fahrverhalten erfasst ESC mit Hilfe der Gierrate und der Querbeschleunigung. Vor allem bei sehr schnellen Lenkbewegungen kann ein Fahrzeug den Lenkradeinschlag nicht mehr in die erwartete Richtungsänderung umsetzen. Es kommt entweder zum Untersteuern oder zum Übersteuern, im Extremfall bis zum „Schleudern“. Die Giermoment-Regelung erkennt die Abweichung zwischen realem und angestrebtem Fahrverhalten und greift unterstützend und stabilisierend ein.

Untersteuern korrigiert Giermoment-Regelung primär durch die Abbremsen des kurveninneren Hinterrades, Übersteuern durch das Abbremsen des kurvenäußeren Vorderrades. Dieses selektive Bremsen baut einseitig wirkende Längskräfte und dadurch das gewünschte Giermoment auf. Eine unterstützende Wirkung entsteht durch die gezielte Reduzierung von Seitenführungskräften infolge der über Bremsmomente aufgebauten Längskräfte. Zu hohes Antriebsmoment reduziert ESC – wenn erforderlich – durch Eingriff ins Motormanagement. Die erweiterte ABS/ASR-Hydraulik mit dem integrierten elektronischen Regler ist Kernstück des ESC. Diese Hydraulik ermöglicht den selektiven Aufbau von Bremsdruck an jedem Rad unabhängig von einer Betätigung des Bremspedals. Die Fähigkeit der ESC-Hydraulik, unabhängig von der Pedalbetätigung Druck in den Radbremszylindern aufzubauen, wird für eine weitere Zusatzfunktion genutzt, den so genannten „hydraulischen Brems-Assistent“ (HBA); der HBA nutzt die vorhandene ESC-Sensorik.

Drucksensor-Signale dienen dem Bremsen-Regler zur Erkennung einer in Notsituatationen extrem schnellen Betätigung des Bremspedals. Wird ein parametrierbarer kritischer Druckgradient überschritten, werden die ASR-Trennventile geschlossen, die elektrischen Saugventile geöffnet und die Pumpe aktiviert. Diese steigert den über das Pedal eingebrachten Druck nun auf Blockierdruck-Niveau. Bei dieser Druckregelung folgt der Druck in den Radbremszylindern dem des Tandem-Hauptzylinders, was eine Modulation der Radbremsdrücke innerhalb des HBA-Modus ermöglicht. Bei Unterschreiten eines Mindestdrucks (Lösen des Bremspedals) schaltet sich die HBA-Funktion wieder ab. Der hydraulische Brems-Assistent ist ein Beispiel für Systeme, bei denen die hydraulische Regeleinheit (HCU: Hydraulic Control Unit) die Funktion des Vakuum-Bremeskraftverstärkers unterstützt.

Der **Abstandsregel-Tempomat** ACC (Adaptive Cruise Control) ist eine Erweiterung des bekannten Tempomat; sein Einsatzbereich ist primär die Autobahn. Ein Abstandssensor im Bug des Fahrzeugs überwacht das Umfeld vor dem Fahrzeug (Abb. 5.31). Bedingt durch das zu verarbeitende Geschwindigkeitsprofil sind Abstände bis 200 m und Abstandsänderungen bis 200 km/h zu messen, eine Anforderung, die den Einsatz der Radartechologie erfordert. Droht das Fahrzeug bei der eingestellten Geschwindigkeit auf ein vorausfahrendes Fahrzeug aufzufahren, nimmt der Abstandsregel-Tempomat durch Eingriff in die Motorsteuerung das Gas zurück und bremst ggf. selbstständig ab. Er ermittelt den

Abstand zum Vordermann und hält diesen konstant. Die Länge des Abstandes kann der Fahrer bei den meisten Systemen in fünf Schritten einstellen. Trifft er keine Wahl, regelt das System den Abstand geschwindigkeitsabhängig auf Basis des gesetzlich vorgeschriebenen Abstandes.



**Abb. 5.31** Abstandsregel-Tempomat

Die ACC-Systeme der ersten Generation basierten auf einem noch einfachen Algorithmus, mit dessen Hilfe nur bewegte Objekte erfasst und verarbeitet werden konnten. Das für die Abstandsregelung relevante Objekt (Ziel oder Target genannt) wurde ermittelt, und zwar i. d. R. das nächste Objekt in der Fahrspur. Neuere ACC-Generationen regeln bis zum Stillstand und auf Aufforderung durch den Fahrer auch nach Wiederanfahren des Vordermanns.

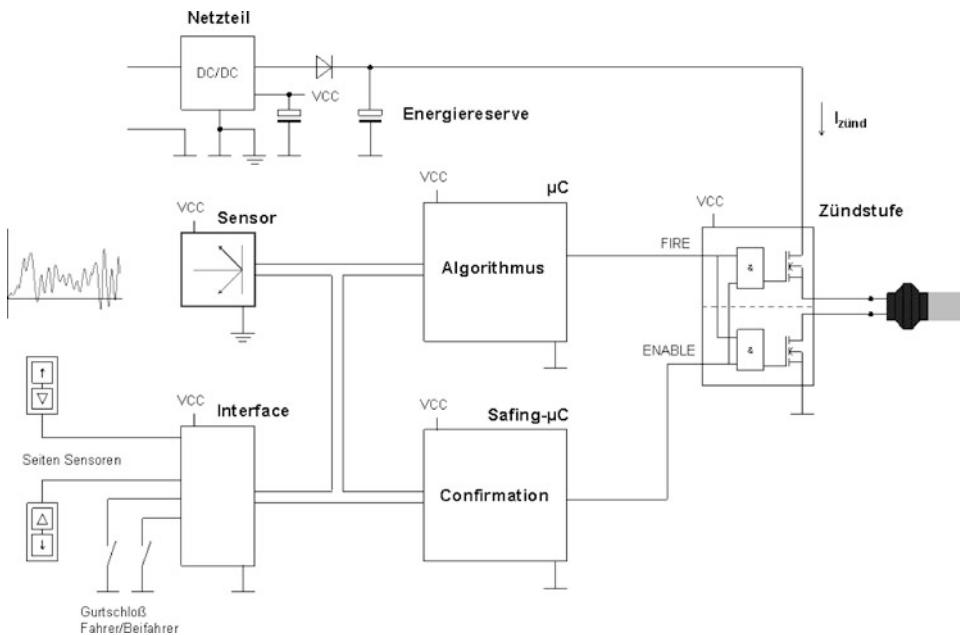
---

## 5.3 Randbedingungen

Die für eine funktionierende und wirksame Sensorik erforderlichen Randbedingungen umfassen die Elektronik, hier dargestellt für die Airbag-Auslösung, die Spannungsversorgung mit Energiereserve, die Sicherheitsanforderungen sowie die Datenübertragung. Diese essentiellen Bedingungen werden nachfolgend im Einzelnen dargestellt und erläutert.

### 5.3.1 Airbag-Elektronik

Die Airbag-Elektronik umfasst die Spannungsversorgung, die Sensierung, Signal-Auswertung und Informationsspeicherung sowie die Aktivierung der für den Schutz von Insassen und Fußgängern erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen (Abb. 5.32).



**Abb. 5.32** Schaltbild einer Airbag-Elektronik (aus [1])

Im Einzelnen lassen sich die Aufgaben der Airbag-Elektronik in folgender Weise zusammenfassen:

- Permanente Überwachung des gesamten Airbag-Systems und
- Fehleranzeige über Warnlampe,
- volle Funktionsfähigkeit während der Diagnose,
- autarke Energieversorgung für einen definierten Zeitraum,
- Datenaustausch mit Insassen-Erkennungssystemen,
- Aktivierung oder Deaktivierung der Beifahrer-Schutzsysteme in Abhängigkeit vom Status des Insassen-Erkennungssystems,
- Erkennung und Einordnung der vorliegenden Eingangsinformationen,
- Aufprall- und Roll-over-Erkennung,
- Aktivierung der Schutzeinrichtungen,
- Nichtflüchtige Speicherung von Betriebs-, Status-, Fehler- und Kollisionsinformationen,
- Mitteilung eines Aufprall- oder Roll-over-Ereignisses und des Zustandes anderer Steuergeräte über Bus- oder diskrete Verbindungen und schließlich
- Entsorgungszündung zur Altauto-Verwertung.

Bei der Sensierung unterscheidet man eine interne und eine externe Sensorik. Die Auswertung der Sensor-Signale erfolgt mit Hilfe eines auf das jeweilige Fahrzeug abgestimm-

ten Algorithmus. Sind mehrere externe Sensoren eingesetzt, werden sie durch zusätzliche Schaltkreise verbunden und angeschlossen. Dadurch wird die Möglichkeit geschaffen, zusätzliche Beschleunigungs- oder Druck-Sensoren zu verwenden. Für die Zündung der Sicherheitssysteme ist eine entsprechende Anzahl von Zünd-Schaltkreisen erforderlich; dies sind in der Regel zwei, vier oder auch sechs getrennte Zündkreise, die zusammen geschalten werden können. Bei der in Abb. 5.33 abgebildeten Airbag-Elektronik handelt es sich um eine Variante mit einem zweikanaligen Beschleunigungsaufnehmer, sowie einen Trigger-Sensor. Die drei erkennbaren Kondensatoren dienen der Energiereserve des Airbag-Systems.



**Abb. 5.33** Airbag-Elektronik (aus [1])

### 5.3.2 Spannungsversorgung und Energiereserve

Das Netzteil (vgl. Abb. 5.32) dient der Bereitstellung der erforderlichen Spannung, sie wird aus dem Fahrzeug-Bordnetz gespeist. Es ist als Schalt- oder auch als Linearregler ausgeführt und schützt die Airbag-Elektronik vor Verpolung, Überspannung, elektrostatischer Aufladung (ESD: Electrostatic discharge) und elektromagnetischen Einflüssen (EMV: Elektromagnetische Verträglichkeit). Für die Versorgung der Elektronik, der Sensoren, der Halbleiter und anderer Bauteile wird eine Spannung von 3,3 bis 5,0 V bereitgestellt; die Lastspannung für die Energiereserve beträgt üblicherweise 20 bis 40 V. Diese Energiereserve wird zur Aktivierung der Schutzsysteme verwendet und ist üblicherweise so ausgelegt, dass das Airbag-System noch etwa 150 ms nach einem Spannungsabriß, der durch einen Kurz-

schluss oder durch den Verlust der Fahrzeubatterie während des Unfalls entstehen kann, mit der erforderlichen Spannung versorgt werden kann.

### 5.3.3 Sensoren sowie Steuerungs- und Überwachungseinheiten

In die Airbag-Elektronik sind ein oder mehrere Sensoren, je nach Art der Schutzsysteme, integriert. Die **externen Sensoren** werden an die Airbag-Elektronik über Schnittstellen, so genannte Interfaces, angeschlossen, um die Signale einlesen zu können. Daneben haben die **internen Sensoren** die Aufgabe, den Status von Gurtschlössern sowie die Sitzbelegungs- und Sitzpositionserkennung zu überprüfen. Sie dienen zudem der Informationsbeschaffung und -bereitstellung von Insassen-Erkennungssystemen und wirksamen Gurtkräften.

Eine weitere Schlüsselkomponente stellt der **Mikrokontroller** ( $\mu$ C), auch als Master- $\mu$ C bezeichnet, dar. Er steuert den gesamten Ablauf innerhalb der Elektronik und überprüft als Software realisierte Funktionen wie Betriebssystem, Kommunikation, Diagnose, Datenaufnahme, Crash-Algorithmus, Plausibilisierung und schließlich die Ansteuerung der Zündstufen. Durch die Einbeziehung zusätzlicher Anforderungen zur Insassenerkennung und -klassifizierung oder zum Fußgängerschutz steigt ständig der Bedarf an Speicher (RAM: Random access memory; ROM: Read only memory) und höherer Taktfrequenz. Zudem sind weitere künftige Aufgaben zu bewältigen, wie die Realisierung der Ereignisdaten-Speicherung (EDR: Event Data Recorder) oder die Entsorgungszündung als neue Recycling-Anforderung zur Entsorgung der Airbags bei der Stilllegung des Fahrzeugs.

Die hardwaremäßig, unabhängig ausgeführte Überwachungsschaltung wird mit Hilfe eines speziellen kleinen Mikrocontrollers, dem so genannten **Safing- $\mu$ C**, realisiert. Mit ihm wird der korrekte Systemtakt der im Mikrokontroller sequentiell laufenden Software überwacht, die Sensor-Signale überprüft und elektronisch das Start- oder Enable-Signal für die Zündkreise generiert.

### 5.3.4 Zündungseinrichtung

Die **Zündstufen** sind in der Regel in integrierten Schaltkreisen (ASIC: Application Specific Integrated Circuit) enthaltene Leistungsschalter und umfassen darüber hinaus Diagnose- und Kommunikationsschaltungen. Die Leistungsschalter dienen dem Ansteuern der Anzünder, die sich in den Generatoren der Schutzsysteme befinden. Mit Hilfe der Diagnoseschaltung werden die Zündstufen auf eventuelle Fehler überwacht und der Zündstrom gemessen. Die Prüfungen der Diagnose umfassen sowohl interne als auch externe Prüfumfänge. Intern werden die Leistungsschalter auf ihre korrekte Funktion hin überprüft, und extern werden die korrekten Widerstandswerte der Anzünder einschließlich der Leitungen überwacht. Neben evtl. offenen Leitungen und Kurzschlüssen werden durch Überprüfung auch Schlässe der Zündleitungen zur Fahrzeugmasse oder zur Versorgungsspannung detektiert. Zusätzlich lassen sich elektrische Fehler in den Anzündern oder Gasgeneratoren

feststellen. Bei der Auslegung der Zündstufen wird aus Sicherheitsgründen eine physikalische Trennung der High-Side- und Low-Side-Schalter vorgenommen. Realisiert wird dies durch getrennte integrierte Schaltkreise, so genannte ASICs, für High Side und Low Side oder aber durch den Einsatz eines dritten Schalters, mit dem die Versorgung der Zündspannung der Schaltkreise extern freigeschaltet wird. Zunehmend wird dabei ein Single-Chip-Design angewandt, bei denen die High-Side- und Low-Side-Schalter durch einen ausreichend breiten Siliziumgraben auf dem Chip getrennt sind.

Um eine sichere Entsorgung der Airbags bei Stilllegung eines Fahrzeugs zu gewährleisten, wird an der Entwicklung einer hersteller-übergreifenden technischen Spezifikation für eine **Entsorgungszündung** gearbeitet. Der Entwurf der Spezifikation wird derzeit den zuständigen Normierungsgremien zur Abstimmung vorgelegt und sieht eine Entsorgung der Airbags mit einem speziellen Entsorgungsgerät vor. Dieses Gerät wird mit Hilfe einer fahrzeugseitig installierten Diagnoseeinheit (OBD: Onboard Diagnostic Connector) mit der Airbag-Elektronik verbunden und aktiviert über eine Kommunikationsschnittstelle den Entsorgungsmodus. Die ordnungsgemäße Zündung der Airbags, der Gurtstraffer und der sonstigen pyrotechnisch aktivierte Komponenten von Schutzsystemen wird am Ende der Entsorgung automatisch protokolliert und dokumentiert.

### 5.3.5 Speicherung von Ereignisdaten

Die Einführung einer obligatorischen Speicherung von Ereignisdaten (EDR: Event Data Recorder) in Kraftfahrzeugen wird zurzeit in den USA diskutiert. Die Ereignisaufzeichnung dient der Speicherung aller relevanten Informationen, die im Fahrzeug verfügbar sind; sie wird im Falle eines Unfalls aktiviert. Über die Fahrzeug-CAN-Verbindung (CAN: Controller Area Network) sollen Informationen über Fahrzustand, Fahreraktivitäten und Unfalldaten in einem Speicher abgelegt werden. Aufgrund der in der Airbag-Elektronik vorhandenen Energiereserve wird hier auch die Datenspeicherung als praktikable Lösung angesehen. Derartige Systeme existieren in Deutschland und werden bereits als Unfalldaten-Speicher (UDS) zumeist in Flottenfahrzeugen der Polizei, von Rettungskräften oder in Leihwagen eingesetzt.

### 5.3.6 Sicherheitsanforderungen an die Airbag-Elektronik

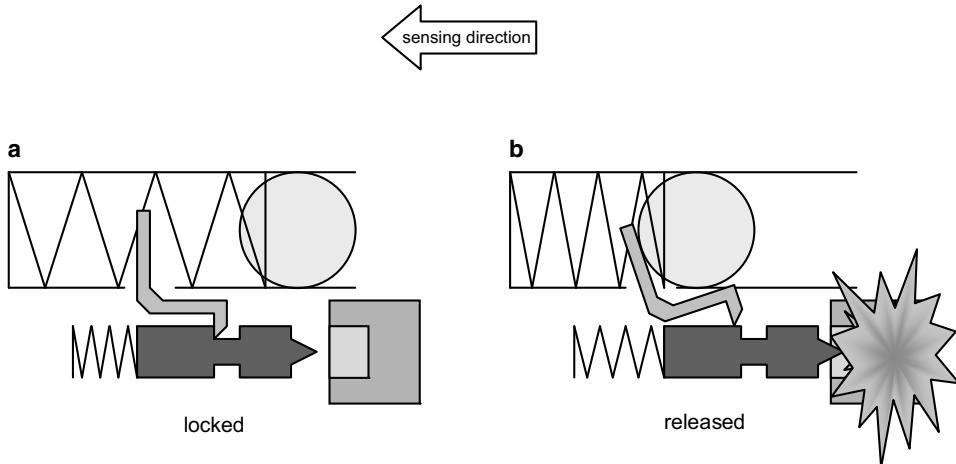
An eine moderne Airbag-Elektronik müssen heute Sicherheitsanforderungen gestellt werden, die bei der Entwicklung zu berücksichtigen sind. Im Einzelnen sind dies Anforderungen hinsichtlich

- der Systemzuverlässigkeit,
- der Systemverfügbarkeit, auch bei Spannungsabriss,
- einer zuverlässigen Zündentscheidung basierend auf zwei unabhängigen Signalquellen,

- einer  $360^\circ$ -Sensierung und der Plausibilisierung, und schließlich
- dürfen Einzelfehler zu keiner unbeabsichtigten Auslösung führen, aber auch eine beabsichtigte Auslösung nicht verhindern.

Im Laufe der letzten Jahre wurde die Airbag-Elektronik in erheblichem Umfang weiterentwickelt und verbessert, denn die hier genannten Sicherheitsanforderungen konnten mit den ersten Airbag-Systemen nicht oder nur unzureichend realisiert werden. Mit dem Einsatz der modernen Elektronik aber ist es gelungen, die genannten Anforderungen immer besser zu erfüllen.

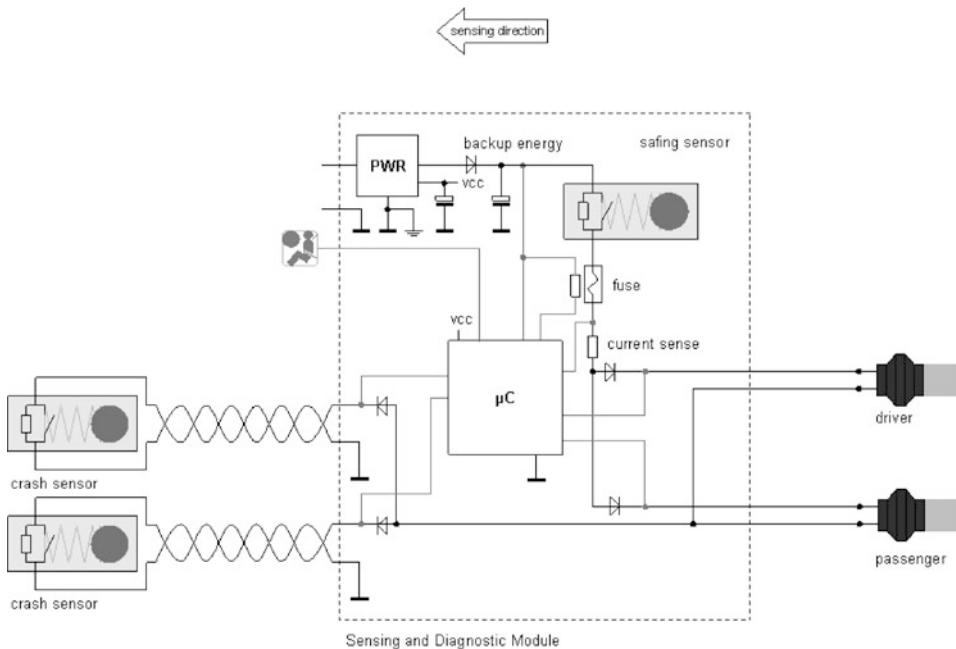
Bei den ersten, rein **mechanischen Systemen** gab es naturgemäß weder eine unabhängige Sensierung noch eine Überprüfung der Plausibilität. Eine exakte Bewertung des Unfallsignals sowie eine genaue Berechnung der Auslösezeit waren nicht möglich. Eine Schwachstelle der mechanischen Systeme, ein Beispiel zeigt Abb. 5.34, ist nämlich darin zu sehen, dass das System nur über einen einzigen Auslösepfad verfügt; zudem kann der Systemzustand nicht überprüft und aufgezeigt werden.



**Abb. 5.34** Mechanisches System: links verriegelt und rechts ausgelöst

Mit dem Einsatz **elektromechanischer Systeme** wurde die Sicherheit gegen Fehlauslösungen erheblich erhöht, und der Systemzustand konnte überwacht werden. Soll eine beabsichtigte Auslösung erfolgen, muss neben dem im Steuergerät installierten Sicherheitssensor mindestens einer der im Frontbereich installierten Crash-Sensoren geschlossen sein (Abb. 5.35). Dieser Sicherheitssensor, auch Safing-Sensor genannt, verhindert darüber hinaus, dass es bei Leitungsfehlern zu einer unbeabsichtigten Auslösung kommt. Beim Verlust der Versorgungsspannung während eines Unfalls wird das System zudem durch eine eigene Energiereserve auslösefähig gehalten. Zur Reduzierung der Empfindlichkeit hinsichtlich elektromagnetischer Einstrahlungen werden bei den Verbindungen verdrillte Leitungen eingesetzt. Durch die in den Sensoren installierten Widerstände kann das

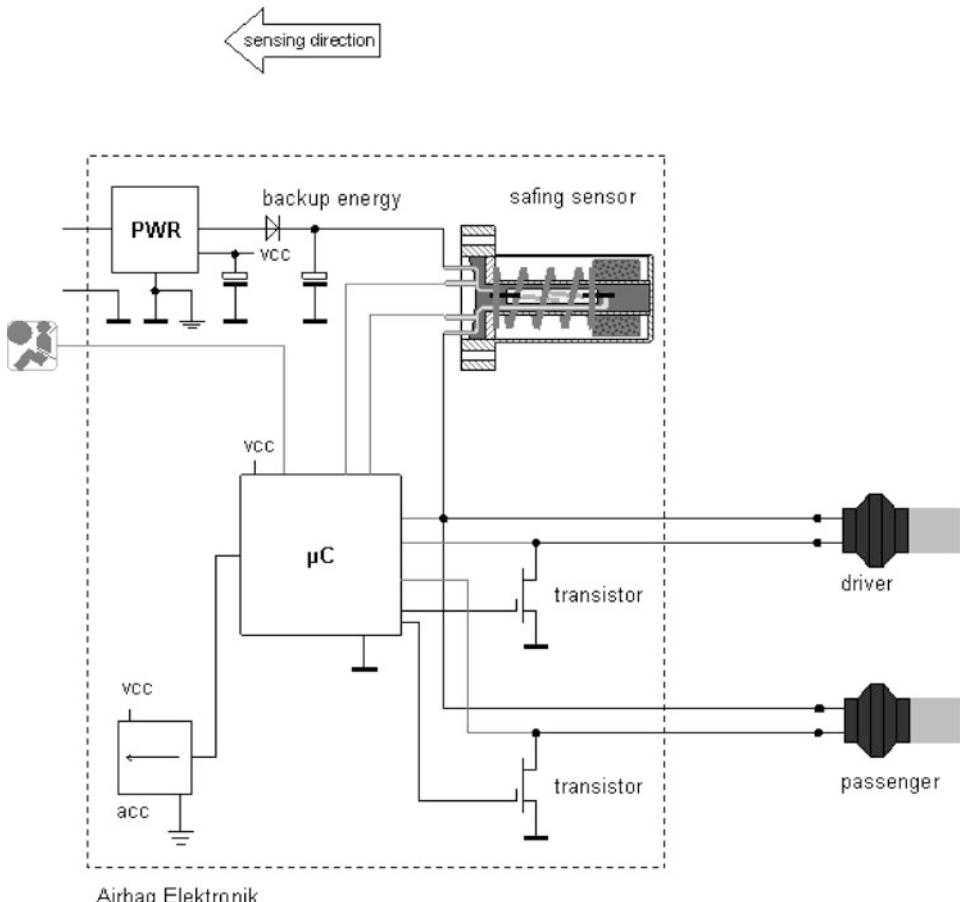
System gezielt überwacht werden; selbst durch die Anzünder wird ein schwacher Diagnosestrom zur Überprüfung der Zündkreise geleitet. Tritt dennoch ein Fehler auf, wird eine Warnlampe aktiviert, und sollte diese Warnlampe ausfallen, ertönt ein im SD-Modul (SDM: Sensing and Diagnostic Module) des Steuergeräts integrierter Summer. Das System verfügt zusätzlich über eine Schmelzsicherung, die bei einem schwerwiegenden Systemfehler deaktiviert wird. Damit kann das System permanent abgeschaltet werden, um eine unbeabsichtigte Auslösung sicher zu verhindern. Im Zündkreis des SD-Moduls ist zudem ein niederohmiger Widerstand integriert, der kontinuierlich den Spannungsabfall des Mikrocontrollers überwacht. Fließt ein Zündstrom, so steigt der Spannungsabfall, und der Systemzustand wird in einem permanenten Speicher zur möglichen Überprüfung festgehalten.



**Abb. 5.35** Schaltbild eines elektromechanischen Systems mit Safing-Sensor

In der ersten Generation der **elektronischen Systeme** ist ein **Safing-Sensor** in Reihe in den Zündkreis integriert (Abb. 5.36). Die Ansprechschwelle des Safing-Sensor ist relativ niedrig und erfüllt in neueren Systemen zwei Grundanforderungen: Zum einen wird er als unabhängiger Eingang für die Bestätigung der Auslöseentscheidung verwendet, und zum anderen verhindert er eine unbeabsichtigte Auslösung im Fehlerfall. Mit derartigen elektronischen Systemen ist es erstmals möglich, eine umfassende Diagnose des Systemzustandes zu erreichen. Alle Leitungen sowie Beschleunigungsaufnehmer und Anzünder werden im Hinblick auf ihre definierten Widerstandswerte überprüft. Weiterhin wird die Energiereserve hinsichtlich Kapazität und Ladung überwacht. Die gesamte Diagnose erfolgt durch

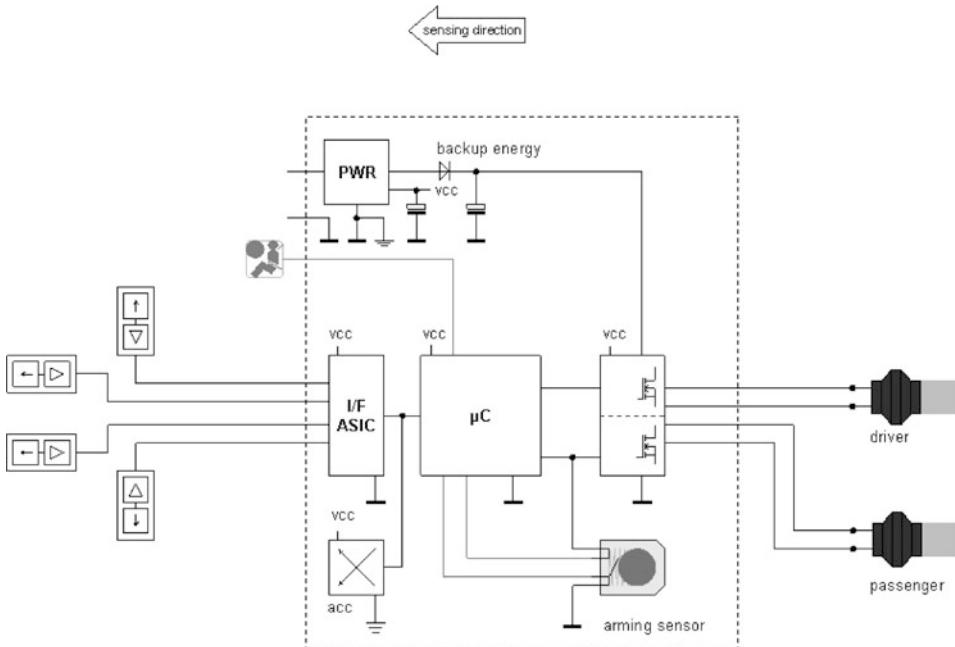
den Diagnosezyklus der Airbag-Elektronik und wird im Millisekunden-Raster durchlaufen. Die einzige Komponente, die im Diagnosezyklus nicht überprüft werden kann, ist der Safing-Sensor. Diesen Nachteil hat man versucht, durch die Auslenkung des Magneten mit Hilfe eines elektromagnetischen Felds und damit das Schließen eines Reed-Kontakts zu kompensieren. Aufgrund der hohen Stromaufnahme, des erforderlichen Bauraumbedarfs und des Gewichts hat sich diese Anordnung aber bisher in der Serie nicht durchgesetzt. Auch hierbei wird bei einem Systemfehler eine Warnlampe von der Airbag-Elektronik angesteuert.



**Abb. 5.36** Schaltbild eines elektronischen Systems mit Safing-Sensor

Bei der Einbindung des Safing-Sensors im Zündkreis ist zum einen die Anzahl der anzusteuernden Rückhaltesysteme durch den Strom, der über den Reed-Kontakt fließen kann, limitiert. Andererseits ist die Schließzeit begrenzt, was sich negativ bei der Ansteuerung mehrstufiger Airbag-Systeme auswirken kann. Aus diesem Grund wurde der Safing-Sensor

durch einen **Trigger-Sensor** ersetzt (Abb. 5.37). Im Gegensatz zum Safing-Sensor ist er nicht im Zündkreis integriert. Zudem ist er erheblich kleiner und stellt ein Schaltsignal zur Verfügung, das elektronisch verlängert werden kann. Damit steht das Signal zur Plausibilisierung über die gesamte Unfall-Zeitspanne zur Verfügung.

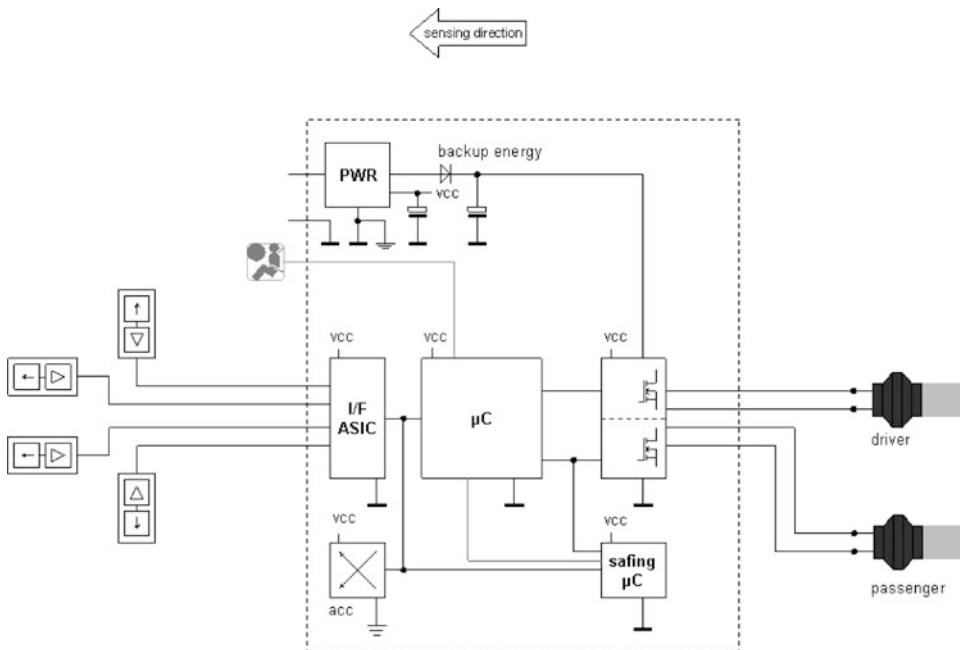


**Abb. 5.37** Schaltbild eines elektronischen Systems mit Trigger-Sensor

Einrichtungen der Airbag-Elektronik, in denen Rollraten-Sensoren verwendet werden, erfordern zur Plausibilisierung zusätzlich Sensoren, die relativ geringe Beschleunigungen in  $z$ -Richtung aufnehmen; es handelt sich dabei um so genannte low  $g$   $z$ -Sensoren. Durch diese Sensorik lässt sich ein Überschlag zuverlässig von extremen Fahrmanövern unterscheiden. Der Einsatz derartiger Sensoren gestattet eine frühzeitige, sichere und zuverlässige Auslösung der erforderlichen Schutzsysteme.

Mit der ständigen Verbesserung der passiven Sicherheit in Kraftfahrzeugen nimmt auch die Anzahl unterschiedlicher Insassenschutz-Systeme zu. Die permanente Weiterentwicklung zu einem umfassenden Schutz der Fahrzeuginsassen erfordert eine 360°-Bestätigung des Crash-Signals. Da die bisher eingesetzten Safing- und Triggersensoren nur eine Wirkrichtung besitzen, sind sie dafür ungeeignet. Abhilfe schafft hier nur die Verwendung eines richtungsunabhängigen Safing-Mikrocontrollers, des so genannten **Safing-μC** (Abb. 5.38). Er ist zudem in der Lage, die Signale der Beschleunigungs-Sensoren zu verarbeiten und den Systemtakt sowie den sequentiellen Programmdurchlauf des Master-Controllers zu überwachen. Eventuell auftretende Unregelmäßigkeiten lassen sich dadurch

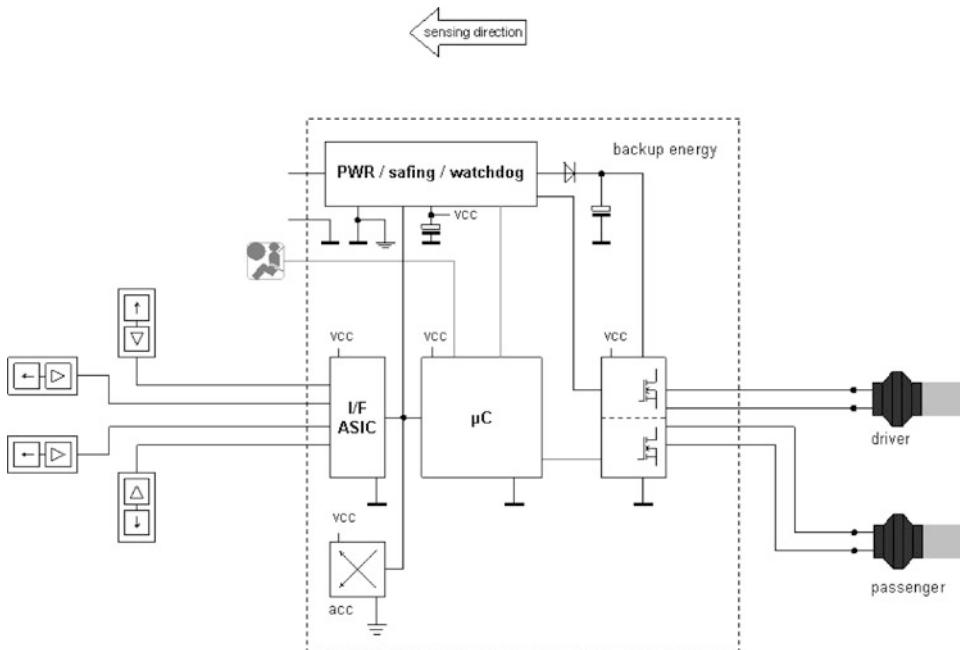
zuverlässig erkennen. Da in der Airbag-Elektronik keine elektromechanischen Komponenten mehr verbaut sind, besteht die Möglichkeit, das System vollständig und umfassend elektronisch zu diagnostizieren.



**Abb. 5.38** Schaltbild eines elektronischen Systems mit Safing- $\mu$ C

Um den steigenden Anforderungen nach Zuverlässigkeit, Modularität, Platzbedarf und Kosten bei modernen Systemen der Airbag-Elektronik nachzukommen, werden neue Partitionierungen oder Teilmodule der verwendeten Komponenten eingeführt. Bei dem folgenden Airbag-Elektronik-System ist das Netzteil, die Safing-Funktion, die Überwachungseinheit (Watchdog), die Ladungspumpe für die Energiereserve sowie eine Anzahl von Schnittstellen für externe Sensoren in einem gemeinsamen Schaltkreis, dem **Safing-IC**, integriert (Abb. 5.39). Müssen weitere externe Sensoren angeschlossen werden, kann das System um weitere Interface-Schaltkreise (ASICs) erweitert werden. Die Zündkreise werden nun durch das Safing-IC und den Algorithmus im Master-Controller freigeschaltet. Sollten weitere erforderlich sein, so lässt sich das System auf diese Weise beinahe beliebig ausbauen.

Von den Fahrzeugherstellern wird heute eine so genannte SIL-Einstufung (SIL: Sicherheitsintegritätslevel) für die Airbag Elektronik nach [11] gefordert. Dieser **Integritätslevel für die Zuverlässigkeit** gibt in verschiedenen Stufen die Wertebereiche der Ausfallwahrscheinlichkeiten einer Sicherheitsfunktion an; SIL 1 stellt dabei die niedrigste Stufe und SIL 4 die höchste Stufe dar. In [11] sind zwei Betriebsarten für Sicherheitsfunktionen beschreiben: eine mit einer niedrigen Anforderungsrate (low demand mode) und eine mit



**Abb. 5.39** Schaltbild eines elektronischen Systems mit Safing-IC

einer hohen oder kontinuierlichen Anforderungsrate (high demand or continuous mode). Die formalen Definitionen und Begriffsbestimmungen sind in [11] angegeben.

Eine Sicherheitsfunktion, die im Anforderungsmodus arbeitet, wird nur auf Anforderung ausgeführt und bringt das zu überwachende System (EUC: Equipment under Control) in einen definierten, abgesicherten Zustand. Das sicherheitsbezogene System, das genau diese Sicherheitsfunktion ausführt, hat, solange keine Anforderung an die Sicherheitsfunktion gestellt wird, keinen Einfluss auf das Überwachungssystem. Dieses gilt beispielsweise für Airbag-Systeme. Eine niedrige Anforderungsrate liegt dann vor, wenn die Anforderung an das sicherheitsbezogene System nicht mehr als einmal pro Jahr gestellt wird und die Häufigkeit kleiner als die doppelte Frequenz der Wiederholungsprüfung ist. Dem gegenüber liegt eine hohe oder kontinuierliche Anforderungsrate vor, wenn die Anforderung an das sicherheitsbezogene System häufiger als einmal im Jahr auftritt oder eben größer als die doppelte Frequenz der Wiederholungsprüfung ist. Eine im kontinuierlichen Modus arbeitende Sicherheitsfunktion hält das zu überwachende System immer in einem normalen, abgesicherten Zustand. Das sicherheitsbezogene System überwacht also das Überwachungssystem EUC kontinuierlich. Ein Ausfall dieses Systems führt somit unmittelbar zu einer Gefährdung, sofern keine anderen sicherheitsbezogenen Systeme oder aber keine externen Maßnahmen zur Gefahrabwendung wirksam werden. In Tab. 5.4 sind die Sicherheitsintegritätslevel für die Betriebsarten mit niedriger und mit hoher bzw. kontinuierlicher Anforderungsrate zusammenfassend dargestellt.

**Tab. 5.4** Sicherheitsintegritätslevel SIL für verschiedene Betriebsarten

Sicherheits-integritätslevel (SIL)	Betriebsart mit niedriger Anforderungsrate (mittlere Wahrscheinlichkeit für Ausfall bei Anforderung)	Betriebsart mit hoher oder kontinuierlicher Anforderungsrate (Ausfälle pro Stunde)
1	$10^{-2}$ bis $10^{-1}$	$10^{-6}$ bis $10^{-5}$
2	$10^{-3}$ bis $10^{-2}$	$10^{-7}$ bis $10^{-6}$
3	$10^{-4}$ bis $10^{-3}$	$10^{-8}$ bis $10^{-7}$
4	$10^{-5}$ bis $10^{-4}$	$10^{-9}$ bis $10^{-8}$

Die genannten Bedingungen werden, dem Standard [11] entsprechend, generell auf das gesamte sicherheitsbezogene System angewandt. Für Airbag-Elektronik-Systeme wird für die Betriebsart mit niedriger Anforderungsrate üblicher Weise ein Sicherheitsintegritätslevel SIL 3 angestrebt; dieser entspricht einer mittleren Ausfallwahrscheinlichkeit im Bereich von  $10^{-4}$  bis  $10^{-3}$ .

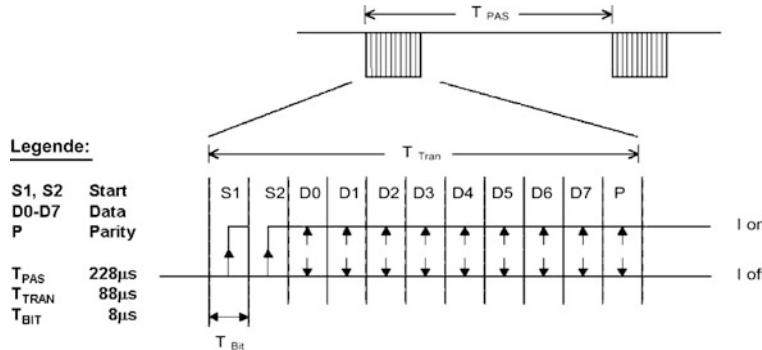
Schließlich soll der Vollständigkeit halber auf den Standard nach IEC/EN 61508 [11] eingegangen werden. Er setzt sich aus insgesamt sieben Teilen zusammen, wobei nur die ersten drei Teile normative Anforderungen enthalten:

- Teil 1: Allgemeine Anforderungen,
- Teil 2: Anforderungen an sicherheitsbezogene elektrische / elektronische / programmierbare elektronische Systeme,
- Teil 3: Anforderungen an Software,
- Teil 4: Begriffe und Abkürzungen,
- Teil 5: Beispiele zur Ermittlung der Stufe des Sicherheitsintegritätslevels (SIL),
- Teil 6: Richtlinien für die Anwendung von Teil 2 und 3 und
- Teil 7: Überblick über Techniken und Maßnahmen.

### 5.3.7 Datenübertragung

Die Datenübertragung von externen Sensoren, beispielsweise den Seiten-Sensoren, ist bei den früheren Systemen mit einem PWM-Signal (PWM: Pulsweiten-Modulation) durchgeführt worden. Bei diesem Signal wurden fünf verschiedene  $T_i/T_p$ -Verhältnisse für die Datenübertragung gewählt; es wurde aber auch – je nach Hersteller-Anforderung – ein Sechs-Bit-Code verwendet. In beiden Anwendungsfällen wurden die Beschleunigungsinformationen in den externen Seiten-Sensoren mit einem Algorithmus bewertet und damit vorverarbeitet, sodass nur die Zündentscheidung an die Airbag-Elektronik übertragen wurde. Bei der aktuellen Datenübertragung von den externen Sensoren, z. B. den Seiten- oder Up-Front-Sensoren, zur Airbag-Elektronik wird heute häufig nur noch eine digitale Übertragung angewandt. Es handelt sich dabei überwiegend um das von Bosch entwickelte, so genannte PAS 3- oder das PAS 4-Protokoll (PAS: Peripheral Acceleration Sensor).

Für die nächste Zukunft ist vorgesehen, das gemeinsam von Autoliv, Bosch und Conti-Temic entwickelte PSI-5-Protokoll (PSI: Peripheral Sensor Interface) zu verwenden. Bei diesen verschiedenen Protokollen wird das Manchester-codierte Datenübertragungsverfahren eingesetzt (vgl. Abb. 5.40).



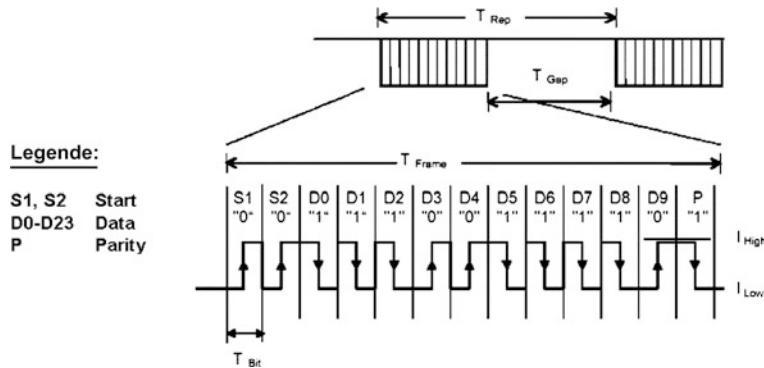
**Abb. 5.40** Datenübertragung nach dem PAS 3-Protokoll

Beim PAS 3-Protokoll beträgt die Datenbreite 8 Bit und beim PAS 4-Protokoll 10 Bit. Im Gegensatz dazu weist das PSI-5-Protokoll – eine Weiterentwicklung des PAS-x-Standards – einen variablen Datenrahmen von 8 bis 24 Bit auf. Damit besteht die Möglichkeit, zusätzliche Informationen wie Hersteller-Code, Sensor-Typ und -Charakteristik zu übertragen. Die Übertragung dieser Zusatzinformationen an die Airbag-Elektronik erfolgt während der Entfaltungsphase des Airbag-Systems. Nachfolgend soll die vorläufige Spezifikation für das PSI-5-Protokoll (vgl. Abb. 5.41) dargestellt werden:

- Zweidraht-Strominterface
- Manchester-codierte Datenübertragung
- 8 bis 24 Bit-Datenwortlänge
- 0 bis 19 mA Stromaufnahme bei Datenpause
- Übertragung von Hersteller-Code, Sensor-Typ und -Charakteristik
- Synchroner und asynchroner Betriebsmodus, einstellbar
- Sensor-Cluster und Semi-Busfähig

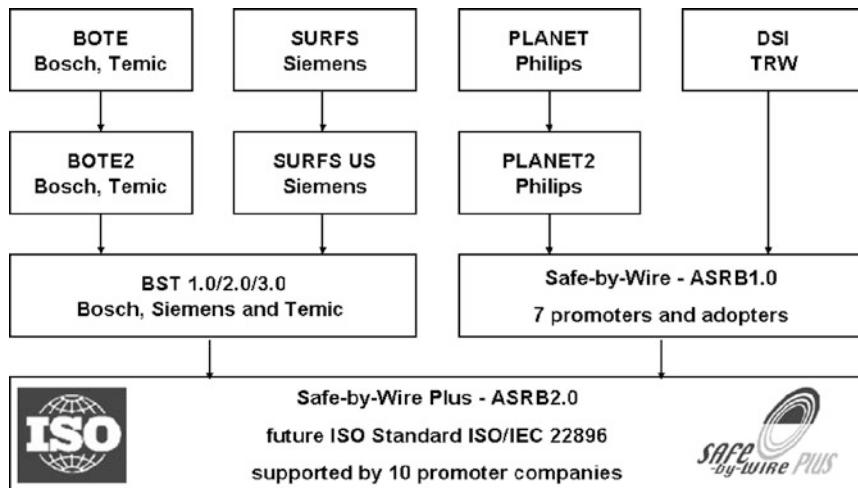
Bei den Druck-Sensoren werden gelegentlich auch die Zwölf-Bit-Pegasus-Protokolle von Siemens VDO verwendet.

Eine konsequente Weiterführung der digitalen Datenübertragung stellt die Entwicklung der **Bus-Systeme** für die Anwendung von Insassenschutz-Systemen dar. Während es dazu in der Vergangenheit von verschiedenen Herstellern immer wieder entsprechende Vorschläge und einzelne Entwicklungen gab, die sich jedoch aufgrund der Vielfalt am Markt nicht durchsetzen konnten, wurde dem Interesse der Fahrzeughersteller nach einheitlichen, standardisierten Lösungen entsprochen, und es kam zu einem weltweiten Zusammenschluss der auf dem Gebiet der passiven Sicherheit tätigen Hersteller. Die Bemühungen



**Abb. 5.41** Datenübertragung nach dem PSI-5-Protokoll (aus [7])

um eine Standardisierung führten zu einer Spezifikation mit dem Titel „Safe-by-Wire Plus – Automotive Restraint System Bus Spezifikation 2.0“ (vgl. Abb. 5.42), die zur Standardisierung eingereicht wurde und als ISO-Standard (ISO/IEC 22896) eingeführt wird.



**Abb. 5.42** Standardisierungsinitiative für das Bus-System „Safe-by-Wire Plus“

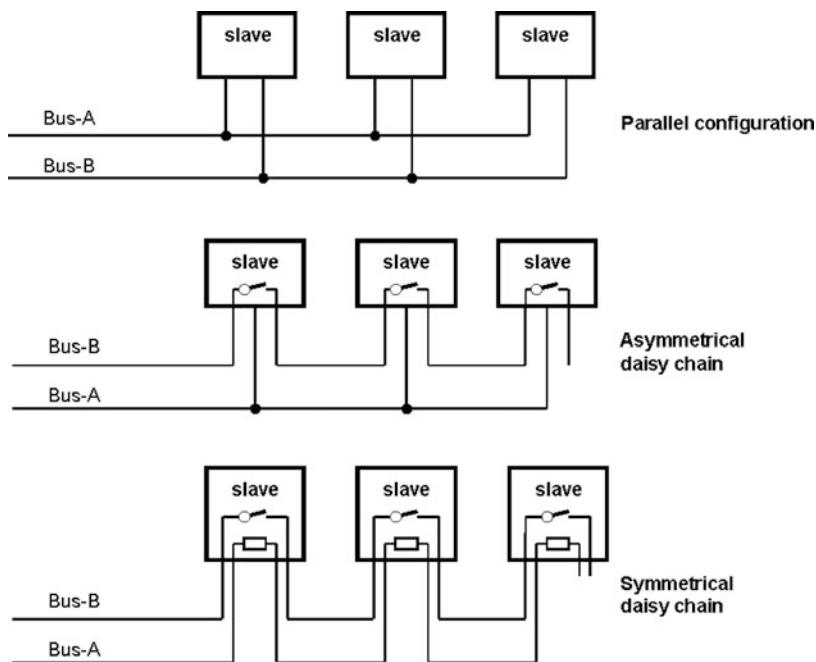
Für den Standard „Safe-by-Wire Plus“ sind folgende (noch vorläufige) Eigenschaften spezifiziert:

- Bus für Zünd- und Sensor-Anwendungen:
  - Bus für Anzünder und Sensoren bei Insassenschutz-Systemen
  - Sensor-Bus für dynamische und statische Sensoren
  - kombinierter Sensor- und Zünd-Bus

- Bi-direktonaler Zweidraht-Bus mit integrierter Spannungsversorgung:
  - Master/Slave-Betrieb
  - Prioritätssteuerung für Zündkommandos vom Master
  - Unterbrechungsfähigkeit für „smarte“ Sensoren
  - optionale Multi-Master-Fähigkeit
- Variabler Busgeschwindigkeit durch dynamische Slaves:
  - 20, 40, 80 oder 160 kbps  $\pm 13\%$
- Flexible Bus-Topologie: Stern-, Ring- oder gemischte Struktur
- Ermöglichung von daisy-chain-, parallelen oder Misch-Systemen:
  - 20, 40, 80 oder 160 kbps  $\pm 13\%$
  - Bus-Länge für paralleles System bis zu 40 m
  - Bus-Länge für daisy-chain-System bis zu 25 m
- Erholung bei Bus-Fehlern innerhalb der spezifizierten Grenzen in Echtzeit
- Kommunikationsfehler-Erkennung durch Sender und durch Empfänger:
  - CRC Überprüfung
- Mehrfach-Absicherung gegen unbeabsichtigtes Auslösen:
  - Bit-Fehlererkennung durch Master und Slave
  - reservierte Bus-Spannungslevel für Zündkommando (analog safing)
  - Zündung nur bei aufgeladener Energiereserve im Anzünder
  - Zündung nur bei vorherigem Zündfreigabe-Kommando
  - Unterstützung der High-Side- und der Low-Side-Schalter im Anzünder, die getrennt über den Bus kontrolliert werden können
- Einsatz von Stützungskondensatoren in den Slaves möglich

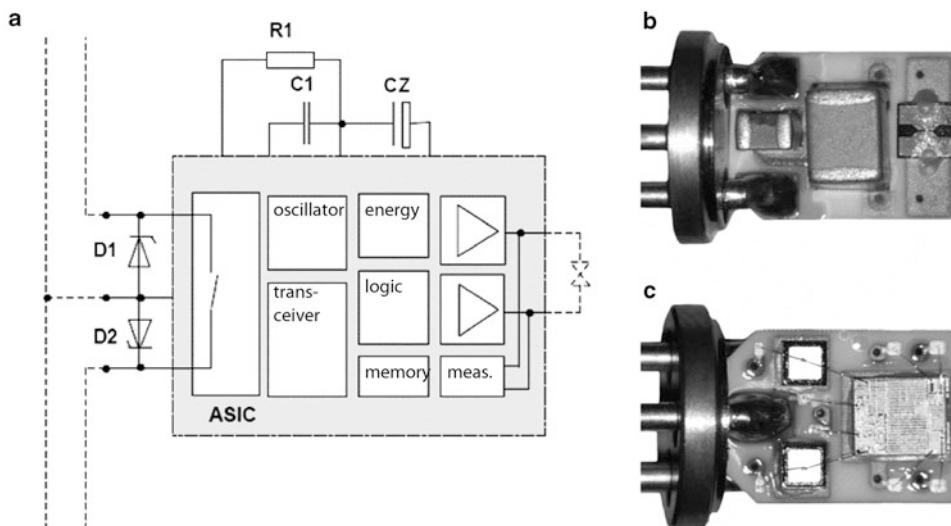
Die Berücksichtigung dieser Eigenschaften erlaubt eine flexible Systemauslegung: Neben den Parallel-Systemen sind auch symmetrische und asymmetrische Daisy-Chain-Systeme möglich (Abb. 5.43). Zudem besteht die Möglichkeit, die unterschiedlichen Systeme zu kombinieren. Durch den Einsatz von Daisy-Chain-Slaves an entsprechenden Knotenpunkten können Abzweigungen, die als Parallel-System ausgeführt sind, im Fehlerfall vom restlichen System entkoppelt werden.

Zur Integration der **Bus-fähigen Anzünder** sind spezielle Ausführungen erforderlich, die neben der normalen Pyrotechnik über eine geeignete elektronische Schaltung verfügen müssen, um ihren Betrieb überhaupt in einem Bus-System zu ermöglichen. Diese Schaltung umfasst zunächst eine Bus-Schnittstelle sowie die Adressier- und Dekodier-Logik, die Diagnose-Einrichtung, eine Spannungsversorgung mit Energiereserve und den Leistungsschalter zum Ansteuern der Zündbrücke und ist zweckmäßigerweise als ASIC-Schaltkreis ausgeführt (Abb. 5.44). Da die Anzünder nur über eine geringe Energiereserve verfügen, werden so genannte Low-Energy-Zündbrücken verwendet. Die zum Zünden notwendige Energie beträgt (mit den Parametern Brückenwiderstand 1,1 bis 10  $\Omega$ , Zündkondensator 0,3 bis 1  $\mu\text{F}$  und Zündspannung 22 V) je nach Ausführung etwa 70 bis 240  $\mu\text{J}$ . Im Vergleich dazu weist ein konventioneller Brückendrahtzünder einen Energiebedarf von ungefähr 1 bis 3 mJ auf. Aufgrund der im Anzünder enthaltene Pyrotechnik sind die An-



**Abb. 5.43** Flexible Systemauslegung durch unterschiedliche Bus-Strukturen (aus [1])

forderungen hinsichtlich einer elektrostatischen Aufladung (ESD: Electrostatic discharge) sehr anspruchsvoll; sie müssen eine ESD-Spannung von 30 kV ( $150 \Omega$ ;  $150 \text{ pF}$ ) schadlos überstehen können.



**Abb. 5.44** Schaltbild und Realisierung eines integrierten Bus-fähigen Anzünders (aus [1])

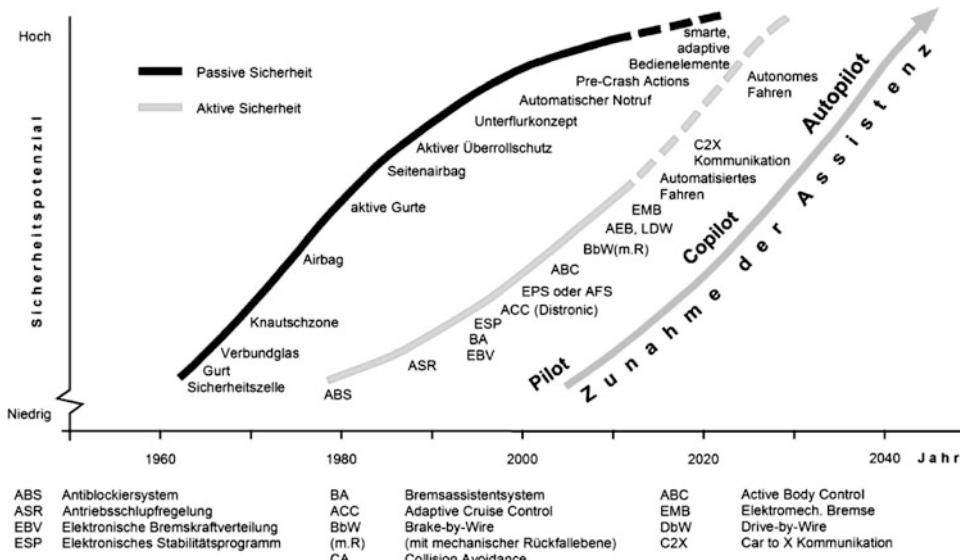
Die Schaltung des Bus-fähigen Anzünders ist auf einem Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Substrat mit einer Größe von 6,0 · 8,0 mm aufgebracht. Zur Kontaktierung mit einem Stecker verfügt die Schaltung über Steckerpins mit Standard-Kontakten von 1 mm Durchmesser, die von einem Glas/Metall-Sockel aufgenommen werden. Auf der Oberseite, in Abb. 5.44b dargestellt, sind die Kondensatoren C1 und CZ sowie der Widerstand R1 aufgebracht, wobei der Widerstand R1 direkt auf das Substrat aufgedrückt ist und sich aus Platzgründen unter dem Kondensator CZ befindet. Bei den Kondensatoren handelt es sich um Standard-Bauelemente, die mit Hochtemperatur-Lot kontaktiert sind. Zudem dienen die zwei Kontaktflächen der Kontaktierung der Zündbrücke, ein so genanntes HfHx-Element. Auf der Unterseite des Substrats, in Abb. 5.44c gezeigt, ist die ESD-Schutzschaltung mit den Suppressor-Dioden D1 und D2, sowie die Auswerteschaltung aufgebracht. Die Kontaktierung der einzelnen Bauelemente erfolgt durch ein spezielles Klebe/Press-Verbindungsverfahren, das so genannte Die-Bond-Verfahren.

---

## 5.4 Systemintegration hinsichtlich aktiver und passiver Sicherheit

Das enorme Potenzial, das der Einsatz der Elektronik in bisher vorwiegend mechanisch dargestellten Funktionen erschlossen hat, sowie die durch sie erst mögliche Entwicklung gänzlich neuer Funktionen, hat der Elektronik im gesamten Fahrzeug einen Siegeszug besichert. Das heutige Durchschnittsfahrzeug hat einen Wertanteil der Elektronik von über 30 % und im Durchschnitt über 30 Steuergeräte in den Bereichen Antriebsstrang, Interieur und Chassis. Der nächste große Schritt beinhaltet die Vernetzung dieser elektronischen Einzelsysteme zu erweiterten Funktionsblöcken. Die integrale Sicherheit, d. h. der Funktionsverbund von aktiven und passiven Sicherheitsfunktionen (Abb. 5.45) und die Ausweitung der Assistenzfunktionen, hilft dem Fahrer, heikle Verkehrssituationen besser zu meistern als es der klassische Ansatz getrennter aktiver und passiver Sicherheit vermag.

Die bisher in Automobilen verwendeten Insassenschutz-Systeme erfahren gegenwärtig eine enorme Veränderung durch Informationen, die im zeitlichen Bereich der aktiven Sicherheit generiert werden: Sie wurden in der Vergangenheit erst dann aktiviert, wenn der Unfall tatsächlich eingetreten war. Die aktuelle Entwicklung konzentriert sich einerseits auf die Verbesserung der Funktionalität und der Wirksamkeit der Schutzsysteme für die Fahrzeug-Insassen, andererseits aber zunehmend auch auf den Schutz der äußeren Verkehrsteilnehmer, deren Sicherheitsbedürfnis immer stärker in den Vordergrund rückt. Diese Anforderungen erschließen die Möglichkeit der Entwicklung einer neuen Generation von Sensoren, wie beispielsweise Insassen-Erkennungssysteme, PreCrash- und Umfeld-Sensoren, um bereits vor dem Eintritt der Kollision zu entscheiden, welche Sicherheitssysteme bei stattfindendem Aufprall in welchem Umfang ein Optimum an Schutz bieten können. Die passive Sicherheit profitiert gewissermaßen von den Informationen, die aus der aktiven Sicherheit bereitgestellt und verwendet werden können. In diesem Sinne kommt es zu einer, wenn auch einseitigen Verknüpfung der aktiven und der passiven Sicherheit, um dem steigenden Sicherheitsbedarf gerecht werden zu können.



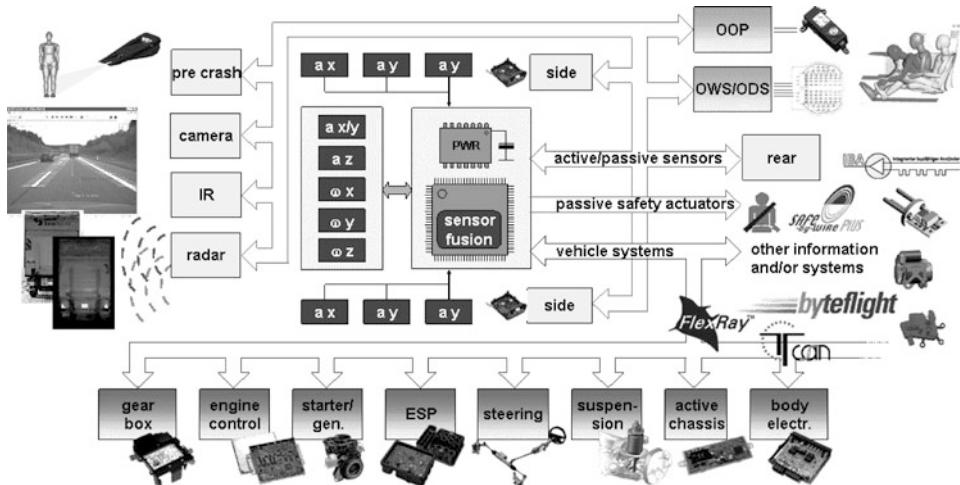
**Abb. 5.45** Entwicklung der Assistenz-Systeme am Beispiel der aktiven und der passiven Sicherheit

Von der aktiven Sicherheit wird erwartet, dass kritische Situationen in Form einer nicht bestandenen Fahraufgabe bewältigt werden, um so einen drohenden Unfall zu vermeiden. Abhängig von der räumlichen und zeitlichen Reichweite der eingesetzten Sensoren werden die damit generierten Informationen dazu genutzt, den Fahrer zu warnen und zu unterstützen. Diese Informationen lassen sich aber auch zur Aktivierung von Insassenschutz-Systemen nutzen, die früher und präziser angesteuert werden können als die heute verfügbaren Systeme. Damit kann eine erhebliche Verbesserung der Sicherheit erzielt werden. Die dazu erforderlichen Sensoren werden für die Anwendung im Bereich der Unfallvermeidung, d. h. der aktiven Sicherheit konsequent weiterentwickelt. Erste am Markt eingeführte Beispiele der erweiterten Fahrerassistenz-Systeme (ADAS: Advanced Driver Assist System) sind neben den Abstandsregel-Tempomat ACC die Spurwechsel-Warneinrichtung LDW (Lane Departure Warning) und das Spurhalte-Unterstützungssystem LKS (Lane Keeping Support). Diese Einrichtungen ermöglichen, den Fahrer vor einem unbeabsichtigten Fahrspurwechsel zu warnen, oder das Fahrzeug in Verbindung mit einer elektrisch unterstützten Lenkung automatisch in der Fahrspur zu halten.

Aus der aktuellen Straßenverkehrsunfallstatistik ist bekannt, dass Insassenschutz-Systeme eine wirksame Maßnahme darstellen, Verletzungsfolgen bei Unfällen zu minimieren oder gar zu vermeiden. Aus dem gleichen Unfalldatenmaterial kann aber auch abgeleitet werden, dass Situationen auftreten, in denen eine Verbesserung der Wirksamkeit von Insassenschutz-Systemen erforderlich wäre und möglich erscheint. Ebenso zeigen die Unfalldaten, dass ein Schutzbedarf auch für äußere Verkehrsteilnehmer existiert, z. B. für Fußgänger, Motorrad- oder Fahrradfahrer, die bisher nicht ausreichend berücksichtigt

wurden. So fordert die Europäische Union erhebliche Anstrengungen ein, die auf den Schutz von Fußgängern abzielen und in die freiwillige Selbstverpflichtung der europäischen Automobil-Hersteller, zusammen geschlossen in der ACEA (European Automobile Manufacturer Association), übernommen wurden. Das dort vereinbarte Übereinkommen bedeutet einen großen Schritt in Richtung passive, aber auch in Richtung aktive Sicherheit.

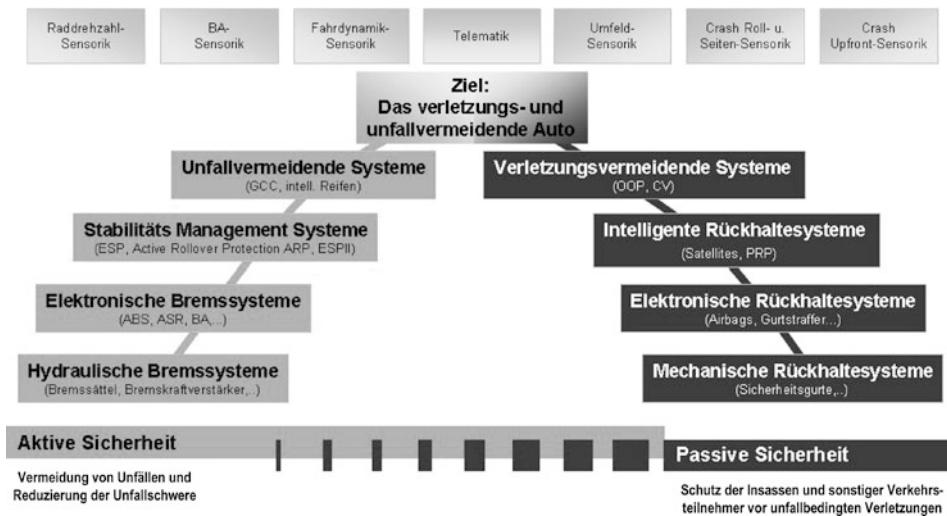
An die Schutzsysteme in modernen Fahrzeugen werden künftig neue Herausforderungen hinsichtlich der Architektur, der multifunktionalen Anwendung und der zunehmenden Anzahl der Sensoren gestellt. Zudem sind eine intelligente Vernetzung und die Reduzierung von Kosten, Gewicht und Montage-Aufwand unumgänglich. Es werden ausgefeilte, leistungsfähige Bus-Systeme zur Anwendung kommen, mit denen der Datenaustausch zwischen den einzelnen Sensor- und Steuermodulen vorgenommen wird. Schließlich werden Systeme zum Einsatz kommen, die in der Lage sind, mechanische und hydraulische Komponenten vollständig zu ersetzen, so genannte X-by-Wire-Systeme, die ohne leistungsfähige und zuverlässige Bus-Systeme undenkbar sind (Abb. 5.46).



**Abb. 5.46** Systemintegration aktiver/passiver Sicherheitssysteme (aus [1])

**Der integrale Sicherheitsgedanke** – So wie die Chassis-Teilsysteme in einem globalen Regelverbund zusammenwachsen, ist auch die Integration der aktiven und passiven Sicherheitssysteme in vollem Gange. In einer ersten Stufe wurde von Mercedes im Jahr 2002 ein System der integrierten Sicherheit unter dem Namen PRE-SAFE in Serie gebracht. Neuere Systeme wie das ContiGuard® genannte System von Continental binden zusätzlich Umfeld-Informationen in eine gestufte Unfallvermeidungs- und Verletzungsschutz-Strategie ein (Abb. 5.47).

Die Vereinten Nationen haben durch einen Beschluss ihrer Vollversammlung den Zeitraum 2011 bis 2020 zur Dekade der Verkehrssicherheit erklärt. Die EU-Kommission hat auf Vorschlag der Generaldirektion Verkehr (DG MOVE) Leitlinien für die Straßenver-



**Abb. 5.47** Vernetzung von aktiven und passiven Sicherheitsfunktionen zur integralen Sicherheit  
(Quelle: Continental)

kehrssicherheit für 2011 bis 2020 veröffentlicht. Diese sehen unter anderem vor, die Zahl der im Straßenverkehr Getöteten um weitere 50 % zu reduzieren. Jedes Jahr kommt alleine in der EU die Einwohnerzahl einer ganzen Kleinstadt ums Leben. Europaweit muss die Verkehrssicherheit daher weiter erhöht werden. Eines steht fest: Fahrerassistenzsysteme und integrierte Sicherheitssysteme gelten als Schlüsseltechnologien, wenn es darum geht, die Fahrsicherheit zu erhöhen. Ohne sie wird die festgelegte Halbierung der Anzahl der im Straßenverkehr Getöteten bis 2020 nur schwer zu erreichen sein.

Die reglungstechnische Vernetzung von (durch Umfeld-Informationen gestützter) aktiver und passiver Sicherheit zur integralen Sicherheit bringt viele Vorteile in allen Phasen des Fahrens: Den erhöhten Schutz vor Unfällen (Unfall-Vermeidung) bzw. die Minimierung der Unfallfolgen (Unfallfolgen-Minderung).

**Normales Fahren** Information und Entlastung – Während der normalen Fahrt und ohne eine akute Gefahr wird der Fahrer durch Assistenzfunktionen von routineartigen Handlungen entlastet (z. B. Adaptive Cruise Control ACC); bei der Spurhaltung assistiert der sogenannte Spurwechselassistent LKA (Lane Keeping Assist). Der Fahrer wird bei der Einhaltung des sicheren Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug unterstützt, die Fahrspur wird mit Hilfe von Kamerainformationen und Lenkeingriff besser gehalten und haptisch zurückgemeldet, das Fahrlicht entspricht der Witterungsbedingungen und der Tageszeit geregelt, Geschwindigkeitsbeschränkungen werden angezeigt, Verkehrsinformationen treffen über Radio oder Navigation ein.

**Gefahrensituation** Warnung und Unterstützung bei der Unfallvermeidung – Das elektronische Bremsystem und die elektrische Lenkung (EPS) sind Schlüsseltechnologien für alle eingreifenden Sicherheitsfunktionen. Vorausschauende Bremsassistenz-Funktionen, die vom Vorkonditionieren der Bremse bis hin zur automatischen Notbremsung reichen, werden in kritischen Auffahrsituationen aktiviert. Auch bei der Durchführung eines Ausweichmanövers wird der Fahrer unterstützt, das Fahrzeug sicher auf der Straße zu halten. Wenn der Unfall dennoch unvermeidlich ist, spielen die drei folgenden Fahrphasen eine wichtige Rolle bei der Reduzierung der Unfallfolgen.

**Vor dem Unfall** Vorbereitung – Die Reduzierung der Aufprallgeschwindigkeit durch einen Notbremsassistenten kann das Verletzungsrisiko entscheidend reduzieren. Vor einem Aufprall werden zusätzliche Schutzmaßnahmen (z. B. das Aktivieren von Gurtstraffern, Positionieren der Insassen, Vorkonditionierung der sonstigen Insassenschutzsysteme, Position von Sitz und Kopfstützen), die das Fahrzeug und dessen Insassen auf einen Unfall vorbereiten, eingeleitet. Je nach ausgewerteten Informationen über die Unfallschwere und die Unfallkonstellation erfolgt eine an die Situation angepasste Zündentscheidung der nichtreversiblen Rückhaltesysteme, so dass die Fahrzeuginsassen größtmöglichen und zuverlässigen Schutz erfahren.

**Während des Unfalls** Aufprallschutz – Um einen maximalen Insassenschutz zu gewährleisten, werden die Airbags situationsabhängig auf Grundlage der Daten von Precrash-Sensoren ausgelöst. Dabei kommen Technologien, wie z. B. die Überroll-Sensorik und die Optimierung der Airbag-Auslösung anhand des Körperschalls (Crash Impact Sound Sensor) aufgrund ihres schnellen und präzisen Ansprechverhaltens eine wichtige Bedeutung zu. Auch während eines Aufpralls bleibt der Notbremsassistent aktiv.

**Nach dem Unfall** Minimierung der Unfallfolgen – Kurz nach dem ersten Aufprall werden Maßnahmen eingeleitet, die einen weiteren Aufprall vermeiden bzw. die Unfallschwere zu mindern versuchen und darüber hinaus Rettungskräfte alarmieren. Nachdem ein erster Aufprall durch die Zündung der Airbags detektiert wird, bremst das elektronische Bremsystem das Fahrzeug bis zum Stillstand automatisch ab. Der lebensrettende „eCall“ ist ein automatisch generierter Notruf. Dabei wird der Standort des Fahrzeugs angegeben und zusätzlich das so genannte „Minimum Set of Data“ (MSD) übermittelt. Diese Angaben sind für die Rettungskräfte wichtig, damit das Fahrzeug richtig geortet werden kann, vor allem wenn z. B. ein einsamer (nächtlicher) Alleinunfall ohne andere Beteiligte vorliegt.

---

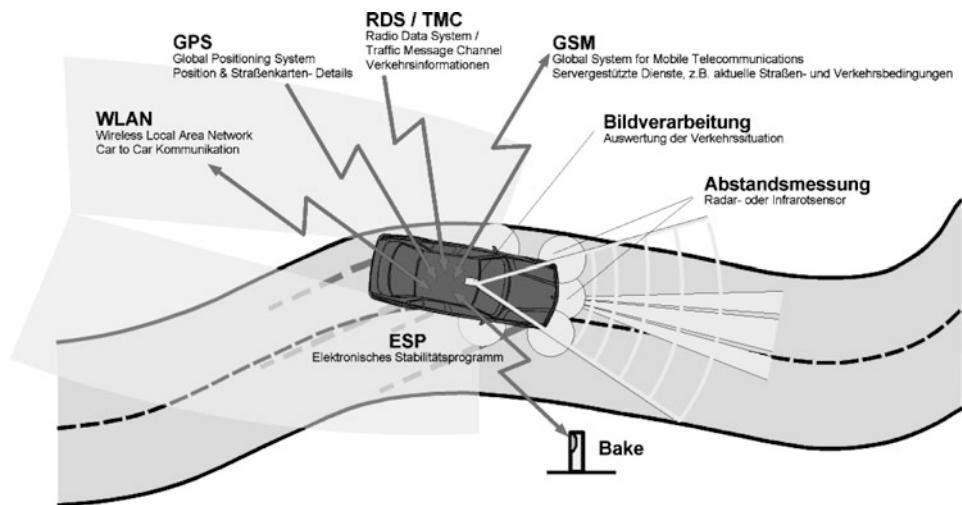
## 5.5 Künftige Entwicklungen und Erwartungshorizont

Das Fernziel wird in der **Unfallvermeidung** gesehen. Die heute schon weit verbreitete dynamische Navigation mit Anbindung an das standardisierte Mobilfunknetz (GSM: Global

System for Mobile Communications) hat das Potenzial, einigermaßen verlässlich über aktuelle Staus oder Gefahren auf der geplanten Fahrtroute zu informieren. Mit zunehmender Präzision der elektronischen Straßenkarten und der Positionsbestimmung des Fahrzeugs werden weitere neue Funktionen denkbar, wie beispielsweise die Vernetzung des elektronischen Stabilitätsprogramms mit dem adaptiven Tempomat ACC. Er wertet mit erweiterter Sensorik (Kamera mit Bildverarbeitung) Fahrbahnmarkierungen maschinell aus, um so einen weiteren Schritt in Richtung sicheres Fahren leisten. Erkennt der Chassis-Regler eines derart ausgestatteten Fahrzeugs aufgrund der zusätzlichen Navigationsdaten, dass das Auto für die vorausliegende Haarnadel-Kurve zu schnell ist, könnte dies zur Fahrerwarnung, zur Reduzierung des Motor-Drehmoments und Vorladung des Bremssystems oder gar in der visionären Endstufe zu einem autonom eingeleiteten Bremsvorgang führen.

Mit steigender Zuverlässigkeit der Verkehrsinformationen, die über das Autoradio (Traffic Message Channel) oder digitale Kommunikation in den Fahrwerksrechner gespeist werden, lässt sich die Vision der aktiven Unfallvermeidung durch vernetzte elektronische Komponenten weiter ausmalen: Droht auf dem demnächst zu passierenden Streckenabschnitt Glatteis oder ist die Fahrbahn wegen eines Unfalls oder einer Baustelle blockiert, kann die Elektronik den Fahrer warnen oder gar das Fahrzeug durch aktive Eingriffe in Lenkung und Bremse verzögern. Drive by wire wird zur technologischen Voraussetzung (enabling technology), die das Auto sehen und hören lehrt. Eingedenk der Ansprüche, die eine so komplexe Vernetzung von Chassis-Systemen untereinander und mit der Außenwelt stellt, ist es bis zum Auto, das Unfälle vermeiden kann, ein langer Weg; er wird noch Jahrzehnte in Anspruch nehmen. Doch mit Chassis-Regeleinrichtungen (Global Chassis Control), umfeldinformationsgestützter, integraler Sicherheitstechnologie und weitgehender Fahrzeug/Fahrzeug- bzw. Fahrzeug/Umfeld-Kommunikation ist eine Lösung denkbar und zu bewältigen. Neben leistungsfähigen Sensoren sind insbesondere leistungsfähige Aktuatoren erforderlich. Dem fortschrittlichen, alle zukünftigen Anforderungen abdeckenden Bremssystem kommt dabei höchste Bedeutung zu (Abb. 5.48).

**Ausblick: Autonomes Fahren** – Automatisiertes Fahren ist keine Utopie („blue sky“) mehr, sondern rückt immer stärker an die Wirklichkeit heran. Der Stand der Automation ergibt sich aus der konsequenten Weiterführung der assistierenden Übernahme von Fahraufgaben, dem so genannten Advanced Driver Assist System ADAS, um den Fahrer in definierten Fällen zu entlasten. Das Assistenzniveau der Automation entbindet den Fahrer aber nicht gänzlich von Fahrzeugführung, übernimmt aber Längs- oder Querführungs-aufgaben und unterstützt den Fahrer in der jeweils komplementären Aufgabe, siehe ACC oder LKS. Darüber hinaus unterstützt die Fahrerassistenz diejenigen Aufgaben, die über die Grenzen der Reaktions- und Manipulationsmöglichkeiten des Fahrers gehen, ob in der Stabilisierungsebene der Fahraufgabe, z. B. mit ABS oder ESC, oder auch in der Bahn-führungsebene mit „Safety ADAS“, z. B. mit dem Notbrems-Assistenten AEB (Advanced Emergency Brake) oder dem Notlenk-Assistenten ESA (Emergency Steer Assist). Höhere Automationsgrade übernehmen mehr und mehr ganzheitlich Längs- und Querführungs-



**Abb. 5.48** Das mit Kameras, Radar und Telematik eingebundene Auto der fernen Zukunft wird Unfälle aktiv verhindern können

aufgaben, wobei der Fahrer als Überwachungs- und Rückfallebene im gleichen Maße eine geänderte Bedeutung zu kommt.

Insbesondere monotoner Fahrbetrieb ist ein potenzielles Anwendungsfeld für hochautomatisiertes Fahren. Der internationale Automobilzulieferer Continental hat jetzt im US-Bundesstaat Nevada einen zweiwöchigen Dauertest abgeschlossen. Dabei konnten über 6.000 Meilen Fahrzeugbetrieb in hochautomatisierter Art und Weise auf öffentlichen Straßen in Nevada absolviert werden. Sie dienten dem Ziel, nachzuweisen, dass es in ganz bestimmten Situationen möglich ist, Handlungsfreiraume für den Fahrer zu erschließen, die nicht der primären Fahrzeugführung dienen und damit für eine willkommene Abwechslung sorgen. Insbesondere Aspekte der Fahrsicherheit wurden dabei untersucht. Nevada ist der erste amerikanische Bundesstaat, der automatisiertes Fahren auf öffentlichen Straßen explizit erlaubt. Das in Nevada untersuchte Konzept für hochautomatisiertes Fahren basiert wesentlich auf dem beim Gewinnerfahrzeug der DARPA-Urban Challenge und dem europäischen Forschungsprojekt HAVEit erworbenen Wissen und Erfahrungen und verwendete erstmals seriennahe Technologien für Umfeld-Erfassung und Fahrzeugsteuerung. Zum Einsatz kamen eine neue Stereokamera, die Größe und Distanz von Hindernissen messen kann, sowie das elektronisch ansteuerbare Bremsystem und eine elektrische Lenkung (EPS, Electric Power Steering). Die Untersuchungen dienten der Erforschung möglicher Anwendungsfälle und der Ermittlung des sicherheitstechnisch vertretbaren Geschwindigkeitsbereichs bei vollautomatisiertem Betrieb des Fahrzeugs.

## Literatur

1. Conti Temic microelectronic GmbH, Nürnberg (2005).
2. Key Safety Systems Inc., Sterling Heights, MI (USA) (2005).
3. TRW Automotive, Livonia, MI (USA) (2005).
4. Schmidt Technology, St. Georgen (2005).
5. Freescale Semiconductor Inc., Austin, TS (USA) (2005).
6. SensoNor/infineon, Horten (N) (2005).
7. Robert Bosch GmbH, Gerlingen, Germany
8. Statistisches Bundesamt Wiesbaden (Hrsg.): Verkehrsunfälle 2011. Fachserie 8, Reihe 7. Internet-Abruf am 1.11.2012 unter <http://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/VerkehrsunfaelleJ.html>.
9. INVENT: Vorausschauende Aktive Sicherheit (VAS) – Ergebnisbericht des Projekts Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik, 1998–2003 (Zugriff unter <http://www.invent-online.de>).
10. Bundesvereinigung der Straßenbau- und Verkehrsingenieure BSVI e.V.: Daten zum Straßen- und Verkehrswesen. Hannover (1988).
11. IEC/EN 61508, Teil 1 bis 7.

Mit der Zunahme des Straßenverkehrs aufgrund der wachsenden Anzahl zugelassener Kraftfahrzeuge wuchs auch die Anzahl der Unfälle. Entsprechend frühzeitig setzten die Bemühungen der Legislative ein, zur Verbesserung der Verkehrssicherheit Vorschriften für Fahrzeuge zu erlassen ohne die Mobilität und das Verkehrsgeschehen zu beeinträchtigen. Zur Überprüfung der Sicherheitsmaßnahmen werden einerseits Funktionsuntersuchungen durchgeführt, andererseits stellt die Sicherheitsgesetzgebung für einzelne Sicherheitskomponenten oder für die Gesamtheit aller Sicherheitseinrichtungen eine Wirkvorschrift dar, bei der nach Erfüllung oder Nicht-Erfüllung der gesetzlichen Anforderung unterschieden wird. Die Bewertung hingegen hat zum Ziel, die passive Sicherheit nicht nur nach ja/nein-Kriterien zu unterscheiden, sondern auch den unter- und überkritischen Bereich wertmäßig zu erfassen, sodass die Belastungswerte selbst das Gütekriterium darstellen und die Höhe des Wertes mit der Wahrscheinlichkeit der körperteilspezifischen Verletzung korreliert. Damit werden dem Verbraucher Informationen bereitgestellt, nach denen er das Unfallverhalten eines bestimmten Fahrzeuges vergleichend mit einem anderen, innerhalb einer Fahrzeugklasse oder auch innerhalb der Fahrzeugpopulation beurteilen kann.

---

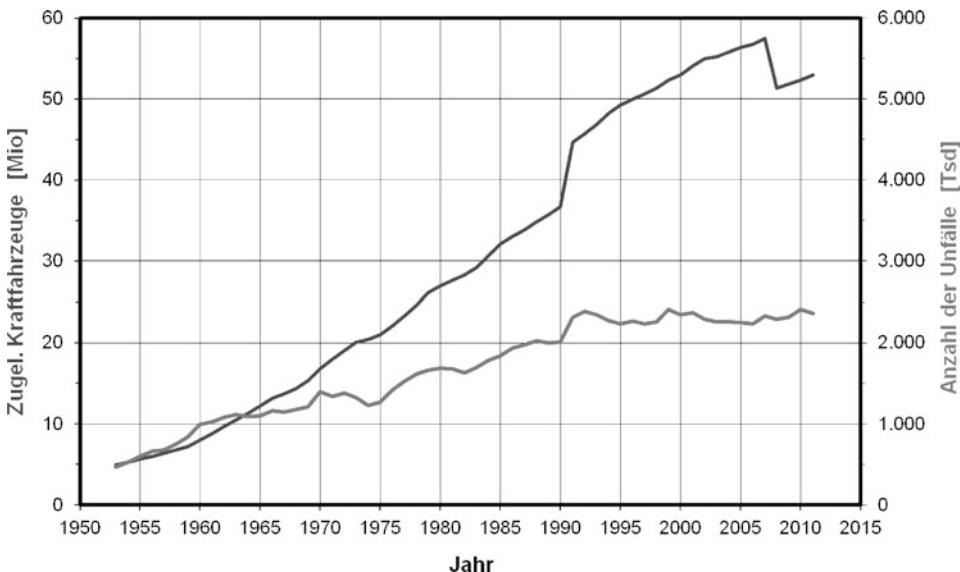
## 6.1 Quantifizierung der Straßenverkehrssicherheit

Es wurde bereits an anderer Stelle gezeigt (vgl. Abb. 1.1), dass die Straßenverkehrssicherheit auf den Menschen als Verkehrsteilnehmer, auf das Straßenverkehrsfahrzeug und auf die (Verkehrs-) Umwelt abzielt. Die unfallvermeidenden Maßnahmen werden dem Bereich der aktiven Sicherheit und die unfallfolgen-mindernden Maßnahmen der passiven Sicherheit zugeordnet. Im Folgenden soll nun dargestellt werden, in welchem Umfang sich die Sicherheit in den letzten sechs Jahrzehnten bei einer fast elffachen Zunahme der zugelassenen Kraftfahrzeuge verbessert hat. Dabei erscheint die in den Medien übliche Angabe etwa der prozentualen Reduzierung der im Unfallgeschehen tödlich Verletzten gegenüber dem Vorjahr oder die Anzahl der Unfallopfer pro zu-

gelassenem Fahrzeug bzw. je Kilometer-„Leistung“ unzureichend, und zwar aus zwei Gründen [1]:

- Die pauschalierenden Angaben lassen keine Aussage zu, auf welche der beiden Teilbereiche die Verbesserung der Sicherheit zurückzuführen ist, und
- der Schaden, der der Volkswirtschaft aufgrund der Verletzungsfolgekosten alljährlich entsteht, lässt sich nur zum geringeren Teil aus den tödlich Verletzten (2011: ca. 17,9 % der Folgekosten) ableiten.

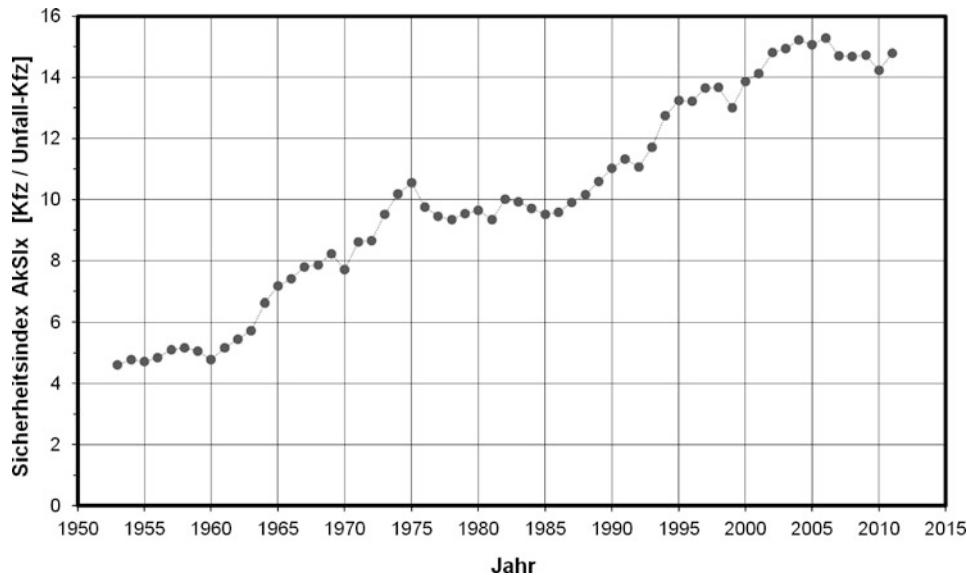
Die Anzahl der zugelassenen Kraftfahrzeuge nahm im Zeitraum von 1953 bis 2011 etwa um das Elfache zu, während sich die Zahl der Unfälle nur um ungefähr das Fünffache erhöhte (Abb. 6.1). Dabei sei darauf hingewiesen, dass durch die Vereinigung Deutschlands im Jahr 1990 der Zuwachs der Zulassungszahlen allein zwischen 1990 und 2007 – ab 2008 ohne vorübergehend stillgelegte Fahrzeuge – ca. 20,7 Mio. Kraftfahrzeuge betrug, was eine Zunahme um 56,5 % bedeutet. Die Unfallzahlen hingegen nahmen zunächst von 1990 mit 2,011 Mio. bis 1992 mit 2,385 Mio. Unfällen um 18,6 % zu und sanken dann erfreulicherweise wieder bis 2011 auf 2,361 Mio. Unfälle; gegenüber 1990 eine Zunahme von lediglich 17,5 %.



**Abb. 6.1** Kraftfahrzeug-Bestand und Anzahl der Unfälle im Zeitraum 1953 bis 2011 (ab 1991 einschließlich der neuen Bundesländer und ab 2008 ohne vorübergehend stillgelegte Fahrzeuge)

Zur getrennten Darstellung der aktiven und der passiven Sicherheit werden zunächst die zugelassenen auf die unfallbeteiligten Kraftfahrzeuge bezogen. Die Sicherheitskennzahl bezieht somit die Anzahl der nicht in einen Unfall involvierten Kraftfahrzeuge auf ein Unfall-Kraftfahrzeug. Sie ist als Gütekriterium für die aktive, oder besser primäre

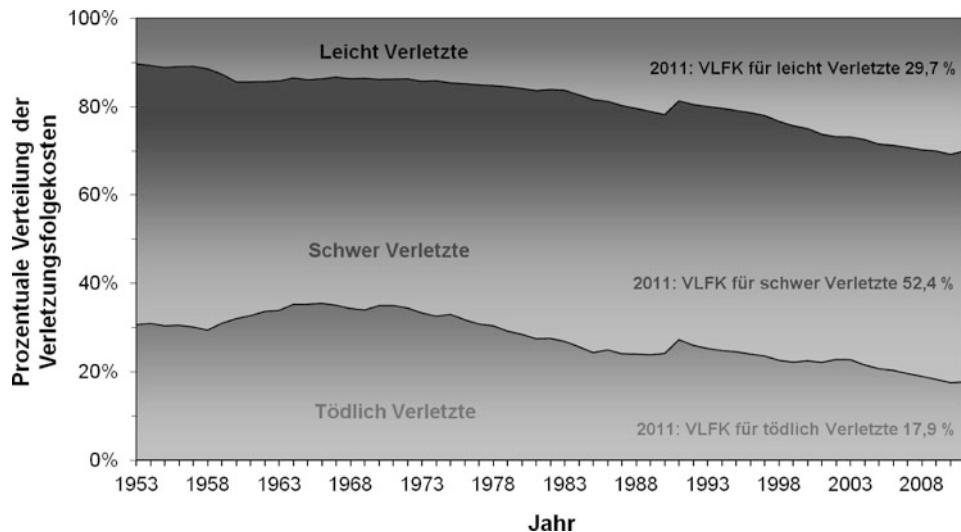
Sicherheit [1], für die Jahre 1953 bis 2011 in Abb. 6.2 dargestellt. Der so definierte **Index für die aktive Sicherheit AkSIX** steigt mit einer geringer werdenden Anzahl von Unfallfahrzeugen. Umgekehrt erhöht sich die aktive Sicherheit mit dem Bestand (und gewissermaßen der Fahrleistung) zugelassener Fahrzeuge bei gleicher Anzahl verunfallter Fahrzeuge. Durch die Berücksichtigung sowohl des Kraftfahrzeug-Bestandes als auch der Fahrleistung ist die Maßzahl der aktiven Sicherheit durch die Kollisionswahrscheinlichkeit und die Expositionsdauer geprägt.



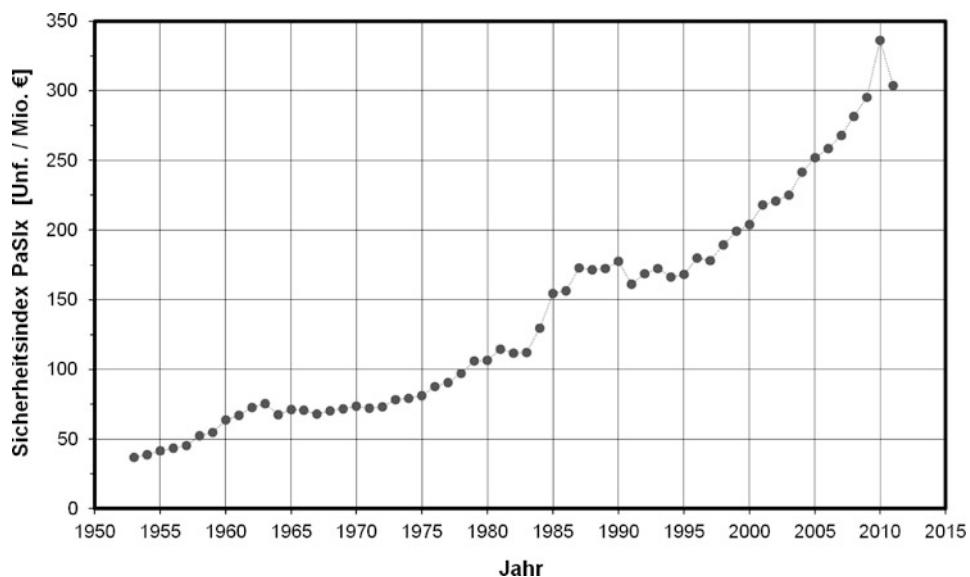
**Abb. 6.2** Zeitliche Entwicklung der aktiven Sicherheit im Zeitraum 1953 bis 2011 (ab 1991 einschließlich der neuen Bundesländer)

Der **Index für die passive Sicherheit PaSIX** ist durch den Quotienten aus der Anzahl aller Unfälle und den Verletzungsfolgekosten für leicht, schwer und tödlich Verletzte (aus Maßstabsgründen in Mio. €) gekennzeichnet [1]. In Abb. 6.3 ist die Verteilung der Verletzungsfolgekosten für den Zeitraum 1953 bis 2011 dargestellt und zeigt seit 1999 leicht ansteigende Anteile für Leichtverletzte von etwa 22 auf 30 % und mit abnehmender Tendenz für Schwerverletzte von 54 auf 52 % und für tödlich Verletzte auf schließlich 17,9 %. Durch die Quotientenbildung erhöht sich die Maßzahl für die passive Sicherheit mit Zunahme der Unfälle bei gleich bleibenden oder abnehmenden Folgekosten; die passive Sicherheit steigt aber auch bei gleich bleibender Unfallzahl und sinkenden Verletzungsfolgekosten.

Bei der zeitlichen Darstellung der Maßzahl für die passive Sicherheit, die in Abb. 6.4 gezeigten ist, kann seit Mitte der 1960er Jahre ein progressiver Zuwachs der passiven Sicherheit festgestellt werden. Die deutliche Erhöhung des Sicherheitsindexes in den Jahren 1984 und 1985 ist der im August 1984 eingeführten Bußgeldbewehrung bei Nicht-Anlegen des Sicherheitsgurtes zuzuschreiben.



**Abb. 6.3** Verteilung der Verletzungsfolgekosten für leicht, schwer und tödlich Verletzte im Zeitraum 1953 bis 2011 (ab 1991 einschließlich der neuen Bundesländer)



**Abb. 6.4** Zeitliche Entwicklung der passiven Sicherheit im Zeitraum 1953 bis 2011 (ab 1991 einschließlich der neuen Bundesländer)

Eine gewisse Stagnation der passiven Sicherheit ist seit 1987 festzustellen mit einem deutlichen Einbruch in den Jahren 1991 bis 1995, der sicherlich im Zusammenhang mit der Vereinigung Deutschlands gesehen werden muss. Es gibt zahlreiche Hinweise dafür,

die nahe legen, dass der Einbruch bei der passiven Sicherheit auf die Verbringung einer großen Anzahl gebrauchter, mängelbehafteter PKW in die neuen Bundesländer in Verbindung mit einer vorübergehenden exzessiven Nutzung zurück zu führen ist. In der Folgezeit kann allerdings eine Erholung der Sicherheit beobachtet werden, die offensichtlich aus dem positiven Einfluss des zunehmenden Anteils der mit Front- und Seiten-Airbags ausgestatteten PKW an der gesamten Fahrzeugpopulation resultiert.

Der hier gezeigte Index PaSIx für die passive Sicherheit fand bereits in abgewandelter Form eine Anwendung: Die in Abb. 2.8 gezeigte Sicherheitszahl wurde gebildet durch die Relation der Gesamtzahl aus verletzten und unverletzten Unfallbeteiligten und den ermittelten Verletzungskosten. Aufgrund der unterschiedlichen Basis sind die absoluten Werte allerdings nicht vergleichbar, doch lassen sich durch den Bezug der Anzahl von Unfallfahrzeugen oder die Anzahl der Unfallbeteiligten auf die spezifischen Verletzungskosten Sicherheitszahlen ermitteln, die trefflich das Sicherheitsmaß zum Ausdruck bringen.

Mit Hilfe der gezeigten Indizes für die aktive und die passive Sicherheit kann die Straßenverkehrssicherheit quantifiziert werden; die Maßzahlen lassen sich aus den Unfallzahlen der amtlichen Bundesstatistik [2] errechnen. Aufgrund der unterschiedlichen Dimensionalität dürfen sie allerdings nicht ineinander überführt werden, sie gestatten jedoch eine direkte Aussage über die erreichte Verbesserung in den beiden Sicherheitsbereichen und das darin enthaltene Verbesserungspotential. Die Zunahme der Sicherheitsmaßzahlen zeigt innerhalb des Zeitraumes von beinahe 60 Jahren durchaus unterschiedliche Zuwächse: bei der aktiven Sicherheit den mehr als dreifachen (4,6 auf 14,8), bei der passiven den mehr als achtfachen Wert (36,6 auf 304). Diese Zuwächse lassen sich nur in wenigen Fällen (z. B. Fußgeldbewehrung für das Nicht-Anlegen des Gurtes im Jahr 1984) unmittelbar auf einzelne gesetzgeberische Maßnahmen zurückführen, vielmehr sind sie Ausdruck der Gesamtwirkung ineinander greifender Einzelmaßnahmen, initiiert durch die Legislative, aber auch durch die Automobil-Hersteller, die dem Sicherheitsbedürfnis ihrer Kunden Rechnung trugen. Sie sind nicht zuletzt aber auch durch die Veröffentlichung von Ergebnissen aus Verbraucherschutzversuchen (z. B. Euro NCAP) positiv beeinflusst worden.

---

## 6.2 Gesetzgebung

Auf die mit wachsendem Verkehrsaufkommen einhergehende Zunahme der Unfälle mit den dabei auftretenden Verletzten und Getöteten reagierten die gesetzgebenden Organe weltweit recht unterschiedlich und formulierten dementsprechende Gesetze und Standards mit dem Ziel, die Straßenverkehrssicherheit nachhaltig zu verbessern. Auf Fahrzeuge bezogen lassen sich dabei im Wesentlichen vier Ansätze unterscheiden:

- Entwicklung und Bau möglichst sicherer Fahrzeuge durch Bau- und Wirkvorschriften,
- Erhalt des verkehrssicheren Zustandes von Fahrzeugen durch das Vorschreiben von Überwachungsintervallen,

- Abbau von Handelshemmnissen durch gleiche Anforderungen bezüglich Beschaffung, Prüfung und Genehmigung im Geltungsbereich von Mitgliedsstaaten und
- Harmonisierung durch die Aufgabe nationaler Bestimmungen zugunsten internationaler Verordnungen und Richtlinien.

Die gesetzlich festgelegten Vorschriften und Kriterien der Sicherheitsgesetzgebung beziehen sich dabei auf Anforderungen an das Fahrzeug im Alltagsbetrieb und bei Unfällen. Daneben wurden genau spezifizierte Regelungen an das Gesamtfahrzeug und an bestimmte Fahrzeugbauteile definiert, die für einzelne Staaten oder Staatengruppen in den letzten Jahrzehnten zum Teil auf die vier- bis fünffache Anzahl angewachsen ist [3].

## 6.2.1 Vorschriften in Deutschland und in Europa

Die in Deutschland geltende **Straßenverkehrs-Zulassungsordnung** (StVZO), die vom Bundesminister für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung erlassen wurde, geht von ihrer Entstehungsgeschichte bis ins Jahr 1937 zurück. Die StVZO wurde häufig überarbeitet und hat im Hinblick auf spezielle nationale Vorschriften für die Typzulassung von Fahrzeugen zunehmend an Bedeutung verloren; sie wurde sukzessive in andere Verordnungen überführt. So regelt seit 2009 die EG-Fahrzeuggenehmigungsverordnung (EG-FGV) auch die Zulassung von Fahrzeugen in Deutschland im Hinblick auf die Fahrzeugsicherheit basierend auf ECE-Regelungen oder EWG-Richtlinien.

In den einzelnen Staaten der Europäischen Union (EU), die 1957 als Europäische Wirtschaftsgemeinschaft (EWG) gegründet wurde, haben sich die Bau- und Ausrüstungsvorschriften unterschiedlich entwickelt, ebenso die Anforderungen an den Betrieb von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Maße, der Gewichte und der regelmäßigen technischen Überwachungen. Das Ziel des 1991 in Kraft getretenen EWG-Vertrages ist daher im Abbau von Handelshemmnissen und in der Durchführung einer gemeinsamen Verkehrspolitik zu sehen, denn das Fahrzeug ist einerseits eine Ware, die verkauft werden soll, andererseits aber sollen mit ihm Personen und Waren sicher transportiert werden [4]. Zur Erfüllung dieser Aufgaben kommen für Kraftfahrzeuge und Anhänger in der Regel Verordnungen oder Richtlinien zur Anwendung. Dabei haben Verordnungen in den einzelnen Mitgliedsstaaten unmittelbare Wirkung und ersetzen bestehende nationale Bestimmungen durch das Gemeinschaftsrecht, das in der Verordnung enthalten ist. Richtlinien hingegen entfalten keine unmittelbare Wirkung und müssen daher durch die Mitgliedsstaaten mittels eines Gesetzes oder einer nationalen Verordnung ratifiziert und umgesetzt werden.

Die **EU- (oder EWG-) Richtlinien** stellen auf eine optionelle Anwendung ab, d.h., dass anstelle nationaler Bestimmungen diejenigen der EU-Richtlinien angewendet werden können (optionelle Harmonisierung). Derzeit geht man in der EU allerdings dazu über, den Mitgliedsstaaten aufzugeben, die nationale Betriebserlaubnis zu verweigern, sofern das Fahrzeug nicht den EU-Richtlinien entspricht (totale Harmonisierung). Neben

den Richtlinien kommen Entscheidungen sowie Empfehlungen und Stellungnahmen in Betracht, die allerdings nicht verbindlich sind. Aufgrund der unterschiedlichen Vorschriften in allen EU-Mitgliedsstaaten liegt die Notwendigkeit für eine Harmonisierung auf der Hand. Maßgebend hierfür ist die Schaffung einer **EU- (bzw. EWG-) Typgenehmigung**, nach der in jedem Mitgliedsstaat ein Fahrzeug genehmigt wird und die in allen anderen Mitgliedsstaaten anerkannt werden muss und wird, ohne dass in den anderen Mitgliedsstaaten erneut eine Prüfung durchgeführt werden muss. Ein Automobil-Hersteller muss also nicht mehr wie früher die nationale Genehmigung in jedem einzelnen der derzeit 27 EU-Mitgliedsstaaten einholen; in Deutschland wird diese durch die Allgemeine Betriebserlaubnis, die das Kraftfahrt-Bundesamt ausstellt, erteilt. Vielmehr genügt eine einzige EU-Typgenehmigung, die dann in den anderen Staaten Anerkennung findet. Für die Erteilung einer kompletten EU-Typgenehmigung als Voraussetzung für die Zulassung eines Kraftfahrzeugs müssen 42 Einzel-Richtlinien erfüllt werden, welche die Bereiche der aktiven und der passiven Sicherheit sowie den Umweltschutz umfassen.

Neben den nationalen Vorschriften und den Richtlinien der EU sind die Regelungen der ECE (Economic Commission for Europe), einer Unterorganisation der UN, das dritte Standbein bei den Sicherheitsvorschriften für Kraftfahrzeuge. Diese **ECE-Regelungen** sind Anhänge des 1958 geschlossenen Übereinkommens über die Annahme einheitlicher Bedingungen für die Genehmigung der Ausrüstungsgegenstände und Teile von Kraftfahrzeugen sowie über die gegenseitige Anerkennung der Genehmigung. Dem Übereinkommen gehören neben den nunmehr 27 EU-Mitgliedsstaaten auch weitere osteuropäische Staaten, wie z. B. Russland u. a., an (Tab. 6.1).

**Tab. 6.1** Unterzeichnerstaaten des 1958er-Abkommens, UNECE-Regelungen (Stand Mai 2012)

Code	Country	Code	Country	Code	Country
1	Germany	19	Romania	40	Republic of Macedonia
2	France	20	Poland	42	European Community
3	Italy	21	Portugal	43	Japan
4	Netherlands	22	Russian Federation	45	Australia
5	Sweden	23	Greece	46	Ukraine
6	Belgium	24	Ireland	47	South Africa
7	Hungary	25	Croatia	48	New Zealand
8	Czech Republic	26	Slovenia	49	Cyprus
9	Spain	27	Slovakia	50	Malta
10	Serbia	28	Belarus	51	Republic of Korea
11	United Kingdom	29	Estonia	52	Malaysia
12	Austria	31	Bosnia and Herzegovina	53	Thailand
13	Luxembourg	32	Latvia	54	Albania
14	Switzerland	34	Bulgaria	56	Montenegro
16	Norway	36	Lithuania	58	Tunisia
17	Finland	37	Turkey		
18	Denmark	39	Azerbaijan		

Die Vertragsstaaten, die eine ECE-Regelung anwenden, müssen genehmigte Fahrzeuge und Fahrzeugteile im Rahmen des nationalen Betriebserlaubnis- bzw. Bauartengenehmigungsverfahrens zulassen. Die Übernahme der Regelungen in das nationale Recht ist nach dem Ermessen der Regierungen entweder fakultativ (Anwendung parallel zu bestehenden nationalen Vorschriften nach Wahl des Automobil-Herstellers) oder obligatorisch (ECE-Regelungen ersetzen nationale Vorschriften). Bislang existieren 126 ECE-Regelungen, von denen in Deutschland ein Großteil (ca. zwei Drittel) angewandt wird und die weitgehend gleich lautend mit den EU-Richtlinien übereinstimmen [4].

Basierend auf dem so genannten CARS-21-Prozess, in dem hochrangige Delegationen von Regierungen, Fahrzeugindustrie und der EU-Kommission Ziele und Wege vereinbart haben, um die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Fahrzeugindustrie zu stärken, wurde auch das für die Typprüfung anzuwendende Regelungswerk vereinfacht [5]. Durch Ergänzung der Rahmenrichtlinie 2007/46/EG zum Typgenehmigungsverfahren von Fahrzeugen [6] durch die Verordnung (EG) No 661/2009, der so genannten „General Safety Regulation“, wurden so zahlreiche Richtlinien durch ECE-Regelungen ersetzt [7].

## 6.2.2 Vorschriften in den USA und anderen Staaten

Während in Europa dem Fahrzeugführer ein hohes Maß an Verantwortung auferlegt wurde, sodass der Schwerpunkt gesetzgeberischer Maßnahmen zunächst auf die Vermeidung von Unfällen abzielte, vertraten die Verantwortlichen in den USA die Meinung, dass die Verkehrsteilnehmer, speziell die Fahrzeugführer, nur in geringem Ausmaß erzogen werden können und deshalb die Insassen durch eine geeignete Bauweise des Fahrzeugs vor den Unfallfolgen zu bewahren sind. Erst an zweiter Stelle wurde in den USA auf Maßnahmen zur Unfallvermeidung gesetzt [8].

Die Zunahme der Unfälle mit schwer und tödlich Verletzten erreichten Anfang der 1960er Jahre eine solche Größenordnung, dass die amerikanische Regierung, aufgefordert durch Initiativen mächtiger Verbraucherorganisationen, einschneidende Rahmengesetze erlassen musste, die mit dem im Jahre 1966 beschlossenen Automobil-Sicherheitsgesetz (Motor Vehicle Safety Act) detaillierte Prüfprozeduren für Fahrzeugvorschriften hinsichtlich des Verhaltens von Kraftfahrzeugen im Alltagsbetrieb und bei Unfällen festschrieben. Diese Prüfvorschriften, die unter Punkt 581 des Automobil-Sicherheitsgesetzes im einzelnen beschrieben sind und Anforderungen sowie Bewertungskriterien enthalten, sind in den **Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS)** formuliert und beziehen sich beispielsweise auf den Fahrzeug-Innenraum (FMVSS 201 bis 204 und 207), auf die Insassenschutzsysteme und deren Komponenten (FMVSS 208 bis 210 und 213), auf die Seitenstruktur (FMVSS 214) und auf die Unversehrtheit der Kraftstoffanlage (FMVSS 301). Die Erfüllung dieser Vorschriften werden nicht als Voraussetzung für die Zulassung des Kraftfahrzeugs am öffentlichen Straßenverkehr angesehen, vielmehr wird in den USA das **Prinzip der Selbsteinschätzung** durch die Automobil-Hersteller angewandt, d. h. die Her-

steller überprüfen die Einhaltung der Standards eigenverantwortlich und die Fahrzeuge gelangen, anders als in Europa, ohne Zulassungsverfahren in den Verkehr. Um jedoch sicherzustellen, dass die Vorschriften eingehalten werden, werden in bestimmten Intervallen gezielt Fahrzeuge durch nachgeordnete Regierungsbehörden vom Markt genommen und auf der Basis der Sicherheitsstandards überprüft.

In anderen Staaten wie Australien (ADR), Japan, Kanada (CMVSS) und Saudi Arabien (SAS), deren Sicherheitsgesetze mehr oder weniger stark von den US-Sicherheitsstandards abweichen, wird für die Straßenverkehrszulassung häufig die Erfüllung der US- oder der europäischen Vorschriften als gleichwertig akzeptiert [3].

Große Bedeutung haben zwischenzeitlich die Vorschriften in den so genannten BRIC-Staaten erlangt. Die Märkte in Brasilien, Russland, Indien und China gehören mittlerweile durch ihr großes Wachstum im Hinblick auf neu zugelassene Fahrzeuge für die deutschen Fahrzeughersteller zu den wichtigsten Märkten der Welt. Durch die stark steigenden Fahrzeugbestände und die hierdurch verbundene Zunahme von Verkehrsunfällen werden auch hier fortlaufend Vorschriften zur Fahrzeugsicherheit erlassen.

### 6.2.3 Zusammenfassung der Vorschriften in verschiedenen Ländern

Derzeit werden weltweit zahlreiche Vorschriften überarbeitet und neue vorbereitet. Das in Europa für die Typprüfung geltende Regelungs- und Richtlinienwerk wurde durch die Rahmenrichtlinie vereinfacht und reduziert.

**Tab. 6.2** Unterzeichnerstaaten des 1998er-Abkommens, Globale Technische Regelungen GTR (Stand Mai 2012)

Since	Country	Since	Country
25.08.00	Canada	26.01.02	New Zealand
25.08.00	United States of America	05.03.02	Netherlands
25.08.00	Japan	14.06.02	Azerbaijan
25.08.00	France	22.06.02	Spain
25.08.00	United Kingdom	24.06.02	Romania
25.08.00	Germany	01.03.02	Sweden
25.08.00	Russian Federation	29.11.04	Norway
25.08.00	European Union	11.06.05	Cyprus
09.12.00	P.R. China	15.11.05	Luxembourg
01.01.01	Republic of Korea	04.04.06	Malaysia
30.01.01	Italy	22.04.06	India
17.06.01	South Africa	25.07.06	Lithuania
07.08.01	Finland	17.03.07	Moldova
21.08.01	Hungary	01.01.08	Tunisia
01.09.01	Turkey	07.06.08	Australia
06.01.02	Slovakia		

Im Rahmen des so genannten 1998-Abkommens sollen Vorschriften und Testverfahren soweit möglich weltweit durch Globale Technische Regelungen (GTR) harmonisiert werden; die Unterzeichnerstaaten sind in Tab. 6.2 aufgelistet. Derzeit sind elf GTRs in das Globale Register bei den Vereinten Nationen eingetragen, von denen drei dem Bereich passive Sicherheit zuzuordnen sind: GTR Nr. 1 zu Türen und Schließern, GTR Nr. 7 zu Kopfstützen und GTR Nr. 9 zum Fußgängerschutz. Derzeit wird an einer GTR zum Insassenschutz bei Seitenanprall gearbeitet und die GTRs Nr. 7 und 9 werden in einer zweiten Phase überarbeitet.

Im so genannten „Blue Book“ der UNECE wird beschrieben, wie das Weltforum zur Harmonisierung von Fahrzeugregelungen (WP 29) aufgebaut ist und wie internationale Regelungen nach dem 1958er- (ECE-Regelungen) und 1998er-Abkommen (GTRs) zustande kommen [9].

Die nachfolgenden Tab. 6.3 und 6.4 geben, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, einen Überblick über die derzeit geltenden gesetzlichen Vorschriften zur inneren und äußeren Sicherheit von Kraftfahrzeugen in verschiedenen Ländern und Staatengruppen und beschreiben die wesentlichen Anforderungen und Merkmale dieser Prüfvorschriften.

Aufgrund der nicht unerheblichen Unterschiede zwischen den ECE-Regelungen und der FMVSS hinsichtlich der Aufprallversuche zu Frontal- und Seitenkollisionen, soll auf diese näher eingegangen werden. Die Verschiedenheit bezieht sich sowohl auf die Versuchsanordnung als auch auf die einzuhaltenden Prüfkriterien.

Bei den **Crash-Versuchen zur Frontalkollision** nach der Regelung ECE-R 94 erfolgt der Aufprallversuch mit einer Geschwindigkeit von  $v = 56 \text{ km/h}$  gegen eine deformierbare Barriere mit einer fahrerseitigen Überdeckung (Offset) von 40 %. Die Prüfkriterien werden an je einem HYBRID-III-Dummy auf Fahrer- und Beifahrersitz gemessen. Die Schutzkriterien beziehen sich auf den Kopf (HIC = 1.000), die Brust (Eindrückung  $s = 75 \text{ mm}$ ), die Oberschenkel (Längskraft  $F = 10 \text{ kN}$ ) sowie – seit der Umsetzung der zweiten Stufe im Oktober 2004 – zusätzlich auf die Körperteile Hals, Knie und Schienbein (Tibia). Zudem werden die Lenkradverschiebung und die Neigung der Lenksäule gemessen.

Bei der Überprüfung nach dem FMVSS 208 prallt der PKW mit einer Geschwindigkeit von 30 mph (48 bis 53 km/h) gegen die starre Barriere, die einen Aufprallwinkel von  $0^\circ$  aufweist oder im Bereich von  $\pm 30^\circ$  schräg zur Fahrtrichtung angestellt sein kann. Die Messung der Belastungsgrößen erfolgt an je einem fahrer- und beifahrerseitig eingesetzten HYBRID-III-Dummy, und zwar am Kopf (HIC = 1.000), an der Brust ( $3 \text{ ms}$ -Beschleunigung  $a_{3\text{ms}} = 60 \text{ g}$ , Eindrückung  $s = 50,8 \text{ bzw. } 76,2 \text{ mm}$ ) und an den Oberschenkeln (Längskraft  $F = 10 \text{ kN}$ ). Während der seit längerem eingeführte US-Standard eine härtere Bedingung für die Insassenschutz-Systeme und den Überlebensraum darstellt, zielt die unfallrealistischere ECE-Regelung, insbesondere seit Einführung der zweiten Stufe, auf die Struktursicherheit und die Insassenbelastung ab.

Die **Crash-Versuche zur Seitenkollision**, vergleichend dargestellt in Abb. 6.5, sind nach der Regelung ECE-R 95 einerseits gekennzeichnet durch den rechtwinkligen Aufprall eines Schlittens mit deformierbarer Barriere auf den stehenden, zu überprüfenden PKW mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h. Nach dem FMVSS 214 bewegt sich hingegen ein schräg

**Tab. 6.3** Gesetzliche Vorschriften und Standards zur inneren Sicherheit in verschiedenen Ländern

Land	Vorschrift	Anforderungen und Merkmale zur inneren Sicherheit
Sicherheitsmaßnahmen am und im Gesamtfahrzeug		
Europa	ECE-R 94	Frontalaufprall auf deformierbare 0°-Barriere mit 40 %-iger Überdeckung auf der Fahrerseite bei 56 km/h; Messung an zwei Dummies HYBRID III fahrer- und beifahrerseitig, Kriterien für Kopf, Hals, Thorax, Oberschenkel und Knie; Lenkrad-Verschiebung und Drehung der Lenksäule.
	ECE-R 95	Seitenaufprall mit beweglicher, deformierbarer Barriere (Höhe 300 mm), bei 50 km/h; Messung an einem Dummy EuroSID (SID: Side impact dummy) fahrerseitig, Kriterien für Kopf, Brust (VC-Kriterium und Eindrückung) und Abdomen (innere, äußere und Symphyse-Kraft).
USA/CDN	FMVSS 208	Frontalaufprall gegen starre Barriere $0 \pm 30^\circ$ bei 30 mph ( $\approx 48 \dots 53$ km/h); Messungen an zwei Dummies HYBRID III fahrer- und beifahrerseitig, Kriterien für Kopf, Brust (Beschleunigung und Eindrückung) und an Oberschenkeln.
		Heckaufprall mit beweglicher, starrer Barriere bei 48... 53 km/h; Messung wie beim Frontalaufprall.
		Tests in so genannten "Out of Position"-Situationen
USA/CDN	FMVSS 214	Seitenaufprall mit beweglicher, deformierbarer Barriere, bewegt im Krebsgang unter $27^\circ$ , bei 54 km/h gegen Fahrertür des stehenden Fahrzeugs; Messungen mit zwei Dummies (US-SID) auf Fahrersitz und im Fond stoßseitig, Kriterien für Brust (TTI, unterschiedlich für 2- und 4-türige Fahrzeuge) und Becken (Querbeschleunigung). Alternativ kann auch der ES-2RE Dummy eingesetzt werden.
Dacheindrückschutz		
USA/CDN Saudi Arabien	FMVSS 216 SAS 266/267	Verformungswiderstand der vorderen Dachecken gegen statischen Druck eines Prüfstempels. Kabriolett braucht diese Forderung für USA/CDN nicht zu erfüllen.
Seitenstruktur- und Seitentürfestigkeit		
Europa	ECE-R 95	Siehe unter „Sicherheitsmaßnahmen am und im Gesamtfahrzeug“.
USA/CDN	FMVSS 214	Dynamische Prüfung der Seitenstruktur von PKW mit einer schrägwinklig bewegten, deformierbaren Barriere. Fahrzeug mit zwei speziellen Testpuppen US-SID (Side Impact Dummy - SID) besetzt.
USA/CDN	FMVSS 214 a	Mindestanforderungen bezüglich Mindest-, Anfangs-, Zwischen- und Spitzen-Verformungswiderstand bei statischer Prüfung mit zylindrischen Prüfstempel; Alternativ-Anforderung bei Prüfung mit eingebauten Sitzen.
Australien	ADR 29	Wie FMVSS 214a, jedoch ohne Alternativ-Anforderung.
Saudi Arabien	SAS 265/267	Wie FMVSS 214a, jedoch nur Spitzenverformungswiderstand (31.150N) gefordert.

**Tab. 6.3** (Fortsetzung)

Türschlösser und -scharniere		
Europa	ECE-R 11 EWG 70/387 FMVSS 206	Definierte Schlossfestigkeit in Längs- und Querrichtung bei Halb- und Vollschließstellung; Trägheitsanalyse; definierte Scharnierfestigkeit in Längs- und Querrichtung.
USA/CDN	ADR 2	
Australien	38	
Japan	111	
Schweden		
Europa	ECE-R 32 u. 33	Erhalt der Schließung während Frontal- (48... 53 km/h) und Heckaufprall (35... 38 km/h) gegen Barriere bzw. mit Rollbock; nach Aufprall muss definierte Anzahl von Türen zu öffnen sein.
Japan	25	Allgemeine Anforderungen an Türen.
Schweiz	26, Anh. 6	Wie StVZO, jedoch ohne Geräuschanforderung.
International	GTR Nr. 1	Türverriegelung und deren Beibehaltung
Lenksäulen-Rückverlagerung		
Europa	ECE-R 12 EWG 74/297	Max. zulässige Verschiebung (127 mm) bei Frontalaufprall (48... 53 km/h).
USA/CDN	FMVSS 204	
Australien	ADR 10 b	
Schweden	107	
Saudi Arabien	SAS 263/81 und 267/81	
Windschutzscheiben-Befestigung		
USA/CDN	FMVSS 212	Mindest-Prozentsatz (abhängig vom Rückhaltesystem) des im Rahmen verbleibenden Scheibenanteils nach Frontalaufprall (48... 53 km/h).
Windschutzscheiben-Eindringung		
USA/CDN	FMVSS 219	Unversehrtheit einer definierten Zone vor der Frontscheibe nach Frontalaufprall (48... 53 km/h).
Armaturentafelgestaltung und -anprall		
Europa	ECE-R 21 EWG 74/60	Insassenschutz vor scharfen Kanten und vorspringenden Ecken durch Mindestradien und energieabsorbierende Materialien.
Schweden	108	
Europa	ECE-R 33	Definierte Mindest-Innenraummaße nach Frontalaufprall (48... 53 km/h).
USA/CDN	FMVSS 201	Energieaufnahmefähigkeit der Armaturentafel (Kopfform-Anprall 24 km/h) und der Armlehnen in der Türverkleidung; Behälterdeckel im Innenraum müssen bei Fahrzeulgangs- und -querbeschleunigung geschlossen bleiben.
Japan	34	
Australien	ADR 21	Wie FMVSS 201, jedoch keine Anforderungen an Armlehnen.
USA/CDN	FMVSS 208	Bei Verwendung passiver Rückhaltesysteme: Schutzkriterien mit max. zul. Belastungswerten an Kopf, Brust und Oberschenkel nach Frontalaufprall (48... 53 km/h) mit 0 bis 30° Barriere-Winkel, Seitenauftprall (32 km/h) und Überschlag (48... 53 km/h).
Japan	20	Allgemeine Anforderungen an Elemente im Fahrzeuginnenraum.

**Tab. 6.3** (Fortsetzung)

Lenkradgestaltung und -anprall		
Europa	ECE -R 12 EWG 74/297	Max. zul. Kraft auf Torsoblock nach definiertem Anprall (24 km/h).
Australien	ADR 10 b	
Schweden	107	
Japan	27	
USA/CDN	FMVSS 203	Wie ECE-R 12; Ausnahme: Fahrzeuge mit passiven Rückhaltesystemen (andere als Gurtsystem); sie müssen FMVSS 208 erfüllen.
Sonnenblendengestaltung und -anprall		
Europa	ECE -R 21 EWG 74/60	Insassenschutz vor scharfen Kanten und vorspringenden Ecken durch Mindestradien und energieabsorbierende Materialien.
Schweden	108	
USA/CDN	FMVSS 201	Energieabsorbierende Strukturen; Mindestradien bei Befestigungen, die im Bereich der Kopfform liegen.
Australien	ADR 11	Wie ECE-R 21.
Japan	40	Energieabsorbierende Strukturen, keine scharfkantigen innere Teile (Handballentest); Mindestradien bei Blendenbefestigungen, die im Bereich der Kopfform liegen.
Sitze und Sitzlehnhen		
Europa	ECE-R 16	Ausführung, Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Auslöse- und Verstellkräfte.
	ECE-R 17	Definierte Anforderungen an Sitzverankerung und Festigkeit der Sitzlehnenverriegelung.
Schweden	110	
Europa	ECE-R 44	Dynamische und statische Prüfung von Kinderrückhaltesystemen.
	ECE-R 21	Insassenschutz vor scharfen Kanten und vorspringenden Ecken durch Mindestradien und energieabsorbierende Materialien.
	EWG 74/60 u.	Wie ECE-R 21 sowie Befestigung, Einstelleinrichtungen und Festigkeit in Längsrichtung.
	EWG 74/408	Energieabsorbierende Strukturen, keine scharfkantigen innere Teile (Handballentest); Mindestradien.
USA/CDN	FMVSS 201	Energieaufnahmefähigkeit der vorderen Sitzlehnen durch statische und dynamische Prüfungen.
Japan	36	
USA/CDN	FMVSS 207	Wie EWG 74/408, jedoch geringere Kräfte.
Australien	ADR 3 a	
Japan	35	
	21	Mindestabmessungen des Fahrersitzes und dessen Positionierung.
	22	Mindestabmessungen sonstiger Sitze (außer Fahrersitz).
Schweiz	24	Allgemeine Anforderungen.
Italien		Bei Taxi-Fahrzeugen muss hintere Sitzbreite 450 mm je Sitz betragen.

**Tab. 6.3** (Fortsetzung)

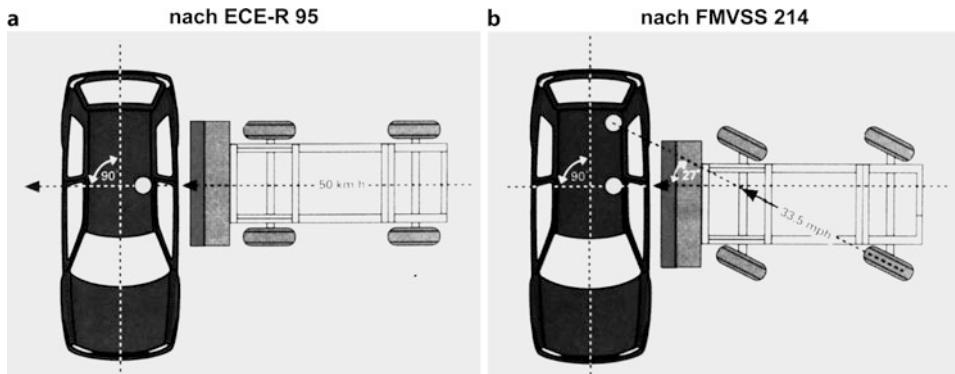
Kopfstützen		
Europa	ECE-R 25 EWG 78/932	Festigkeit durch statische und dynamische Prüfungen; Form, äußere Gestaltung und geometrische Abmessungen: Mindestbreite 170 mm, Mindesthöhe über Sitzbezugspunkt 700 mm.
USA/CDN	FMVSS 202 a	Begrenzung des Einschubweges, definierte Mindestanprallfläche, geometrische Anforderungen an Abstand Kopf zur Kopfstütze.
Japan	32	Dynamischer Test mit Hybrid III möglich.
Australien	ADR 22 a	
Japan	32	Härteprüfung durch Handballentest.
International	GTR Nr. 7	Harmonisierte Anforderungen an Kopfstützen. Dynamischer Test nach Wahl der Vertragsstaaten mit Hybrid III (wie FMVSS 202a).
Sicherheitsgurte, Rückhaltesysteme		
Europa	ECE-R 14 (EWG 76/115)  ECE-R 44  ECE-R 16 (EWG 77/541)	Lage und Festigkeit der Gurtverankerungspunkte.  Kinderrückhaltesysteme, statische und dynamische Prüfungen.  Ausführung, Festigkeit mittels statischer Prüfung, Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse, Abmessungen, Auslöse- und Verstellkräfte, Gurtkennzeichnung, Abriebfestigkeit, Einbau und Handhabung.
USA/CDN	FMVSS 208	Festigkeit mittels dynamischer Prüfung; passive Rückhaltesysteme; Kontrollleuchte „Fasten seat belt“, Warnsummer; Zweipunktgurt für Cabriolett zulässig.
USA/CDN Japan Schweiz	FMVSS 209 31 23 / 3	Ausführung, Festigkeit mittels statischer Prüfung, Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse, Abmessungen, Auslöse- und Verstellkräfte, Gurtkennzeichnung, Abriebfestigkeit.
USA/CDN Japan	FMVSS 210 37	Lage und Festigkeit der Gurtverankerungspunkte, in Kanada (CDN) auch Lage und Festigkeit der Gurtverankerungspunkte für Kinderrückhaltesysteme (210.1). Statische und dynamische Prüfungen an Kinderrückhaltesystemen (in Kanada 213).
Australien	ADR 4 d  ADR 5 b  ADR 34 a	Gurtfestigkeit mittels statischer und dynamischer Prüfung, Gurtgeometrie, Dreipunktgurt für alle äußeren Sitzplätze.  Lage und statische Festigkeit der Gurtverankerungspunkte.  Lage, statische Festigkeit und Zugänglichkeit der Verankerungspunkte für Kinderrückhaltesysteme.
Japan	22.3	Dreipunktgurte für Frontsitze; Festigkeitsanforderungen.
Schweden	109	Dreipunktgurte für äußere, Beckengurte für mittlere Sitzplätze, ansonsten wie ECE-R 14 und 16.
Schweiz	23 / 3	Dreipunktgurte für Frontsitze, ansonsten wie ECE-R 14 und 16.
Saudi Arabien	SAS 297/82	Warneinrichtung bei nicht eingerastetem Fahrersitzgurtschloss.
Brennbarkeit von Innenraum-Materialien		
Deutschland USA/CDN	StVZO 30 FMVSS 302	Allgemeine Anforderungen an Insassenschutz. Definierte Schwerbrennbarkeitsanforderungen für bestimmte Materialien des Fahrgastrumes.

**Tab. 6.4** Gesetzliche Vorschriften und Standards zur äußereren Sicherheit in verschiedenen Ländern

Land	Vorschrift	Anforderungen und Merkmale zur äußeren Sicherheit
Fahrzeug-Außenform		
Deutschland	StVZO 32	Lage, Anbringung und Beschaffenheit von äußeren Fahrzeugteilen.
Europa	ECE-R 26	Mindestradien für berührbare Kanten zwischen Bodenlinie und einer Höhe von 2 m; max. Widerstandskräfte bei aufgesetzten Verzierungen; Sondervorschriften für Zierleisten.
Schweden	EWG 74/483 117	
Europa	78/2009/EG	Anforderungen an das Schutzzpotential vor und im Falle einer Kollision von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern mit einem PKW. Komponententests mit Kopf-, Bein- und Hüftprüfkörpern auf die Fahrzeugfront im Bereich der Motorhaube und des Stoßfängers.
Europa	78/2009/EG	Frontschutzbügel; Komponententests mit Kopf-, Bein- und Hüftprüfkörpern auf den Frontschutzbügel und ggf. das Fahrzeug
Schweiz	26, Anhang 6	Besondere Anforderungen an äußere Fahrzeugteile mit Vorsprungsmaß über und unter 30 mm.
International	GTR Nr. 9	Harmonisierte Anforderungen an den Fußgängerschutz auf Basis von Komponententests.
Radabdeckungen		
Deutschland	StVZO 36 a	Definierte Abdeckungsbereiche (Lauffläche) nach vorne und hinten.
Europa	EWG 78/549	Mindestgröße der Abdeckungsbereiche (Reifenbreite) nach vorne (weniger als StVZO) und hinten; Verhinderung der direkten Berührungsmöglichkeit und des Aufwirbelns fester oder flüssiger Bestandteile durch Räder.
Schweden	19 und 146	Wie EWG 78/549, Abmessungen evtl. erforderlicher Schmutzklappen.
Schweiz	22 / 5	Definierte Abdeckungsbereiche.
Radmuttern, -zierringe und -kappen		
Deutschland	StVZO 32	Allgemeine Anforderungen an Radbefestigung.
Europa	ECE-R 26	Wie EWG 74/483 bei „Fahrzeug-Außenform“.
USA/CDN	FMVSS 211	Keine hervorstehenden Teile.
Schweiz	26, Anhang 6	Wie EWG 74/483 bei „Fahrzeug-Außenform“
Kraftstoff-Versorgungsanlage		
Europa	ECE-R 32, 33 und 34	Allgemeine Bauvorschrift; hydraulische Druckprüfung des Kraftstoffbehälters; Anforderungen an Kunststofftanks; dynamische Dichtigkeitsprüfung; definierte max. Leckmenge nach Frontalaufprall (48 ... 53 km/h) und Heckaufprall (35... 38 km/h) mit Pendel oder Barriere.
	EWG 70/221	Korrosionsbeständigkeit, Dichtigkeitsprüfung (Anforderungen wie StVZO 45), Entlüftungsmöglichkeit; Einbaugestaltung des Kraftstofftanks; Anforderung an den Unterfahrschutz

**Tab. 6.4** (Fortsetzung)

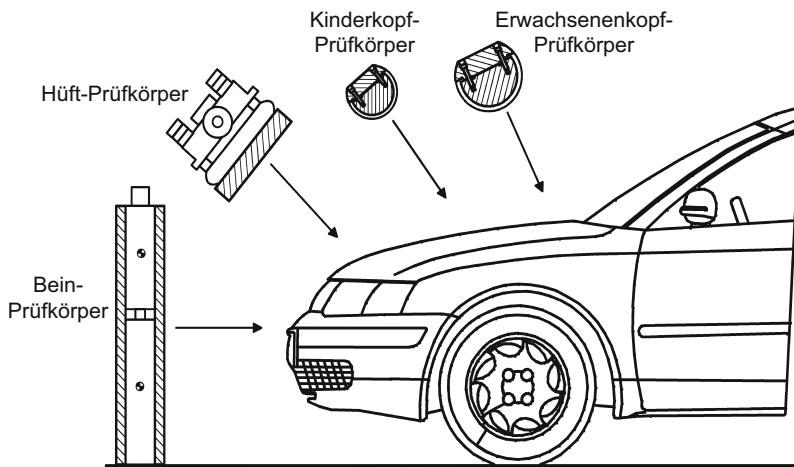
USA/CDN	FMVSS 301	Bei $0 \pm 30^\circ$ -Front- (48 km/h), Heck- (48 km/h) und Seitenauftprall (32 km/h) Prüfung der max. Leckmenge/min mit Hilfe einer statischen Fahrzeug-Drehvorrichtung.
Kanada	CMVSS 301.1	Anforderungen an Fahrzeuge, die LPG (liquefied petroleum gas) als Energiequelle für Antrieb verwenden: definierte Installationsvorschriften, kein Austreten von Gas, kein Druckabfall zulässig.
	CMVSS 301.2	Anforderungen an Fahrzeuge, die CNG (compressed natural gas) als Energiequelle für Antrieb verwenden: wie CMVSS 301.1, zusätzlich muss der Kraftstoffbehälter einem Druck von ca. 20 bar standhalten.
Japan	15	Einfüllstutzen mind. 300 mm vom Auspuff und 200 mm von elektrischen Schaltern entfernt.
	33	Bei $0^\circ$ -Frontauftprall ( $50 \pm 2$ km/h) Prüfung der max. Leckmenge/min mit Hilfe einer statischen Fahrzeug-Drehvorrichtung.
Schweden	113 131	Bei $0^\circ$ -Frontauftprall (48 km/h) Prüfung der max. Leckmenge/min (ohne statische Fahrzeug-Drehvorrichtung); Behälter aus Kunststoff nur unter bestimmten Voraussetzungen zulässig.
Schweiz	19	Allgemeine Dichtigkeitsanforderungen; keine Verwendung von leicht entflammbarer Material; Kraftstoffzufuhr-Unterbrechung bei abgestelltem Motor.
Saudi Arabien	SAS 264/267	Ähnlich FMVSS 301, jedoch ohne statische Fahrzeug-Drehvorrichtung.
<b>Haubenverschluss</b>		
USA/CDN	FMVSS 113	Hinten angeschlagene Fronthauben müssen eine zweite Raste im Verschluss oder einen zweiten Verschluss aufweisen.
<b>Stoßfänger</b>		
Deutschland Schweiz	StVZO 32 Anhang 6	26, Form und Anbau.
Europa	ECE-R 42	Erhalt der Verkehrs- und Betriebssicherheit nach mittigem Längs- (4 km/h) und Eckaufschlag (2,5 km/h) mittels Prüfpendel.
	2003/102/EC	Anforderungen an den Schutz von Fußgängern. Prüfung mit einem Beinprüfkörper bei 40 km/h bzw. bei Fahrzeugen mit höher montiertem Stoßfänger Prüfung mit einem Hüftimpaktor.
USA	Part 581	Erhalt der Verkehrs- und Betriebssicherheit nach mittigem Längs- (4 km/h) und Eckaufschlag (2,5 km/h) mittels Prüfpendel sowie Barrieraufprall (4 km/h) in Längsrichtung; Beschädigung am Stoßfänger sowie der Befestigungselemente zulässig.
CDN	CMVSS 215	Erhalt der Verkehrs- und Betriebssicherheit nach mittigem Längs- (8 km/h) und Eckaufschlag (4,8 km/h) mittels Prüfpendel sowie Barrieraufprall (8 km/h) in Längsrichtung; Beschädigung am Stoßfänger, an den Befestigungselementen und an der Karosserie zulässig.
Saudi Arabien	SAS 273/82	Wie ECE-R 42, jedoch kein Reparieren oder Austauschen der Stoßfänger während des Tests zulässig.



**Abb. 6.5** Vergleich der Versuchskonstellationen zu Seitenkollisionen für Europa (a) und für USA (b)

laufender Schlitten (crabbed barrier), ebenfalls ausgestattet mit einer deformierbaren Barriere, gegen den unter 27° schräg gestellten, stehenden PKW mit einer Geschwindigkeit von 33,5 mph (~54 km/h). Der Schräglauf soll die im Unfall zu beobachtende Eigenbewegung des gestoßenen PKW, der im Versuch stillsteht, nachbilden. Die Schutzkriterien bei der ECE-Regelung werden am stoßseitig sitzenden Seiten-Dummy (EuroSID 2) ermittelt und umfassen den Kopf (HPC = 1.000), den Thorax (VC = 1 m/s, Rippeneindrückung  $s = 42$  mm), den Abdominalbereich („innere“ Kraft  $F_i = 2,5$  kN, „äußere“ Kraft  $F_a = 4,5$  kN) und das Becken (Symphyse-Kraft  $F_S = 6,0$  kN). Nach dem US-Standard erfolgen die Messungen der Belastungsgrößen an zwei stoßseitig auf dem Fahrersitz und im Fond untergebrachten, speziellen Seiten-Dummys (US-SID), sie beziehen sich lediglich auf Brust (TTI = 90 bzw. 85 g) und Becken (max. Beschleunigung  $a_{\max} = 130$  g). Die verwendeten Schutzkriterien sind in Tab. 3.5 zusammenfassend dargestellt.

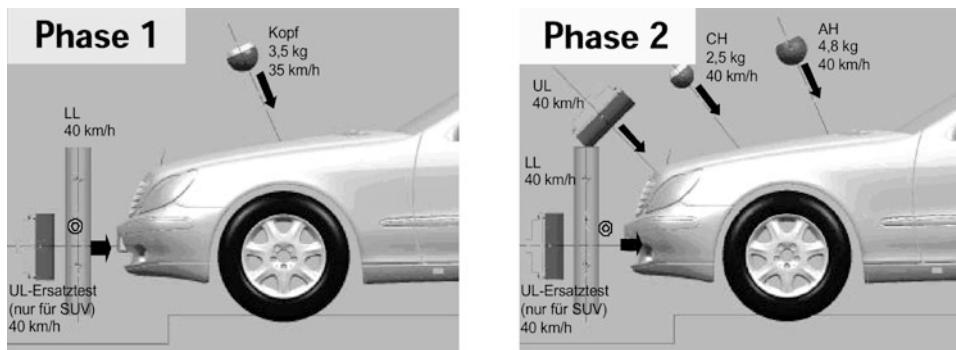
**Prüfverfahren zum Fußgängerschutz** wurden in Europa bereits Anfang der 1980er Jahre entwickelt. Basierte einer der ersten Vorschläge noch auf der Durchführung von Tests mit Dummys, wurde schnell erkannt, dass mit einem derartigen Testverfahren z. B. nur eine Unfallkonfiguration eines Fußgängers einer bestimmten Körpergröße (Anthropometrie) nachgebildet werden kann. Der Ablauf eines Fußgängerunfalls mit einem PKW ist jedoch überaus komplex und die potentiellen Aufprallbereiche sind auch unter Berücksichtigung verschiedener Körpergrößen und Anstoßkonfigurationen vielfältig. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden durch die Arbeitsgruppen WG (Working group) 7, 10 und 17 des EEVC (European Enhanced Vehicle Safety Committee) Komponententests entwickelt, mit deren Hilfe die Fahrzeugfront im Hinblick auf ihr Schutspotential untersucht werden sollte. Aus diesen Arbeitsgruppen heraus wurden verschiedene Testvorschläge entwickelt. Der letzte Testvorschlag wurde von der EEVC WG 17 im Jahr 1998 vorgelegt und 2002 nochmals aktualisiert [10]. Er findet sich in weitgehender Übereinstimmung wieder in der später noch näher zu beschreibenden, der so genannten Phase 2 der Richtlinie 2003/102/EC. Die verwendeten, neu entwickelten Impaktoren werden eingesetzt, um die Stoßbelastung bei



**Abb. 6.6** Impaktoren für Fußgängerschutz nach EEVC WG 17

Unfällen auf den Kopf, das Becken und die unteren Extremitäten nachzubilden (Abb. 6.6). Das Prüfverfahren für die Haubenfläche beschreibt einen schrägwinkligen Kopfanprall mit einem Kinder- oder Erwachsenen-Kopf-Impaktor im Freiflug, die Geschwindigkeit beträgt dabei 40 km/h. Als Bewertungskriterium wird das Kopfschutzkriterium HPC = 1.000 angewandt [11], das nach der Berechnungsvorschrift für das Schutzkriterium des Kopfes HIC (Head injury criterion, vgl. Gl. 3.4) ermittelt wird. Die Überprüfung der Haubenvorderkante erfolgt an drei Punkten, an denen der Impaktor in Abhängigkeit von der Geometrie des Vorderwagens mit einer Geschwindigkeit von 20 bis 40 km/h anprallt. Die Anprallrichtung und die Masse des Impaktors sind ebenfalls von der Vorbaugeometrie abhängig und lassen sich aus einem Diagramm ablesen. Bewertungskriterien sind die am Impaktor gemessene Scherkraft ( $F = 4 \text{ kN}$ ) und das Biegemoment ( $M = 220 \text{ Nm}$ ). Beim Prüfverfahren für Stoßfänger wird die Messung ebenfalls an drei Stellen (mittig und außen) durchgeführt. Der dabei verwendete Impaktor entspricht dem Bein eines Erwachsenen (50 %-Dummy), an dem sich Scherkräfte und Biegemomente ermitteln lassen. Er wird frei fliegend mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h gegen die Prüfstellen des vorderen Stoßfängers katapultiert. Als Prüfkriterien werden der Knie-Winkel ( $\varphi_{\text{Knie}} = 15^\circ$ ), der Knie-Scherweg ( $\tau_{\text{Knie}} = 6 \text{ mm}$ ) und die Unterschenkelbeschleunigung ( $a_{\text{Tibia}} = 150 \text{ g}$ ) gemessen [3].

Zur Verbesserung der **Sicherheit von äußerem, ungeschützten Verkehrsteilnehmern**, z. B. von Radfahrern im Falle einer Kollision mit einem Kraftfahrzeug, sollten die Versuchsanforderungen nach Richtlinie 2003/102/EC weiter verschärft werden. Diese Richtlinie trat mit Veröffentlichung im Amtsblatt der EU Ende Dezember 2003 nach langwieriger und kontroverser Diskussion in Kraft und sah zwei Phasen vor. Nach Phase 1 mussten alle nach dem 1.10.2005 typgeprüften neuen Fahrzeugmodelle die in der linken Darstellung in Abb. 6.7 gezeigten Schutzkriterien bei Komponentenversuchen erfüllen. Getestet



Kopf: 3,5 kg, 35 km/h.  
HIC 1.000 (2/3 d. Fläche)  
HIC 2.000 (1/3 d. Fläche)  
1.000 bis 2.100 mm auf Haube,  
50° (WSS: nur messen, 35 km/h,  
4,8 kg, 35°).

Bein (LL): 40 km/h; 200 g, 21°, 6 mm.

Hüfte (UL): auf BLE nur messen.

Hüfte (UL): SUV, Stoßfänger 7,5 kN.

Kopf – Kind (CH), Erwachsener (AH):  
2,5/4,8 kg, 40 km/h.  
HIC 1.000 (ganze Fläche)  
1.000 bis 1.500 mm bzw. 1.500  
bis 2100 auf Haube, 50° bzw.  
65°.

Bein (LL): 40 km/h; 150 g, 21°, 6 mm.

Hüfte (UL): auf BLE 5 kN, 300 Nm.

Hüfte (UL): SUV, Stoßfänger 5 kN, 300 Nm  
oder entspr. Maßnahmen !

**Abb. 6.7** Phasen 1 und 2 der Richtlinie 2003/102/EC

wird hierbei mit einem frei fliegenden Kopf-Prüfkörper (Masse  $m = 3,5 \text{ kg}$ , Durchmesser  $d = 165 \text{ mm}$ , so genannte Child/Adult-Headform) unter einer Anprallgeschwindigkeit von 35 km/h ein definierter Bereich der Motorhaube. Ebenfalls dürfen bei Tests mit einem Bein-Prüfkörper (beim so genannten TRL-Impaktor) bei 40 km/h im Bereich des vorderen Stoßfängers die Schutzkriterien für die Beinbeschleunigung sowie für die Biegewinkel und die Scherung im Bereich des Kniegelenkes nicht überschritten werden. Bei Fahrzeugen mit höher angebrachten Stoßfängern (z. B. SUV) können die Stoßfänger mit einem geführten Hüft-Prüfkörper ebenfalls bei 40 km/h getestet werden. Ein Hüft-Anpralltest im Bereich der Motorhaubenvorderkante und Versuche im Windschutzscheibenbereich wurden in Phase 1 nur zu Monitoring-Zwecken durchgeführt.

In Phase 2 nach der Richtlinie 2003/102/EC wurde ab 2010 bzw. 2015 eine deutliche Erhöhung der Anforderungen, d. h. eine Herabsetzung der Schutzkriterien-Level vorgesehen (rechte Darstellung in Abb. 6.7): Diese Testanforderungen basieren auf den oben beschriebenen Empfehlungen der EEVC-Arbeitsgruppe WG 17. In Artikel 5 der EC-Richtlinie wurde eine Machbarkeitsstudie festgeschrieben, in der die technische Durchführbarkeit der für Phase 2 vorgeschlagenen Anforderungen bis Mitte 2004 untersucht wurden. Diese und andere Studien kamen zu dem wesentlichen Ergebnis, dass die Anforderungen derzeit technisch nur unvollständig oder nur mit sehr hohem, volkswirtschaftlich nicht vertretbarem

Aufwand umsetzbar sind. Daher erarbeitete die EU-Kommission einen neuen Vorschlag für eine Verordnung, die die Phase 2 ersetzt. Diese neue Verordnung (EG) No 78/2009 wurde im Januar 2009 vom europäischen Parlament verabschiedet und trat mit Veröffentlichung im Amtsblatt der EU am 4.2.2009 in Kraft. Die zugehörigen technischen Anforderungen sind in der Verordnung (EG) No 631/2009 festgelegt und wurden am 25.07.09 im Amtsblatt der EU veröffentlicht. Neben Anforderungen an die passive Sicherheit, die auf denen von Phase 1 der Richtlinie 2003/102/EC aufbauen, werden zudem Komponenten aus dem Bereich der aktiven Sicherheit, wie Bremsassistent, vorgeschrieben werden, um den Schutz von Fußgängern und von anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern vor und während einer Kollision zu verbessern. Darüber hinaus sieht die Verordnung vor, dass in naher Zukunft wirksame, Kollisionen vermeidende Systeme eingesetzt werden sollen, sodass sich die Anforderungen an die passive Sicherheit reduzieren lassen oder gar entfallen können.

Zusätzlich wurde die Richtlinie 2005/66/EG zum **Testen von Frontschutzbügeln**, den so genannten „Bull Bars“, durch Anforderungen in der Verordnung (EG) No 78/2009 ersetzt. Dies hat zur Folge, dass Frontschutzbügel nicht mehr starr ausgeführt werden dürfen. Damit kann das Verletzungsrisiko im Falle einer Kollision zwischen einem Fußgänger oder anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern mit einem Fahrzeug, das mit einem Frontschutzbügel ausgerüstet ist, reduziert werden. Diese Versuche werden ebenfalls mit den oben beschriebenen Impaktoren durchgeführt.

Bisher wurden lediglich die gesetzlichen Anforderungen im und am Kraftfahrzeug dargestellt. Es darf jedoch nicht unerwähnt bleiben, dass für **Fahrer motorisierter Zweiräder** ebenfalls eine Gesetzesvorschrift existiert, die den Schutz des Kopfes sicherstellen soll. Die Regelung ECE-R 22 beschreibt ein Verfahren zur Überprüfung der Festigkeit und Stoßdämpfung von Schutzhelmen, bei dem Fallversuche mit behelmten Dummy-Köpfen mit Hilfe eines Helmprüfstandes durchgeführt werden. Als Kriterium wird die resultierende Kopfbeschleunigung gemessen, die weder im Maximalwert von  $a_{\max} = 300 \text{ g}$  noch im 5 ms-Wert von  $a_{5 \text{ ms}} = 150 \text{ g}$  überschritten werden darf. Verglichen mit dem Kopf-Schutzkriterium, beispielsweise nach FMVSS 208 ( $a_{3 \text{ ms}} = 80 \text{ g}$ ), liegen hierbei die Kriterien erheblich höher, da durch den Helm eine großflächige Krafteinleitung gewährleistet ist und damit ein geringeres Verletzungsrisiko angenommen werden kann [12].

#### 6.2.4 Künftige Vorschriften zur passiven Sicherheit

Die Verbesserung der passiven Sicherheit von Kraftfahrzeugen nahm in den letzten Jahrzehnten einen bevorzugten Platz in der Fahrzeugentwicklung ein, sie stand und steht aber auch weiterhin im Mittelpunkt des Interesses des Fachpublikums und breiter Käuferschichten. Zur Weiterentwicklung des Frontalaufpralls kamen in den letzten Jahren entscheidende Impulse zur Erhöhung der Sicherheit bei Seitenkollisionen, insbesondere durch die seriennäßige Einführung des Seiten-Airbags für Kopf- und Thorax-Bereich, hinzu. Dies

kann auch bei der Weiterentwicklung der gesetzlichen Vorschriften und Standards abgelesen werden. Beobachtet man aufmerksam die Diskussion in den entsprechenden Sicherheitsarbeitskreisen und Working Groups, so darf davon ausgegangen werden, dass weitere Prüfvorschriften und Bewertungskriterien etabliert werden, um dem Stand der technischen Entwicklung nachzukommen. Im Folgenden soll in der gebotenen Kürze auf die zu erwartende Entwicklung eingegangen werden.

Mit der Einführung der gesetzlichen Vorschriften für Frontal- und für Seitenkollisionen wurden Mindeststandards geschaffen. Infolge des technischen Fortschrittes und der sich ändernden Fahrzeugpopulationen, z. B. Zunahme der Fahrzeugmasse und stärkere Verbreitung neuerer Fahrzeugkonzepte wie geländegängige PKW (SUV: Sports utility vehicle) und Großraumlimousinen, aber auch der zunehmenden Steifigkeit der Fahrzeuge ändert sich das Unfallgeschehen. So wie durch die weite Verbreitung des Front-Airbags die Zahl der schweren und häufig tödlichen Kopf- und Thoraxverletzungen reduziert wurde, haben bei Frontalkollisionen heute z. B. Verletzungen der unteren Extremitäten an relativer Bedeutung zugenommen. Diese Verletzungen sind in der Regel zwar nicht lebensbedrohlich, jedoch mit hohen volkswirtschaftlichen Folgekosten und oftmals einer Mobilitäts einschränkung der Betroffenen verbunden.

Eine große Herausforderung stellt der demografische Wandel in vielen westlichen Nationen dar. Durch die zunehmend alternde Bevölkerung nimmt auch der Anteil der älteren Fahrzeuginsassen zu. Ältere Menschen sind u. a. aus biomechanischer Sicht weniger belastbar. Analysen von Unfalldatenbanken wie GIDAS haben ergeben, dass ältere und kleinere, vorwiegend weibliche Personen einem deutlich erhöhten Verletzungsrisiko ausgesetzt sind.

Somit können die gesetzlichen Vorschriften für den Frontal- und Seitenauftprall bis heute nicht als abgeschlossen betrachtet werden. Ein großes bedeutsames Feld sind Fragen der Kompatibilität, d. h. im Wesentlichen, wie unterschiedliche Fahrzeuge im Falle einer Kollision z. B. die Energie aufnehmenden Strukturen gegenseitig optimal nutzen und so die Unfallfolgen bei den Kollisionskontrahenten reduzieren können. Dies gilt sowohl für Fahrzeuge der gleichen Kategorien, vor allem aber für Fahrzeuge mit erheblichen Massen- und Größenunterschieden bis hin zu Fragen des Unterfahrerschutzes bei NFZen im Falle eines Frontal- oder Heckanpralls durch PKW. So wird sowohl in Europa als auch in den USA intensiv an Testverfahren gearbeitet, mit denen die Kompatibilität von Fahrzeugen beurteilt werden soll. Derzeit laufen die in der Diskussion befindlichen Vorschläge jedoch noch auf unterschiedliche Prüfverfahren hinaus. Ähnliches gilt für die derzeit eingesetzten deformierbaren Barrieren beim Frontal- und Seitenauftprall, die noch das Steifigkeitsverhalten der Fahrzeugfront früherer Fahrzeuggenerationen nachbilden. Daher wird sowohl die Masse der Seitenanprallbarriere als auch deren Geometrie der aktuellen durchschnittlichen Fahrzeugpopulation angenähert werden müssen.

Die EEVC WG 20 hat an einem statischen bzw. geometrischen Testverfahren gearbeitet, das Mindestanforderungen an die Gestaltung von Sitzen und Kopfstützen zum Schutz der Fahrzeuginsassen vor Verletzungen im Bereich der Halswirbelsäule zum Ziel hat. Ebenfalls

wurde durch EEVC WG 20 ein Vorschlag für ein dynamisches Testverfahren unter Verwendung des BioRID-Dummies erarbeitet und in die Diskussionen im Rahmen der Phase 1 der GTR Nr. 7 zu Kopfstützen eingebbracht. Während der Erarbeitung dieser Phase hatte die NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) in ihrer Final Rule FMVSS 202a ebenfalls Anforderungen an Kopfstützen definiert, die zum Einem durch statische Versuche (z. B. Anforderungen an die Kopfstützenmindesthöhe und den Abstand von Kopf zu Kopfstütze, der so genannte Back-set) und zum Anderen durch einen simulierten Heckanprall (Schlittenversuch mit einem Hybrid-III-Dummy) erfüllt werden können. Allerdings weist insbesondere das dynamische Verfahren nach FMVSS 202a noch Mängel auf, die u. a. auf die Verwendung des eingesetzten Hybrid-III-Dummies zurück zu führen sind, der für einen Heckaufprall über eine völlig unzureichende Biofidelität (d. h. Übereinstimmung mit dem lebenden Menschen) verfügt und für einen derartigen Lastfall auch nie entwickelt wurde. Dennoch wurde dieser Test nach langen, kontroversen Diskussionen optional in der GTR Nr. 7 für die erste Phase festgeschrieben.

Die EU-Kommission hat sich das ehrgeizige Ziel gesetzt, die Zahl der verschiedenen Richtlinien und Regelungen deutlich zu reduzieren und, soweit möglich, das gesamte Regelwerk zu vereinfachen. Dies wurde durch Einführung der General Safety Regulation schon weitestgehend realisiert. Parallel bestehende Vorschriften sollen durch einheitliche Vorschriften ersetzt und zudem weltweit harmonisiert werden. Eine wichtige Rolle besteht hierbei in der Erarbeitung und Einführung Globaler Technischer Regelungen (GTR), die anhand des „1998-Abkommens“ von den Unterzeichnerstaaten übernommen werden können. Als erste Regelung (GTR Nr. 1) wurden Anforderungen an Türschlösser und Türangeln von Kraftfahrzeugen festgelegt. Derzeit sind elf GTRs in das Register bei den Vereinten Nationen eingetragen. Die GTR Nr. 7 (Kopfstützen) und GTR Nr. 9 (Fußgängerschutz) werden derzeit jeweils in einer Phase 2 überarbeitet. In dieser Phase der GTR Nr. 7 wird die Einführung des BioRID-Dummies als biofideles Werkzeug zum dynamischen Testen von Sitzen im Detail diskutiert. In der Phase 2 der GTR Nr. 9 wird hauptsächlich an der Implementierung eines neuen Beinprüfköpers, dem FlexPLI (Flexible Pedestrian Legform Impactor), gearbeitet.

Eine Informelle Arbeitsgruppe der UNECE arbeitet an einer GTR zur Verbesserung des Insassenschutzes beim Seitenanprall. Basierend auf der Auswertung von Unfalldaten und unter dem Aspekt einer weltweiten Harmonisierung wird derzeit ein Testverfahren verfolgt, das einen 75 Grad- Schräganprall gegen einen Baum mit einer Anprallgeschwindigkeit von 32 km/h simuliert. Hierbei soll der neue, weltweit harmonisierte Seitenanprall-Dummy WorldSID 50 % zum Einsatz kommen, der ebenfalls in einer informellen Arbeitsgruppe im Hinblick auf die Gesetzgebung überarbeitet wird.

Die große zukünftige Herausforderung stellt jedoch die zunehmende Vernetzung von Systemen der aktiven und passiven Sicherheit, insbesondere im Zusammenhang mit Fahrerassistenzsystemen dar (vgl. hierzu Abschn. 5.4 und 5.5). Bereits im Feld vorhandene Systeme, wie z. B. das PRE-SAFE-System von Daimler, könnten dann mit kollisionsvermeidenden Systemen kombiniert werden. Dazu sind jedoch neben technischen noch zahlreiche rechtliche Fragen zu lösen.

## 6.3 Bewertung auf der Basis der Unfallstatistik

Bei der Bewertung der Sicherheit auf der Basis der Unfallstatistik erfolgt die Beurteilung retrospektiv mit Hilfe statistischer Analyseverfahren. Dabei werden die Unfallinformationen ausgewertet, die staatlicherseits (z. B. Bundesstatistik) oder von Versicherungsgesellschaften in einem zur statistischen Absicherung hinreichend großen Zeitraum erhoben worden und in Datenbanken gespeichert sind. Der Umfang statistisch signifikanter, verwertbarer Unfalldaten ergibt sich aus der Unfallhäufigkeit im Erhebungszeitraum [13]. Der Vorteil dieser Bewertung ist darin zu sehen, dass die unfallchirurgisch ermittelten Verletzungsschwere-Grade der Unfallbeteiligten mit der rekonstruierten Unfallschwere korreliert werden können und sich der Zusammenhang zwischen der Einführung von Sicherheitsmaßnahmen und den vermeidbaren Verletzungen ohne den Umweg über physikalische oder theoretische Insassenmodelle statistisch nachweisen lässt. Nachteilig hingegen ist die erforderliche Zeitspanne zwischen der Einführung von Sicherheitsmaßnahmen und der retrospektiven Ermittlung etwaiger Sicherheitsverbesserungen, da vom Zeitpunkt der Zulassung verbesserter Kraftfahrzeuge in den Verkehr, über das Erreichen eines merklichen Anteils dieser Fahrzeuge innerhalb der Fahrzeugpopulation bis zur Zeit des Vorhandenseins einer statistisch signifikanten Anzahl verunfallter Fahrzeuge eine gewisse Zeit erforderlich ist. Dadurch entziehen sich neuere Fahrzeugmodelle prinzipiell einer derartigen Bewertung.

### 6.3.1 Highway Loss Data Institute Report

Das US-amerikanische Highway Loss Data Institute veröffentlicht seit Mitte der 1970er Jahre Vergleichswerte für verschiedene Fahrzeugtypen, die sich an der Häufigkeit und den entstandenen Kosten für Personen- und Sachschäden orientieren. Als Grundlage für diese Bewertung dienen die Analyseergebnisse von zwei Versicherungsdatenbanken sowie polizeiliche Erhebungsakten. Die qualitative Beurteilung einzelner Fahrzeugtypen erfolgt durch den Bezug der spezifischen Unfalldaten auf Durchschnittswerte für die Häufigkeit von Sachschäden und auf das durchschnittliche Verhältnis zwischen Personen- und Sachschäden [13].

### 6.3.2 FOLKSAM-Report

Der FOLKSAM-Report ist angelegt, um den Verbraucher auf sicherheitsrelevante Unterschiede zwischen einzelnen Fahrzeugtypen hinzuweisen und damit den Stellenwert der Fahrzeugsicherheit im Rahmen der Kaufentscheidung zu erhöhen. Die von der schwedischen Versicherungsgruppe FOLKSAM INSURANCE turnusmäßig veröffentlichte sicherheitstechnische Bewertung spezieller Fahrzeugtypen und -modelle basiert auf den Daten aus Unfällen von Versicherungsnehmern. Dabei werden Unfalltyp, insassen-

bezogene Größen wie Alter und AIS-kodierte Verletzungen, fahrzeugbezogene Größen wie Massenverhältnis der Kollisionskontrahenten und technischer Fahrzeugzustand sowie Informationen über die Nutzung und Beschaffenheit der Insassenschutzsysteme in die Datenerhebung aufgenommen [13]. Aus diesem umfangreichen Unfalldatenmaterial lassen sich zur Bewertung fahrzeugtypspezifische Ausprägungen den Durchschnittswerten aller untersuchten Fahrzeuge bzw. dem Mittelwert einer bestimmten Fahrzeugkategorie gegenüberstellen. Die Risikoausgabe für einen Fahrzeugtyp wird jedoch nicht mit den Zulassungszahlen relativiert und beinhaltet alle Verletzungsarten unabhängig von deren Schwere. Über die Definition einer Sicherheitszahl wird darüber hinaus das Risiko tödlicher und schwerer Verletzungen mit Folgeschäden gegenüber den Durchschnittswerten validiert. Zudem werden Verletzungsverteilungen und -muster der relevanten Körperregionen bewertet.

### 6.3.3 Secondary Safety Rating System for Cars

Bei diesem in Großbritannien entwickelten Verfahren handelt es sich um eine analytische Methode, bei der die Einteilung sicherheitsrelevanter Fahrzeugkomponenten in verschiedene Klassen mit guter oder schlechter technologischer Problemlösungen erfolgt und auf eine dem aktuellen Wissensstand entsprechende Konzeption des zu bewertenden Bauteils bezogen wird. Die Relevanz der Kontaktbereiche und der Fahrzeugteilsysteme hinsichtlich des Verletzungsrisikos für die Insassen wird aus dem Unfallgeschehen abgeleitet und unter Berücksichtigung verletzungsbezogener Kostensätze gewichtet. Die Beurteilungskriterien beinhalten sowohl Elemente des Selbstschutzes (z. B. Ausführung des Türpolsters) als auch des Kontrahentenschutzes (z. B. Fußgänger-„freundliche“ Gestaltung der Fronthaube). Für jede Variable werden bis zu 17 Abstufungen verbal kategorisiert bzw. durch eine Matrix von Einzelkriterien definiert. Die Einstufung erfolgt lediglich durch Sichtprüfungen unter Einbeziehung konstruktiver Gestaltungsmerkmale und werkstofftechnischer Einschätzung durch ein Expertenteam. Die Gesamtbewertung eines Fahrzeugs ergibt sich aus der Multiplikation allen Variablen mit den entsprechenden Wichtungsfaktoren und deren Aufsummierung [13].

---

## 6.4 Bewertung auf der Basis von experimentellen Untersuchungen

Neben den gesetzlichen Anforderungen existieren in der Automobilindustrie in mehr oder weniger stark ausgeprägten Umfängen **firmenspezifische Prüfvorschriften**, die oftmals von der Versuchsanordnung zahlreicher und von den Prüfkriterien umfangreicher sind als die sicherheitsgesetzlich vorgeschriebenen Prüfverfahren. Aber auch die durch staatliche Institutionen (z. B. NHTSA mit dem US-NCAP) und Verbraucherschutzorganisationen (z. B. Euro NCAP) und Versicherungsgesellschaften (z. B. IIHS) durchgeführten Versuchsprogramme haben Eingang in die Lastenhefte der Fahrzeughersteller gefunden. Hierfür

Front	Geschwindigkeit [km/h]	Erprobungszielsetzung
	4,0 und 8,0	Stoßfänger
	50,0	Haltesysteme, Innenraum, Kraftstoffanlage, Lenkungsrückverschiebung
	27 ... 56	Haltesystem, Innenraum
	50	Haltesystem, Kraftstoffanlage
	15	Reparaturkosten
	64	Struktursicherheit, Insassenbelastung
	50	Struktursicherheit
	50 ... 110	Struktursicherheit, Insassenbelastung
	50 ... 80	Insassenbelastung, Innenraum

**Abb. 6.8** Gesetzliche (*schraffiert*) und hersteller-interne Anforderungen für Frontalkollisionen (nach [14])

Seite	Geschwindigkeit [km/h]	Erprobungszielsetzung
	32	Kraftstoffanlage
	54	Struktursicherheit, Insassenbelastung
	29	Kraftstoffanlage, Struktursicherheit
	50	Struktursicherheit, Insassenbelastung
	50	Struktursicherheit, Insassenbelastung

**Abb. 6.9** Gesetzliche (*schraffiert*) und hersteller-interne Anforderungen für Seitenkollisionen (nach [14])

Heck	Geschwindigkeit [km/h]	Erprobungszielsetzung
 40 %	15	Reparaturkosten
	80	Kraftstoffanlage
 50 %	50	Kraftstoffanlage, Struktursicherheit, Insassenbelastung
 50 %	50	Kraftstoffanlage, Struktursicherheit, Insassenbelastung
 50 %	50	Kraftstoffanlage, Struktursicherheit, Insassenbelastung

**Abb. 6.10** Gesetzliche (*schraffiert*) und hersteller-interne Anforderungen für Heckkollisionen (nach [14])

Überschlag	Geschwindigkeit [km/h]	Erprobungszielsetzung
	Fallhöhe 0,5 m	Struktursicherheit
	30 ... 50 (mindestens 1½-fache Rollbewegung)	Innenraum, Struktursicherheit, Aggregate, Kraftstoffanlage
	30 ... 40 Fallhöhe 0,4 m	Struktursicherheit (Innenraum)
Fußgänger Radfahrer	Geschwindigkeit [km/h]	Erprobungszielsetzung
	20 ... 40	Schutz der äußeren Verkehrsteilnehmer
	35 ... 40 Anprallgeschw. der Impaktoren	Fußgängerschutz

**Abb. 6.11** Gesetzliche und hersteller-interne Anforderungen für Überschlagunfälle und für Kolle- sionen mit äußeren Verkehrsteilnehmern (nach [14])

sollen die in den Abb. 6.8 bis 6.11 gezeigten Versuchskonstellationen zu Frontal-, Seiten- und Heckkollisionen sowie zum Überschlag und zu Kollisionen mit äußeren Verkehrsteilnehmern dienen, die [14] entnommen und den Erfordernissen entsprechend erweitert wurden. Die verschiedenen Versuchsanordnungen und die darauf basierenden Untersuchungen dienen der Sicherstellung firmeneigener Anforderungen. Die Erkenntnisse daraus sind jedoch nur indirekt, etwa über die Mitarbeit in Sicherheitsgremien, dem Fachpublikum zugänglich und lassen sich damit nur in eingeschränktem Maße für eine breit angelegte, allseits akzeptierte Sicherheitsbewertung heranziehen.

Bei der experimentell-basierten Bewertung werden die Ergebnisse aus Sicherheitsversuchen als Beurteilungskriterium herangezogen und in Relation zum Schutzkriterien-Level betrachtet [13]. Dies ermöglicht eine Bewertung bereits im Entwicklungsstadium mit Hilfe von Prototypen oder aber mittels der rechnerischen Simulation.

#### 6.4.1 ADAC-Testverfahren zur passiven Sicherheit von PKW

Der Allgemeine Deutsche Automobil-Club (ADAC) hat bereits in den 1980er Jahren damit begonnen, systematisch PKW im Hinblick auf die passive Sicherheit zu überprüfen und übernahm damit eine Vorreiterrolle, derartige Testergebnisse zur Information des Verbrauchers zu veröffentlichen und diesem somit eine Hilfestellung zur Kaufentscheidung zu geben. Die ADAC-Testverfahren änderten sich im Laufe der Zeit, wurden weiter entwickelt und dem technischen Fortschritt angepasst. Neben PKW und Kinderrückhaltesystemen wurden und werden auch andere Fahrzeugkategorien wie z. B. Wohnmobile getestet. Ebenfalls wurden Untersuchungen zur Kompatibilität von Fahrzeugen anhand von Aufprallversuchen durchgeführt (z. B. Geländefahrzeuge gegen Fahrzeuge der Kompaktklasse). Neben Frontal- und Seitenanprallversuchen werden auch Heckkollisionen simuliert und hierbei das Schutzzpotential zur Reduzierung der Verletzungswahrscheinlichkeit im Bereich der Halswirbelsäule untersucht.

Zwischenzeitlich werden vom ADAC die zu überprüfenden PKW einem Frontal-, einem Seiten- und einem Pfahlanprallversuch im Rahmen oder in Anlehnung an das European New Car Assessment Programme (Euro NCAP), dessen Mitglied der ADAC ist, unterzogen und veröffentlicht. Im Rahmen der Euro-NCAP-Versuche werden auch Tests zum Fußgängerschutz durchgeführt.

#### 6.4.2 Bewertung nach „auto motor und sport“ (ams-Test)

In den 1990er Jahren hat die Redaktion der Zeitschrift „auto motor und sport“ zahlreiche Fahrzeugversuche zur Bewertung der passiven Sicherheit von PKW durchgeführt. Wurden anfangs die Fahrzeuge nur einem Frontaltest unterzogen (dem so genannten „ams-Test“) so kam Ende der 1990er Jahre noch ein Seitentest in Anlehnung an ECE-R 95 und vergleichende Versuche in Anlehnung an den Euro-NCAP-Frontaltest hinzu. Zudem wurden

Versuche zur Beurteilung der Kompatibilität von großen und kleinen Fahrzeugen sowie Tests von Kinderrückhaltesystemen durchgeführt.

Beim Bewertungsverfahren auf Basis des ams-Tests werden Frontalkollisionen durchgeführt, deren Beurteilung sowohl durch die an Dummys gemessenen Belastungswerte als auch durch die Auswertung von Hochgeschwindigkeitsfilmaufnahmen und Fahrzeugdeformationen erfolgt. Dabei wird das zu untersuchende Fahrzeug unter äußerst realistischen Bedingungen mit Hilfe des ECV-Crash-Systems (ECV: Electronically Controlled Vehicle) auf eine Geschwindigkeit von 55 km/h gebracht und prallt mit einer 50 %-igen Überdeckung gegen eine um 15° gedrehte, starre Barriere [15]. Die Fahrzeuge sind mit zwei HYBRID-III-Dummys besetzt, an denen die Belastungswerte am Kopf, an der Brust, im Becken und an den Oberschenkeln gemessen werden. Zusätzlich erfolgt eine subjektive Einschätzung der Verletzungsgefährdung aus der Untersuchung des Deformationsverhaltens im Fahrzeug-Innenraum (Lenkradverschiebung, Armaturentafel- und Fußraum-Deformation) und aus der Analyse von Filmaufnahmen aus unterschiedlichen Richtungen (Kontaktstellen, Airbag-Aufblaszeit). Die Bewertung umfasst sowohl eine körperteilspezifische und eine fahrzeugseitige Beurteilung als auch eine Beurteilung der Sicherheit des untersuchten Gesamtfahrzeugs, allerdings nur hinsichtlich der inneren Sicherheit bei Frontalkollisionen. Bei aller Diskussion um die Beschränkung der ams-Tests zunächst alleine auf die Frontalkollision und die nicht unproblematische kombinierte Bewertung aus Schutzkriterien und subjektiver Einschätzung des Verletzungsrisikos ist das zweifellos große Verdienst der Initiative dieses Automobil-Magazins darin zu sehen, dass es erstmals in Deutschland gelungen war, die passive Sicherheit für die breite Öffentlichkeit durch eine vergleichende Darstellung der Sicherheitsbewertung verschiedener PKW als kaufentscheidendes Kriterium nachvollziehbar darzustellen und zu etablieren.

#### **6.4.3 Crash Worthiness Rating System for Cars (CWRSC)**

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle auch ein von der britischen Verkehrsforschungseinrichtung TRL (Transport Research Laboratory) entwickeltes System zur Bewertung des Sicherheitspotentials von Kraftfahrzeugen erwähnt, da aus diesem System das European New Car Assessment Programme (Euro NCAP) weiterentwickelt wurde. Das CWRSC umfasst ein komplexes Programm experimenteller Tests, die sich sowohl aus Integraltests als auch aus Einzeluntersuchungen relevanter Komponenten im Fahrzeug-Innenraum zusammensetzen [16]. Die Testbedingungen sind beim

- Frontalaufprall-Test: 60 km/h gegen eine starre, 30°-Barriere und beim
- Seitenaufprall-Test: 35 km/h mit einer starren, beweglichen Barriere unter einem Winkel von 90°;

für die Einzeluntersuchungen gelten

- 25 Komponententests: 24 km/h in neun Kontaktbereichen des Fahrzeug-Innenraums.

Die Versuche basieren zum einen auf Testkonfigurationen nach ECE und FMVSS und zum anderen auf unfallanalytischen Erkenntnissen. Die Messergebnisse orientieren sich an den gesetzlich vorgeschriebenen Schutzkriterien-Level, wobei die Zusammenfassung dieser Einzelergebnisse eine Bewertung zwischen 100 und 200 Punkten zulässt [13].

#### 6.4.4 New Car Assessment Program (NCAP)

In den letzten Jahrzehnten und insbesondere in der letzten Dekade haben sich weltweit verschiedene Versuchsprogramme etabliert, mit denen die passive Sicherheit von neuen Fahrzeugen untersucht und veröffentlicht werden, um so dem Verbraucher eine Entscheidungshilfe beim Kauf eines Fahrzeugs zu geben. Diese als New Car Assessment Program (NCAP) bezeichneten Testverfahren haben im Wesentlichen gemeinsam, dass die in den jeweiligen Ländern oder Regionen vorgeschriebenen gesetzlichen Anforderungen als Mindestanforderungen dienen und Fahrzeuge, die eine gute Bewertung erreichen wollen, deutlich höhere und teilweise weit darüber hinaus gehende und zusätzliche Anforderungen erfüllen müssen. Solche Programme werden in den USA vom Forschungsinstitut der NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration), als US-NCAP bezeichnet, in Japan von NASVA als so genanntes J-NCAP, in Australien als A-NCAP und in Europa von einem Konsortium aus 12 Mitgliedern als Euro NCAP durchgeführt. In den letzten Jahren entstanden zusätzlich in Brasilien das Latin-NCAP (für Latein-Amerika), in China C-NCAP, in Korea K-NCAP und seit 2012 in Malaysia das Asian NCAP. Auf den so genannten World-NCAP-Treffen, die in der Regel einmal pro Jahr stattfinden, erfolgt ein intensiver Erfahrungs- und Informationsaustausch zu den verschiedenen NCAP-Verfahren. Das älteste derartige Versuchsprogramm ist das nachfolgend beschriebene Bewertungsverfahren US-NCAP.

Im Rahmen der von der World Health Organisation (WHO), der World Bank und der FIA Foundation initiierten und von den Vereinten Nationen im Mai 2011 ausgerufenen „Decade of Action for Road Safety 2011–2020“ [17] wurde auch ein Global NCAP ins Leben gerufen, das zum Ziel hat, weitere NCAPs aufzubauen und zu koordinieren. Euro NCAP unterstützt dieses weltweite Programm in technischen und organisatorischen Fragen.

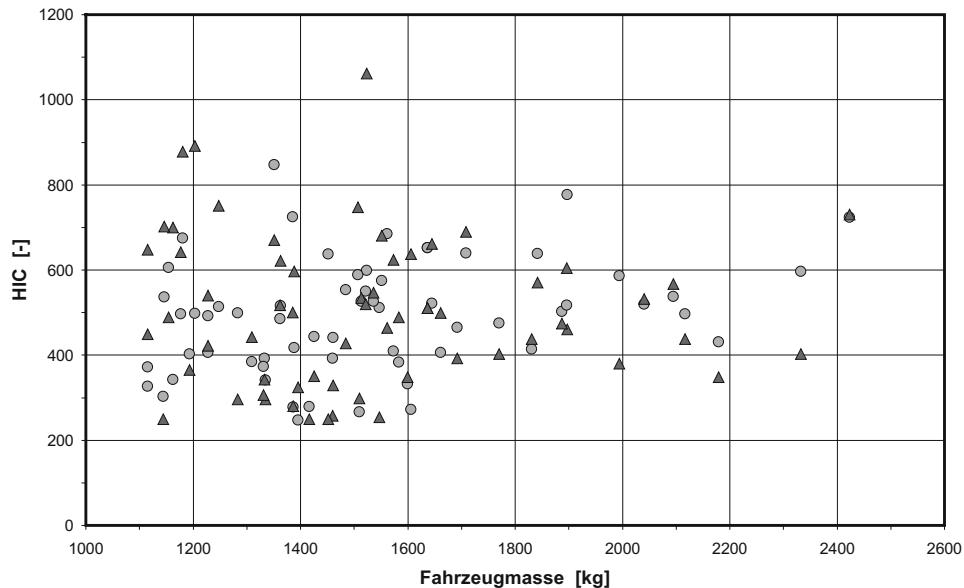
**US-NCAP** – Die Grundlage für das Bewertungsverfahren New Car Assessment Program (NCAP) wurde vom US-amerikanischen Senat nach der starken Zunahme der Unfall- und Verletztenzahlen durch den Erlass einer verbraucherorientierten Gesetzesrichtlinie geschaffen. Dieser Kraftfahrzeug-Informations- und Kosteneinsparungserlass (Motor Vehicle Information and Cost Saving Act) aus dem Jahre 1972 enthält die Aufforderung an das Transportministerium (DOT: Department of Transportation), neu auf dem US-Markt angebotene Fahrzeuge vergleichend unter ökonomischen und sicherheitstechnischen Gesichtspunkten zu untersuchen und die gewonnenen Ergebnisse der Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Erklärtes Ziel war und ist dabei, das Sicherheitsniveau über das Käuferinteresse und die Nachfragesituation zu stellen. Im Vordergrund standen allerdings, zumindest in den Jahren der Einführung, zunächst volkswirtschaftliche und

energiepolitische Fragen. Der zu Beginn der 1970er Jahre durch die sich abzeichnenden Versorgungsengpässe und die restriktiven ordnungspolitischen Maßnahmen (Geschwindigkeitsbeschränkung auf 55 mph, Ermittlung der Flottenverbrauchswerte) wachsende Anteil an kleineren Fahrzeugen (1980: 40 %-iger Anteil der Compact und Sub-compact Cars an der Fahrzeugpopulation) spiegelte sich im Unfallgeschehen überproportional deutlich wider. Daher wurde zunächst diese Fahrzeugklasse einer sicherheitstechnischen Untersuchung unterzogen:

- Insassenschutz für Fahrer und Beifahrer bei Frontal- und Heckkollisionen,
- Integrität und Stabilität der Windschutzscheibe am Fahrzeug,
- Brandgefahr nach einer Kollision und
- Komfortbetrachtung am Insassenschutzsystem.

Die Aufbereitung und zusätzliche Nutzung von Erkenntnissen aus Polizeiakten und Versicherungsakten wurden als nützlich beurteilt, ihre eingeschränkte Aussagefähigkeit über aktuell eingeführte oder gar neue Fahrzeuge jedoch erkannt. Zum Ausgleich dieses Nachteils wurde ein experimentelles Test- und Bewertungsverfahren etabliert, das seit dem Modelljahr 1983 auf die gebräuchlichsten Fahrzeuge inländischer Hersteller und Importeure angewandt wird und im Jahresdurchschnitt ca. 60 Fahrzeugmodelle betrifft. Bei der Definition der Versuchsbedingungen wird ein Frontalaufprallversuch senkrecht auf eine starre, nicht deformierbare Barriere mit einer Aufprallgeschwindigkeit von 35 mph (~56 km/h) zugrunde gelegt. Im Gegensatz zum Aufpralltest nach FMVSS 208, bei dem die Insassen ausschließlich durch passive Rückhaltesysteme geschützt werden, sind beim NCAP-Versuch auch aktive Systeme, d. h. beispielsweise vom Insassen betätigtes Gurtsystem, zugelassen. Abbildung 6.12 zeigt die Ergebnisse der NCAP-Versuche des Jahres 2004 in Form von HIC-Werten, gemessen am Dummy auf der Fahrer- und der Beifahrerseite [18]. Im Vergleich zur Auswertung 1992/93 liegen die Werte bis auf eine Ausnahme unterhalb des Levels von HIC = 1.000. Sie weisen eine geringere Streuung auf und liegen im Mittelwert niedriger, nämlich bei HIC = 492 (1992: 891) für den Fahrer und bei HIC = 502 (797) für den Beifahrer; im Übrigen, aufgrund der geringeren Mittelwerte, ein Hinweis auf die Verbesserung der inneren Sicherheit bei Frontalkollisionen.

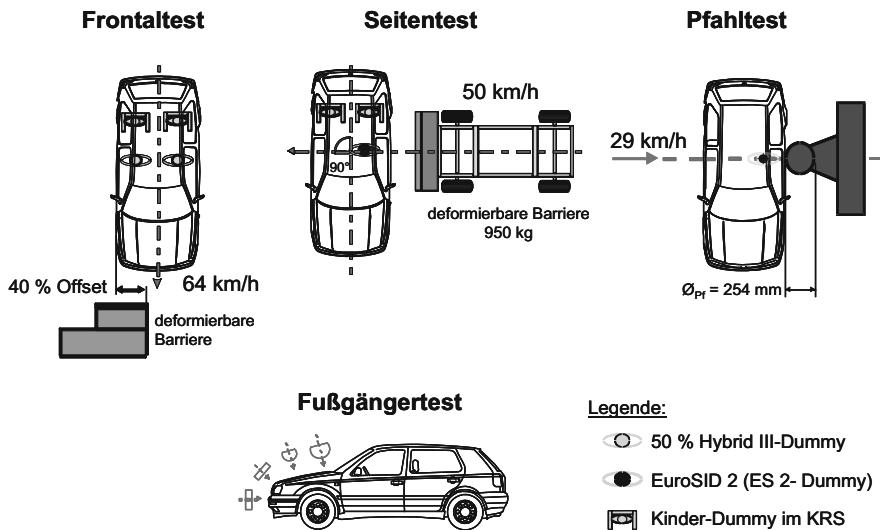
Vor dem Hintergrund des komplexen Unfallgeschehens kann der punktuelle Bewertungsansatz die Unfallrealität allerdings nur unzureichend abbilden und begünstigt möglicherweise sogar Fehleinschätzungen hinsichtlich des Insassenschutzes bei Seitenkollisionen. In diesem Verfahren wurden ursprünglich die Schutzkriterien der geltenden US-amerikanischen Sicherheitsstandards (FMVSS 208, 212, 219, 301) des 30 mph-Aufpralltests als Mindestanforderung interpretiert und dienten als absolute Erfüllungs- bzw. Bewertungskriterien [13]. Die anfänglich praktizierte alleinige Darstellung der Einhaltung oder Nicht-Einhaltung der Schutzkriterien-Level ist inzwischen einer ausführlichen, auf der Verletzungswahrscheinlichkeit basierenden Bewertung der Testergebnisse im unter- und überkritischen Bereich in Form eines Punktesystems, dargestellt durch ein bis fünf Sterne (für „sehr sicher“), gewichen [19]. Innerhalb der Veröffentlichung im so genann-



**Abb. 6.12** HIC-Werte ( $n = 63$ ) gemessen am Kopf des Fahrers und des Beifahrer aus dem NCAP-Programm 2004 (nach [18])

ten Car Book wird die Aussagefähigkeit der Versuchsergebnisse ausschließlich auf die Bedingungen des 35 mph-Frontal-Wandaufpralls, also nur einer von mehreren Unfallkonstellationen, eingegrenzt. Seit einigen Jahren führt die NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) auch Seitenauftprallversuche im Rahmen des so genannten SI-NCAP (Side Impact National Car Assessment Program) nach FMVSS 214 durch, allerdings mit einer erhöhten Aufprallgeschwindigkeit von 38 mph ( $\approx 61$  km/h) der beweglichen Barriere. Zurzeit werden Diskussionen geführt, beim frontalen NCAP-Test die starre Barriere durch ein deformierbares Hindernis zu ersetzen [13].

**Euro NCAP** – Das European New Car Assessment Programme wurde durch ein Konsortium ins Leben gerufen, in dem neben einigen europäischen Regierungsinstitutionen (Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Katalonien, Luxemburg, Niederlande, Schweden) auch Automobilclubs (FIA Foundation, ADAC, ACI), der Dachverband der europäischen Verbraucherschutzorganisationen (ICRT) und ein Vertreter der britischen Versicherungswirtschaft (Thatcham) Mitglieder sind. Die EU-Kommission ist zwar kein Mitglied, unterstützt Euro NCAP jedoch politisch sehr stark, da dieses Testprogramm helfen kann, die verkehrspolitischen Ziele im Hinblick auf mehr Sicherheit im Straßenverkehr zu erreichen. Zwar wurde das im Weißbuch der Kommission festgeschriebene Ziel einer Halbiierung der Zahl der Verkehrstoten in Europa basierend auf den Daten von 2001 bis zum Jahr 2010 nicht ganz erreicht, aber Euro NCAP kann dazu beitragen, das bis 2020 definierte Ziel einer weiteren Reduktion der Zahl der Verkehrstoten um 50 % zu erreichen [20]. Im Jahr



**Abb. 6.13** Testkonfigurationen nach Euro NCAP

1997 wurden erste Ergebnisse des European New Car Assessment Programme veröffentlicht.

Das Testprogramm ist, wie bereits beschrieben, im Wesentlichen aus dem „Crash Worthiness Rating System for Cars“ entstanden und wird laufend weiter entwickelt. Jedes Fahrzeug wird im Rahmen von Euro NCAP anhand der Ergebnisse folgender Versuche bewertet (vgl. Abb. 6.13):

- ein Frontal-Aufprallversuch mit 64 km/h gegen eine deformierbare Barriere mit 40 % fahrerseitiger Frontüberdeckung; jeweils ein Hybrid-III-Dummy auf den vorderen äußeren Sitzpositionen sowie ein P1 $\frac{1}{2}$ - und ein P3-Kinder-Dummy (ab dem Jahr 2013 ein Q1 $\frac{1}{2}$  und Q3-Kinder-Dummy), die Kinder im Alter von 18 Monaten bzw. drei Jahren repräsentieren, auf den hinteren Sitzpositionen in vom jeweiligen Fahrzeughersteller empfohlenen Kinder-Rückhaltesystemen (KRS),
- ein fahrerseitiger Seiten-Aufprallversuch mit einer fahrbaren deformierbaren Barriere mit 50 km/h; ES 2-(EuroSID 2-)Dummy auf der Fahrerposition sowie ein P1 $\frac{1}{2}$ - und ein P3-Kinder-Dummy (ab dem Jahr 2013 ein Q1 $\frac{1}{2}$  und Q3-Kinder-Dummy) auf den hinteren Sitzpositionen in vom jeweiligen Fahrzeughersteller empfohlenen KRS,
- ein Pfahl-Aufprallversuch mit 29 km/h; ES 2-Dummy auf der Fahrerposition. Hierbei wird das Fahrzeug auf einem fahrbaren Schlitten, dem so genannten „flying floor“, gegen einen am Crash-Block montierten Stahlpfahl gefahren sowie
- Fußgänger-Komponentenversuche in Anlehnung an das Testverfahren der EEVC WG 17, allerdings erweitert um Komponentenversuche im Bereich der Windschutzscheibe. Das Bewertungsverfahren und die Auswahl der Testpunkte wird ab dem Jahr 2013 durch ein verfeinertes Testfeld, das so genannte GRID, geändert. Für das Jahr

2014 ist der Einsatz des FlexPLI mit neuen Beurteilungskriterien anstelle des TRL-Beinimpaktors vorgesehen.

- Seit 2009 werden zusätzlich die Sitze des zu testenden Fahrzeugmodells durch Schlitzenversuche mit drei unterschiedlichen Pulsen verschiedener Schwere im Hinblick auf ihr Schutzzpotential bezüglich der Beschwerden im Halsbereich (HWS-Distorsion) im Falle einer Heckkollision bewertet (Whiplash-Tests).

Die Bewertung des Insassenschutzes von PKW erfolgt zum einen anhand der körperteil-spezifisch am Dummy gemessenen Belastungswerte. Die gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerte bilden hierbei einen Schalter zu Null Punkten bzw. zu einer roten Einfärbung der betreffenden Körperregion im Piktogramm des Insassen. Zwischen diesem roten bzw. Null-Punkte-Bereich und den unteren Grenzwerten für die zu beurteilenden Dummy-Belastungswerte (grüner Bereich, bis zu 2 Punkte) wird mit Hilfe einer so genannten „Sliding Scale“ linear interpoliert und die jeweilige Punktebewertung ermittelt. Sofern für einen Körperteil mehrere Schutzkriterien verwendet werden, geht der jeweils schlechteste Wert (worst scoring component) in die Gesamtbewertung ein. Ein Beispiel hierfür ist der Bereich der unteren Extremitäten, bei dem beispielsweise der Tibia-Index und die Unterschenkelkraft in z-Richtung ermittelt werden. Zusätzlich fließen in die Fahrzeug-Gesamtbewertung z. B. für den Frontaltest nur die jeweils schlechtesten Ergebnisse der Fahrer- oder der Beifahrerseite ein.

Zusätzlich zu den aus den Dummy-Belastungswerten ermittelten Bewertungen finden so genannte Modifier – in der Regel ein Punktabzug – Anwendung, die aus Ergebnissen der Fahrzeugvermessung, der Auswertung von Hochgeschwindigkeitsfilmen und der Untersuchung der Fahrzeuge durch ein Team von Euro-NCAP-Inspektoren und deren teilweise subjektiver Einschätzung abgeleitet werden. Diese Modifier werden in der Regel von der jeweiligen körperteil-spezifischen Bewertung abgezogen bzw. dieser zugeordnet (z. B. Lenkradverschiebung auf den Kopf, Verkürzung der Fahrgastzelle auf die Brust, Fußraum- und Pedalintrusionen auf die unteren Extremitäten, Entfaltung der Airbags). Infolge der mitunter subjektiven Beurteilung durch die Inspektoren sind diese Modifier, insbesondere der Knie-Modifier, der für potentiell verletzungsgefährdende Strukturen in einem erweiterten Knieanprallbereich vergeben wird, immer wieder Gegenstand kontroverser Diskussionen auch mit den Fahrzeugherstellern.

Neben den Fahrzeugversuchen findet bei Euro NCAP eine Bewertung von Gurttrage-Warnsystemen, den so genannten „Seat Belt Reminder“ (SBR), Eingang in die Gesamtbewertung. In weiten Teilen Europas liegt die Gurtanlegequote immer noch auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Die neben dem Sicherheitsgurt vorhandenen zusätzlichen Schutzeinrichtungen in modernen PKW, wie Airbags, Gurtstraffer und Gurtkraftbegrenzer, können ihr Schutzzpotential nur im Zusammenwirken mit einem angelegten Sicherheitsgurt entfalten. In den europäischen Unfallstatistiken sind tödlich verletzte Fahrzeuginsassen, die keinen Sicherheitsgurt getragen haben, deutlich überrepräsentiert, was das Schutzzpotential des Sicherheitsgurtes als „Lebensretter Nummer Eins“ deutlichlegt. Durch flächendeckende Einführung eines „intelligenten“ SBR-Systems könnte daher

die Gurtanlegequote in Europa deutlich erhöht werden und somit zu einem erheblichen Rückgang der getöteten und der schwer verletzten Fahrzeuginsassen führen. Aus diesem Grund hatte Euro NCAP die Entscheidung getroffen, solche Systeme mit Zusatzpunkten zu „belohnen“ und somit einen Anreiz für die Fahrzeughersteller zu schaffen, derartige Systeme zu entwickeln und möglichst flächendeckend einzuführen. So haben auch Regierungen und Institutionen außerhalb von Europa Interesse an dem von Euro NCAP entwickelten Test- und Bewertungsprotokoll gezeigt und mit der 05 Serie der ECE-R 16 gesetzliche Mindestanforderungen festgelegt, die allerdings geringer als die Euro-NCAP-Anforderungen sind.

Seit 2009 wurden die bisher für die drei Kategorien

- Schutz der erwachsenen vorderen Insassen,
- Kindersicherheit und
- Fußgängerschutz

separat vergebenen Sterne-Bewertungen zu einer Gesamt-Sterne-Bewertung des Fahrzeugs zusammengefasst. Das gegenwärtige Bewertungssystem basiert nun durch Hinzufügen einer neuen Kategorie, der so genannten „Safety Assist Box“, auf den Ergebnissen aus vier verschiedenen Kategorien, die zusätzlich nach ihrer Bedeutung im Unfallgeschehen gewichtet sind. So hat mit einem Anteil von 50 % die Bewertung des Schutzes der vorderen erwachsenen Insassen nach wie vor die größte Bedeutung, gefolgt von jeweils 20 % für die Kindersicherheit und den Fußgängerschutz. Der Anteil der Safety Assist Box beträgt derzeit 10 %. Das neue Bewertungssystem duldet zur Erreichung einer guten Sterne-Bewertung jedoch keine Schwächen in einer der vier Kategorien. Zusätzlich zu der Wichtung wurde noch das so genannte „Balancing“ eingeführt, in dem die zu erreichenden Mindestprozentsätze in den jeweiligen Kategorien festgeschrieben wurden. Da insbesondere der Fußgängerschutz von zahlreichen Fahrzeugherstellern nicht hinreichend berücksichtigt wurde, stellt diese Kategorie eine besondere Herausforderung dar. Um dem Verbraucher keine irritierenden Botschaften zu vermitteln (z. B., dass ein neues Fahrzeug eine schlechtere Bewertung erhält als das Vorgängermodell, obwohl es insgesamt besser geworden ist) und die Fahrzeughersteller mitzunehmen, wurde daher für eine Übergangsphase bis 2012 ein so genanntes „Safe Landing“ vorgesehen. Hierbei wurden die in den jeweiligen Kategorien für eine bestimmte Sterne-Bewertung geforderten Mindestprozentsätze insbesondere für den Fußgängerschutz sukzessive erhöht.

So werden seit 2012 für das Erreichen einer 5-Sterne-Bewertung in der Kategorie Schutz der erwachsenen vorderen Insassen mindestens 80 % der in der Kategorie beim Frontal-, Seiten- und Pfahlanprall und den Whiplash-Tests erreichbaren Punkte verlangt. Diese Bewertung gibt die Einschätzung des Schutspotentials des Fahrzeugs für einen durchschnittlichen Erwachsenen bei diesen Aufprallarten wieder. Die Beurteilung der Sicherheit von Kindern in den getesteten Fahrzeugen erfolgt in einer eigenen Kategorie: Im Rahmen der Euro-NCAP-Frontal- und Seiten-Kollisionsversuche werden die beiden Kinder-Dummys ( $P1\frac{1}{2}$  und P3) jeweils in von den Fahrzeugherstellern empfohlenen

Kinder-Rückhaltesystemen (KRS) gesichert. Diese Rückhaltesysteme verfügen teilweise über eine fahrzeugspezifische Zulassung und sind in der Regel im oberen Preissegment der PKW angesiedelt. Neben der Einhaltung der Schutzkriterien fließen bei der Bewertung der KRSe zusätzlich zahlreiche fahrzeug- und KRS-bezogene Kriterien ein, wie z. B. die Ausstattung des Fahrzeugs mit ISOFIX- oder „Top-Tether“-Verankerungspunkten, das Verwenden von Aufkleber im Fahrzeug, das so genannte Labelling, die auf die richtige Benutzung des Kinder-Rückhaltesystems hinweisen, aber auch Warnhinweise, z. B. beim Vorhandensein eines Beifahrer-Airbags, bis hin zu der Möglichkeit, auch große rückwärtsgerichtete Kinder-Rückhaltesysteme in einem Fahrzeug verwenden zu können, oder die automatische Erkennung von rückwärtsgerichteten Rückhaltesystemen auf dem Beifahrersitz und der dann erforderlichen Abschaltung des Beifahrerairbags. Die Kategorie Kindersicherheit wird derzeit überarbeitet, um in Zukunft auch einen besseren Schutz für größere Kinder (6 und 10 Jahre alt) zu erreichen. Allerdings werden bereits ab 2013 die veralteten Dummys der P-Familie ( $P1\frac{1}{2}$  und P3) durch Kinder-Dummys einer neuen Generation, der so genannten Q-Serie, abgelöst. Zusätzlich wird eine Kompatibilitätsprüfung („Interface Assessment“) des zu testenden Fahrzeug mit gut getesteten Kinder-Rückhaltesystemen einer Auswahlliste (so genannten „Top Pick List“) durchgeführt. Die ausgewählten Kinder-Rückhaltesysteme wurden hierbei zuvor durch ein europäisches Konsortium (ETC), dem neben dem ADAC u. a. auch die Stiftung Warentest angehören, auf Basis mehrerer Tests (z. B. Schlittentests in einer Rohkarosserie, Schadstoffprüfung) mindestens mit „gut“ bewertet. Hierdurch möchte Euro NCAP dem Verhalten und Wünschen der Verbraucher Rechnung tragen, da diese nur in relativ wenigen Fällen tatsächlich die durch die jeweiligen Fahrzeughersteller empfohlenen Sitze erwerben.

In einer weiteren Kategorie wird bei Euro NCAP die Beurteilung des Schutspotentials im Falle einer Frontalkollision mit einem Fußgänger vorgenommen. Diese Versuche werden in Anlehnung an das durch die EEVC WG 17 vorgeschlagene Testverfahren mittels Komponentenversuchen durchgeführt. Bei den Versuchen nach dem Euro-NCAP-Verfahren, deren Anforderungen weit über die in den Verordnungen (EG) No 78/2009 und No 631/2009 vorgesehenen Versuche hinaus gehen, werden Komponentenversuche auch im Bereich der Windschutzscheibe, insbesondere am unteren Windschutzscheibenrahmen, durchgeführt. Zudem sind Versuche im Bereich der A-Säule möglich, sofern der Fahrzeughersteller glaubhaft macht, dass in diesem Bereich Maßnahmen zum Schutz eines Fußgängers vorgenommen wurden. Bisher wird der Bereich der A-Säule jedoch in der Regel ohne Durchführung von Versuchen mit Null Punkten bzw. mit „rot“ bewertet.

Zur Bewertung des Fußgänger-Schutspotenzials werden derzeit folgende Tests durchgeführt:

- Bis zu sechs Tests mit einem Kinderkopf-Impaktor (40 km/h, 3,5 kg, Durchmesser 165 mm; Schutzkriterium: HIC = 1.000 entspricht 2, HIC = 1.350 dagegen 0 Punkten),
- bis zu sechs Tests mit einem Erwachsenen-Kopf-Impaktor (40 km/h, 4,5 kg, Durchmesser 165 mm; Schutzkriterium: HIC = 1.000 entspricht 2, HIC = 1.350 dagegen 0 Punkten),

- bis zu drei Tests mit dem TRL-Beinimpaktor (40 km/h; Schutzkriterien: Bein-Beschleunigung, Biegewinkel und Scherung im Kniebereich) und schließlich
- bis zu drei Tests mit einem Hüftprüfkörper (Masse, Anprallwinkel und Geschwindigkeit abhängig von der Fahrzeug-Frontgeometrie).

Sofern das Fahrzeug über einen höher montierten Stoßfänger verfügt, wird dieser mit dem Hüftimpaktor getestet. Durch die Nominierung und Finanzierung von zusätzlichen zu den durch Euro NCAP durchgeführten Versuchen hat der Fahrzeugherrsteller die Möglichkeit, das Ergebnis positiv zu beeinflussen.

Ab 2013 wird das Bewertungsverfahren für den Fußgängerschutz verschärft. Durch Einführung eines deutlich verfeinerten Testfeldes (GRID) im Kinder- und Erwachsenen-Kopfbereich und durch eine Verschärfung der Kriterien für den HIC (maximale Punktzahl bei Unterschreitung eines HIC von 650 anstelle von 1.000) sind die Herausforderungen für den Fahrzeugherrsteller, eine 5 Sterne-Gesamtbewertung zu erreichen, deutlich größer geworden. Ab dem Jahr 2014 soll der derzeitig eingesetzte TRL-Beinimpaktor durch das FlexPLI mit neuen Beurteilungskriterien abgelöst werden.

In der vierten Kategorie, der „Safety Assist Box“, werden derzeit Punkte für ein Gurttrage-Warnsystem (SBR: Seat Belt Reminder) für alle Sitzplätze, ein ESP-System und für einen Geschwindigkeitsassistenten (Speed Limiter) vergeben. Systeme, die in dieser Kategorie bewertet werden, haben ein großes Potential, die Sicherheit im Straßenverkehr zu verbessern. Euro NCAP arbeitet derzeit intensiv daran, u. a. Testverfahren für automatische Not-Bremssysteme zu entwickeln. Es ist geplant, eine entsprechende Bewertung ab dem Jahr 2014 vornehmen zu können und somit auch als Voraussetzung für eine 5 Sterne-Bewertung zu machen. Darüber hinaus werden in Zukunft Systeme bewertet, die auch Kollisionen mit Fußgängern (und Radfahrern) vermeiden bzw. die Schwere der Kollision reduzieren können.

Neben der Sterne-Bewertung eines Fahrzeugs hat Euro NCAP eine zusätzliche Auszeichnung, den so genannten „Euro NCAP Advanced Award“, für innovative Sicherheitssysteme eingeführt. Hersteller können sich bei Euro NCAP um diese Auszeichnung bewerben und ihr System nach einem festgelegten Verfahren (Beyond-NCAP-Prozess), in dem u. a. der Nutzen für die Verbesserung der Verkehrssicherheit untersucht wird, von einer unabhängigen Expertengruppe beurteilen lassen. Hiervon haben bisher zahlreiche Hersteller Gebrauch gemacht und für ihre Systeme (wie z. B. für Kollisionswarnsysteme, Spurhalte-, Abstands- und Spurwechsel-Assistenten) Auszeichnungen bekommen.

Das Euro-NCAP-Konsortium ist in der Lage, schnell auf die technische Weiterentwicklung ebenso wie auf (Fehl-)Entwicklungen zu reagieren, die beispielsweise auf eine Ausnutzung evtl. vorhandener Lücken im Testprotokoll oder auf die Nutzung versteckter Lastpfade in Dummys zur Erzielung besserer Bewertungen zurück geführt werden können. So lassen sich bei Erfordernis vergleichsweise schnell neue Dummy- und Barriere-Typen etablieren, Änderungen in Testprotokollen vornehmen oder auch neue Modifier einführen. Durch seine Vorreiterrolle übt Euro NCAP zunehmend Einfluss auf die Sicherheitsgesetzgebung, und zwar nicht nur in Europa aus.

### 6.4.5 Die Quantifizierung der passiven Sicherheit für PKW-Insassen und das Sicherheitskriterien-System SiKris

Das Ziel des Bewertungsverfahrens, das im Rahmen des langjährigen, von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) finanzierten Forschungsprojekts „Quantifizierung der passiven Sicherheit für PKW-Insassen“ an der Technischen Universität Berlin erarbeitet wurde, besteht darin, am Dummy gemessene Belastungswerte zu einem einzigen Sicherheitsindex zu verdichten. Das Verfahren kann unter methodischen Gesichtspunkten zwischen den beiden bereits beschriebenen Extrempositionen angesiedelt werden: Einerseits der rein experimentellen Bewertung mittels eines Frontal- und eines Seiten-Aufprallversuchs, wie sie innerhalb des US-NCAP-Verfahrens vorgenommen wird, und andererseits die Bewertung mittels der retrospektiven Unfallanalyse, die in der Fahrzeug-Sicherheitsbewertung (Car Model Safety Rating) von FOLKSAM Anwendung findet. Gegenüber dem am weitesten fortgeschrittenen Verfahren, dem Euro NCAP, bietet das hier diskutierte Verfahren die Vorteile, ohne Komponentenversuche auszukommen und eng an gesetzlich vorgeschriebene Sicherheitsversuche angelehnt zu sein. Allerdings ist ein zusätzlicher Test, der so genannte Kompatibilitätsversuch, erforderlich. Im Einzelnen umfasst das Verfahren drei Versuchskonstellationen [13]:

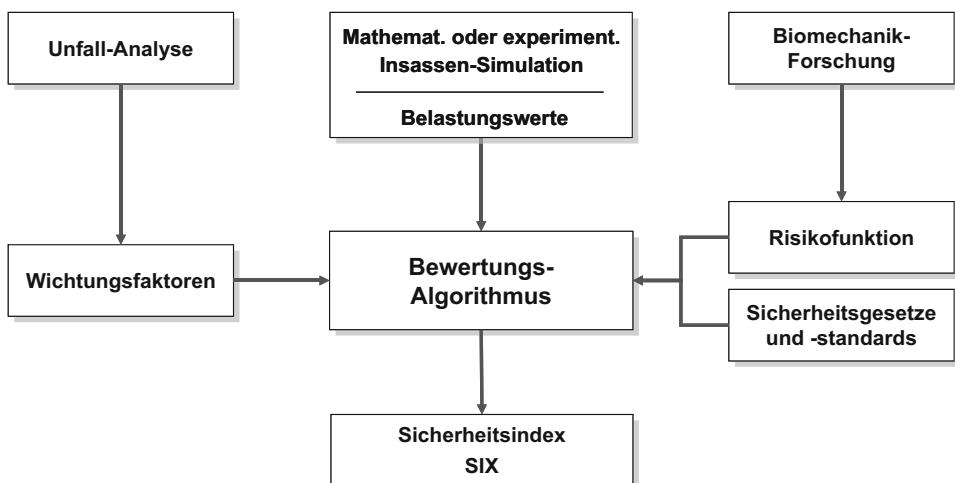
- Frontalaufprall gegen eine deformierbare 0°-Barriere mit 50 km/h,
- Seitenaufprall unter 90° mit einer beweglichen, deformierbaren Barriere mit 50 km/h und
- Kompatibilitätstest, einer 90°-Seitenkollision zwischen zwei baugleichen Fahrzeugmodellen, ebenfalls mit 50 km/h.

Für den angewandten Bewertungsalgorithmus wurden die Zusammenhänge zwischen der Verletzungsschwere und der Dummy-Belastungsgröße einerseits und zwischen den körperteilspezifischen Schutzkriterien und dem entsprechenden Erfüllungsgrad andererseits erschlossen. Darüber hinaus sind Relevanzfaktoren aus dem Unfallgeschehen zur Wichtung der Teilergebnisse entwickelt worden. Mit Hilfe dieses Bewertungsverfahrens werden die versuchstechnisch ermittelten Belastungswerte normiert und bewertet. Die daraus ermittelten Erfüllungsgrade erhalten durch die Relevanzfaktoren eine unfallspezifische Wichtung und lassen sich über Teilsicherheitsindizes zu einem Gesamt-Sicherheitsindex (SIX) zusammenfassen. Dieser Index gibt Aufschluss über die innere Sicherheit von PKW im Hinblick auf den Selbst- und den Kontrahentenschutz [13].

Die Besonderheit des hier nur kurz dargestellten Bewertungsverfahrens liegt in der konsequenten Anwendung der statistischen Biomechanik (vgl. Abschn. 3.3.2) und in der mit Hilfe körperteilspezifischer Risikofunktionen verbundenen kontinuierlichen Bewertungsmöglichkeit von Belastungswerten. Zwischenzeitlich fand der geringfügig modifizierte Bewertungsalgorithmus unter dem Begriff **Sicherheitskriterien-System SiKriS** Eingang in die ausschließliche Bewertung von Insassenschutz-Systemen mittels gemessener, aber auch durch Insassensimulation rechnerisch ermittelter Belastungswerte [21]. Unter Be-

rücksichtigung von geeigneten Versuchsanordnungen und entsprechenden Testergebnissen zur äußereren Sicherheit konnte das Verfahren erweitert werden und gestattet nunmehr die Bewertung der passiven Sicherheit von PKW nicht nur hinsichtlich der inneren, sondern auch der äußereren Sicherheit [22].

Wegen seiner universellen Anwendbarkeit soll im Folgenden das Sicherheitskriterien-System (SiKriS) näher erläutert werden. Mit Hilfe dieses Bewertungssystems wird der Sicherheitsindex SIX (mit  $0 \leq \text{SIX} \leq 1$ ) zur Bewertung der gemessenen oder der rechnerisch ermittelten Belastungswerte aller relevanten Körperteile unter Berücksichtigung der Unfallanalyse, der Biomechanik-Forschung und der Sicherheitsgesetzgebung berechnet (Abb. 6.14). Je größer er ist, desto geringer ist das Verletzungsrisiko bzw. desto höher ist die Schutzwirkung des Insassen- bzw. des Fußgängerschutz-Systems. Denn das Sicherheitskriterien-System konnte mittlerweile auf Frontal- und Seitenkollisionen sowie auf Fußgängerkollisionen ausgedehnt werden [22]. Derzeit lassen sich die in Tab. 6.5 dargestellten Schutzkriterien anwenden, doch gestattet das Verfahren auf einfache Art und Weise eine Erweiterung, sofern die Risikofunktion aus der Biomechanik-Forschung bekannt ist, und kann damit auf beinahe beliebige Unfallkonstellationen ausgedehnt werden.



**Abb. 6.14** Schema des Sicherheitskriterien-Systems SiKriS (aus [21])

Aus der körperteilspezifischen Risikofunktion (vgl. Abb. 3.67), bei der die Wahrscheinlichkeit für irreversible Verletzungen in Abhängigkeit von der jeweiligen Belastungsgröße dargestellt ist, ergibt sich durch die Inversion des Funktionsverlaufs und die Relation der Belastungsgröße hinsichtlich des Testgrenzwertes der Sicherheitsgrad SG als Funktion des normierten Belastungswertes NBW; die Beziehung ist schematisch in Abb. 6.15 dargestellt. So ist beispielsweise bei einem HIC = 700 der Normierte Belastungswert NBW = 0,7 und der Sicherheitsgrad SG ≈ 0,55.

**Tab. 6.5** Schutzkriterien und Schutzkriterien-Level an verschiedenen Körperregionen für Frontal- und Seitenkollisionen sowie für Unfälle mit Fußgängern

Körperregion	Schutzkriterium	Schutzkriterien-Level
Kopf	HIC <sub>36</sub> bzw. HPC HIC <sub>15</sub> $a_{3\text{ ms}}$ $a_{5\text{ ms}}$ $\bar{a}_{\max}$ $F$ GAMBIT	1.000 390... 700 80 g 150 g 300 g 378 N 1
Hals	Nij NIC $F_z$ max Zug $F_z$ max Druck $M_y$ max	1 $15 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 4.170 N 4.000 N 57 Nm
Thorax	SI $a_{3\text{ ms}}$ SKompr SKompr RDC $F_{\text{Brust}}$ VC TTI	1.000 60 g 50,8 mm 50 mm 42 mm 11.100 N 1,0 m/s 85 / 90 g
Arme	$F_{\max}$ Kontakt	3.800 N
Becken ( $\alpha_{\text{Becken}} \leq 20^\circ$ ) Becken, allgemein	$a_{3\text{ ms}}$ $a_{5\text{ ms}}$ $F_{\max}$ Symp $F_{\max}$ quer	80 g 130 g 6.000 N 2.500 N
Abdomen ( $\alpha_{\text{Becken}} > 20^\circ$ )	$\bar{a}_{\max}$ res (am Becken)	13 g
Beine	$F_{\max}$ Femor $F_{\max}$ Femor $F_{\max}$ Tibia SKnie TI $F_{\max}$ Kontakt	7.580... 9.070 N 10.000 N 8.000 N 15 mm 1,0 (ehedem 1,3) 10.000 N

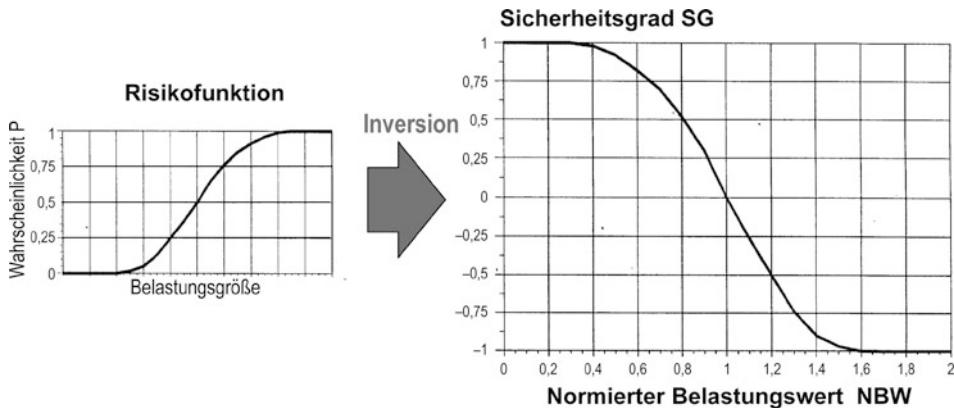
Dieser Sicherheitsgrad lässt sich für jede Körperregion, für die eine Risikofunktion vorliegt und für die Belastungswerte (rechnerisch oder experimentell) ermittelt werden, mit Hilfe des Bewertungsalgorithmus-Programms rechnerisch nach der Beziehung bestimmen:

$$SG_j = f(NBW_j), \quad \text{wobei } -1 \leq SG_j \leq +1 \quad \text{ist}, \quad (6.1)$$

mit  $j$ : aktuelle Belastungsgröße (z. B. HIC, Halsbiegemoment, Oberschenkel-Längskraft u. a.),

$f$ : Bewertungsfunktion für die Belastungsgröße  $j$  und

NBW: Normierter Belastungswert; Quotient aus Belastungswert und Schutzkriterien-Level



**Abb. 6.15** Schematische Darstellung des Überganges von der Risiko- zur Bewertungsfunktion (aus [21])

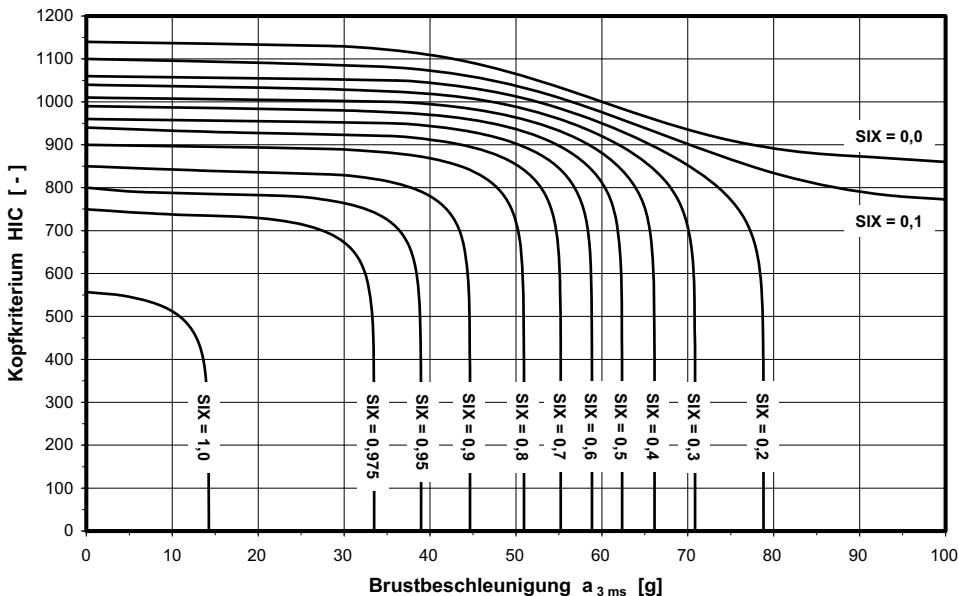
Mittels der Wichtungsfaktoren  $\alpha$  aus der Relevanzstruktur, die sich aus der Verletzungshäufigkeit und den Verletzungsergebnissen des Unfalldatenmaterials unter Berücksichtigung der Unfallsituation, der Insassen-Sitzposition und dem verletzten Körperteil ableiten lassen, wird die Bedeutung der Körperteil-Sicherheitsgrade relativiert. Sie lassen sich somit für alle Körperregionen zum Sicherheitsindex SIX in der Form

$$\text{SIX} = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot \text{SG}_i , \quad \text{wobei} \quad \sum \alpha_i = 1,0 \quad \text{ist,} \quad (6.2)$$

mit  $i$ : Körperregion (z. B. Kopf, Hals, Thorax usw.) und

$m$ : Anzahl der aktuell berücksichtigten Körperregionen ( $1 < m < n$ ;  $n_{\max} = 7$ ) zusammenfassen. Durch den Sicherheitsindex SIX werden die experimentell oder rechnerisch ermittelten Belastungswerte auf einen Wert fokussiert, wobei biomechanische Gegebenheiten und verletzungsstatistische Aspekte berücksichtigt werden. Bei der Reduzierung auf einen einzigen Wert findet allerdings kein Informationsverlust statt, da die Einzelergebnisse erhalten bleiben. Das Sicherheitskriterien-System SiKriS erlaubt somit eine objektive Bewertung der Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen und ermöglicht eine zuverlässige Beurteilung der inneren und der äußeren Sicherheit von Kraftfahrzeugen. Das rechnergestützte Bewertungsverfahren ist beinahe beliebig modifizierbar, erweiterbar und ausbaufähig.

In Abb. 6.16 ist beispielhaft der errechnete Sicherheitsindex SIX als Parameter lediglich für das Kopf-Schutzkriterium HIC und das Schutzkriterium für die Thorax  $a_{3\text{ ms}}$  dargestellt. Die Darstellung erlaubt eine eindeutige Zuordnung: für einen Sicherheitsindex SIX > 0,6 wird keiner der Schutzkriterien-Level für Kopf und Brust überschritten, als Auslegungsziel sollte allerdings ein Index von SIX = 0,8 realisiert werden.

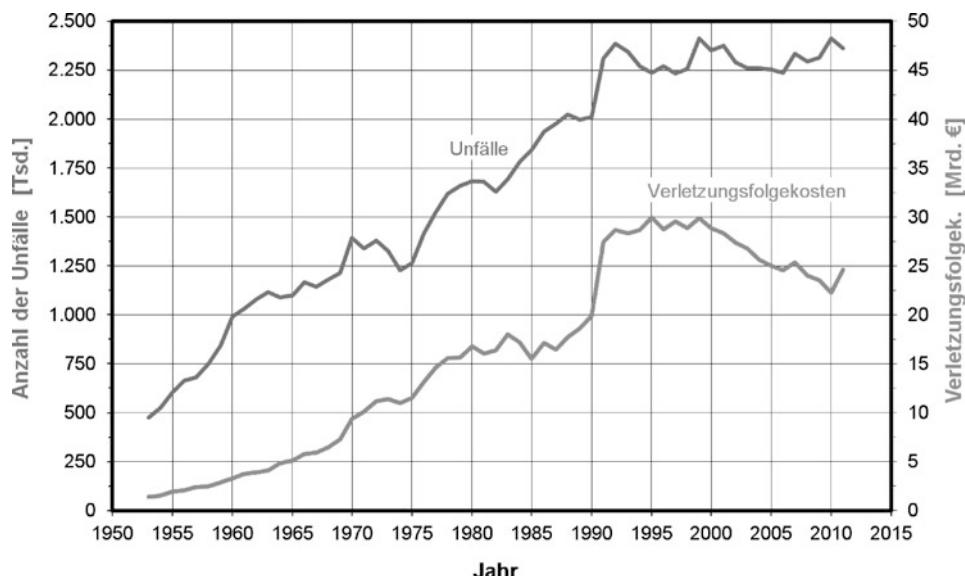


**Abb. 6.16** Abhängigkeit zwischen Kopf- und Brustbelastung mit dem Sicherheitsindex SIX als Parameter (aus [22])

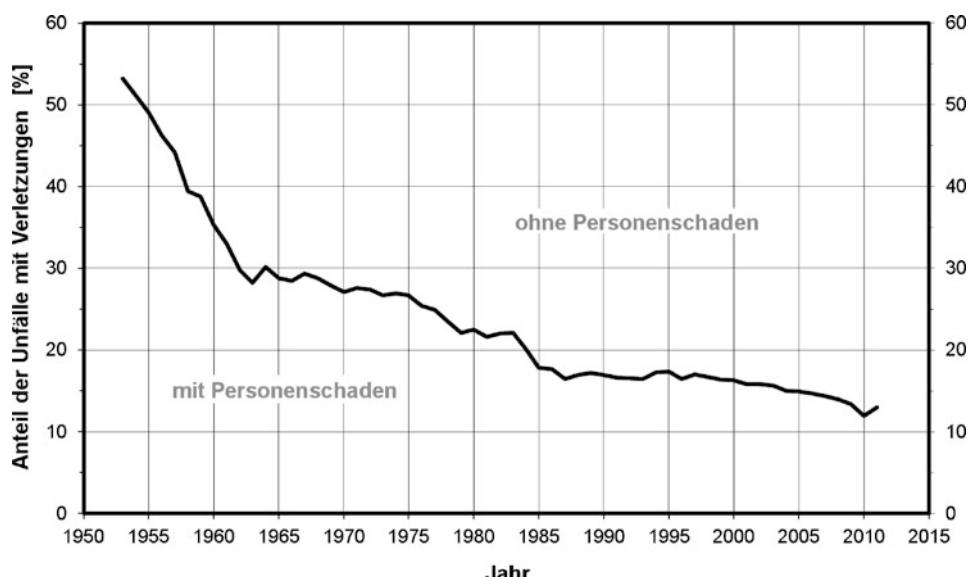
## 6.5 Verletzungsfolgekosten und Sachschäden

Bisher erfolgte die Bewertung der Sicherheit lediglich auf der Basis der Insassen- bzw. der Fußgängerbelastung und der sich dabei ergebenden Verletzungsfolgekosten. Auf die aus den Verkehrsunfällen resultierenden Sachschäden, die neben den Personenschäden eine weitere Art der direkten Unfallfolgen sind (vgl. Abb. 3.61), soll im Folgenden der Vollständigkeit halber eingegangen werden. Nach den detailliert aufbereiteten Unfallzahlen der Bundesstatistik [2] zeigt sich in den Jahren von 1992 bis 1999, dass bei der Anzahl der Unfälle, aber auch bei den Verletzungsfolgekosten nur ein geringer Anstieg (1,2 bzw. 4,3 %) stattfand. Während in der Folgezeit zwischen 1999 und 2011 jedoch bei den Unfällen ein Rückgang um ca. 2,2 % zu verzeichnen war, nahmen die Verletzungsfolgekosten im gleichen Zeitraum etwa 17,7 % ab. Nach dem Anstieg sowohl der Anzahl der Unfälle als auch der Verletzungsfolgekosten in der Zeit bis 1999 stagniert die Anzahl der Unfälle, während die Verletzungsfolgekosten eine nahezu stetige Abnahme aufweisen (Abb. 6.17).

Während sich das Verhältnis der **Unfällen mit Sachschäden** gegenüber der Gesamtzahl aller polizeilich gemeldeten Unfälle, also Unfälle mit und ohne Personenschäden, in den letzten Jahren auf einen konstanten Wert von etwa 87 % einzupegeln scheint (Abb. 6.18), legen die absoluten Zahlen der Unfälle nur mit Sachschäden seit 1992 eine Zunahme von ungefähr 3,3 % (1992: 1,989 Mio., 2011: 2,055 Mio. Unfälle mit Sachschäden) nahe. Danach



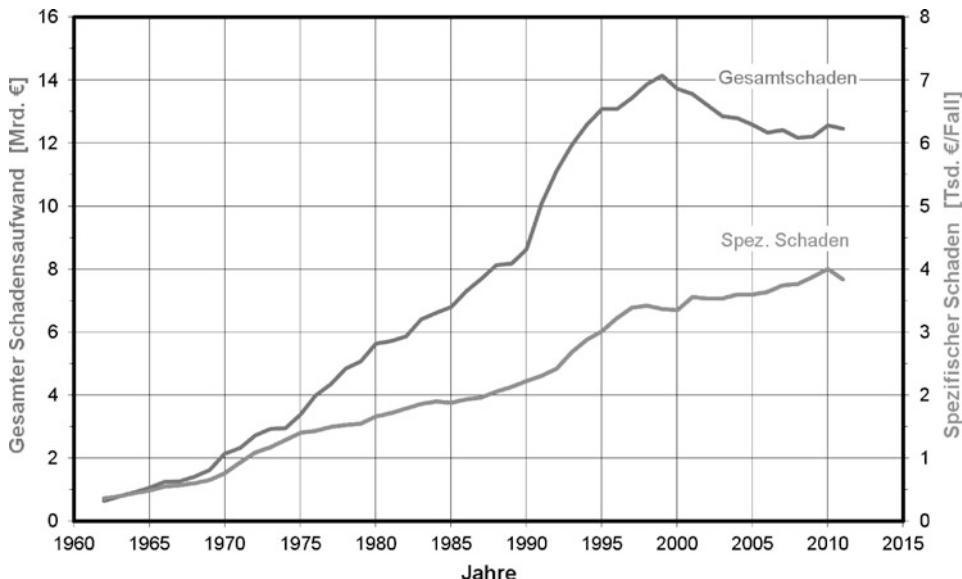
**Abb. 6.17** Anzahl der Unfälle und Verletzungsfolgekosten im Zeitraum 1953 bis 2011 (ab 1991 einschließlich der neuen Bundesländer)



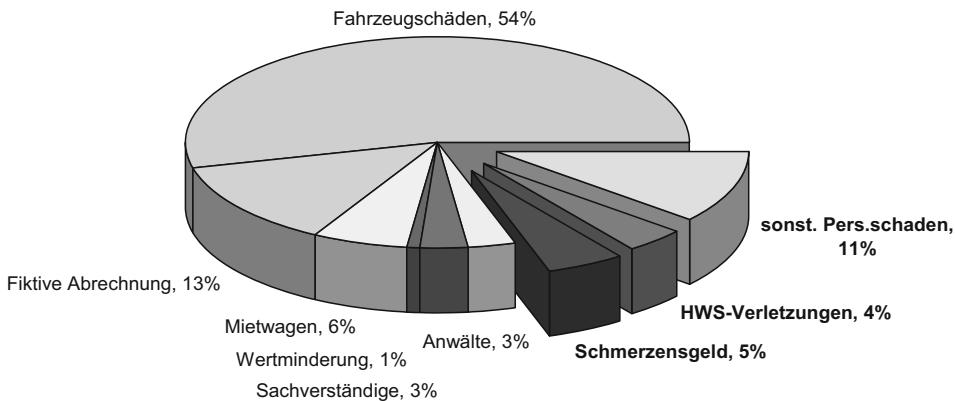
**Abb. 6.18** Verhältnis der Unfälle mit Personen- und Sachschäden im Zeitraum 1953 bis 2011 (ab 1991 einschließlich der neuen Bundesländer)

haben sich die Unfälle mit Sachschäden bezogen auf die Gesamtzahl der Unfälle erhöht; dem gegenüber verminderte sich aber die Zahl der Unfälle mit Personenschäden im gleichen Zeitraum um etwa 22,6 %. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Unfallzahlen auf dem Berichtswesen der Polizei am Unfallort beruhen. Ein geringerer Aufwand bei der Aufnahme von **Bagatellschäden** verzerrt jedoch das Gesamtbild, da Schäden bis zu 2.000,- € überproportional häufig eingestuft werden. Dazu kommen die Unfälle, die polizeilich gar nicht zur Anzeige gebracht werden. Zur Abschätzung der tatsächlichen Anzahl der jährlich auftretenden Unfälle eignet sich ein Vergleich der Unfallquote, nämlich der Bezug der Unfallzahl je 1.000 zugelassener Kraftfahrzeuge, die für 2011 etwa 44,6 betrug, mit der Schadensquote. Nach den Angabe des Gesamtverbands der deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) lag die Anzahl der Schäden, die den Kraftfahrzeug-Versicherern im Jahr 2011 gemeldet wurden, bei 9.722 Mio. [23]. Daraus ergibt sich eine Schadensquote von 78,9 Schäden je 1.000 Versicherungsverträgen, also etwa 77 % mehr als die Unfallquote. Damit dürfte eine Gesamtzahl von etwa 4,2 Mio. Unfällen im Jahre 2011 (ggf. 2,361 Mio. Unfällen nach der Bundesstatistik) als realistisch angenommen werden.

Der seit Anfang der 1960er Jahre in den Jahrbüchern der deutschen Versicherungswirtschaft ausgewiesene **Schadensaufwand** [23] ist in Abb. 6.19 gezeigt. Er betrug im Jahre 2011 insgesamt etwa 12,452 Mrd. €, das ist gegenüber dem Jahr 1999, ab dem erstmals ein Abfall zu verzeichnen ist, mit 14,139 Mrd. € eine Reduzierung um annähernd 11,9 %. Demgegenüber stieg der **spezifische Schaden**, d. h. der Schaden pro reguliertem Fall, seit 1999



**Abb. 6.19** Gesamt-Schadensaufwand und spezifischer Schaden aus Kfz-Unfallversicherungen (nach [23]) für Straßenverkehrsunfälle im Zeitraum 1962–2011



**Abb. 6.20** Schadensaufwand der Versicherungen (im Jahr 1994: 12.58 Mrd. €) für Personen- und Sachschäden (nach [24])

um ca. 13,8 % auf ungefähr 3.830 €/Fall im Jahr 2011. Der spezifische Schaden überschritt im Jahr 1988 die Marke von 2.000 €/Fall und 1995 die von 3.000 €/Fall.

Nach einer in [24] angestellten, versicherungsspezifischen Untersuchung des Schadensaufwandes (Abb. 6.20) verteilten sich die 1994 von den Versicherungen erstatteten Kosten in Höhe von insgesamt 12,58 Mrd. € einerseits zu etwa 20 % auf die Beilegung von Personenschäden und andererseits zu 80 % auf die Entschädigung von **Sachschäden** [25]. Dabei lässt sich zeigen, dass sich die von der Haftpflichtversicherung aufgebrachten Kosten für Personenschäden (Heilbehandlung und Schmerzensgeld) auf ca. 2,52 Mrd. € belaufen, dies sind etwa ein Zehntel der tatsächlich aus Verletzungen resultierenden Folgekosten, die im Jahre 2011 etwa 24,6 Mrd. € betrugen. Der wesentliche Anteil dieser volkswirtschaftlichen Kosten wird offensichtlich nicht durch die Fahrzeugversicherungen bestritten, sondern über andere Versicherungsträger und private Aufwendungen finanziert, insbesondere aber durch gesamtgesellschaftliche Aufwendungen (Ausbildungskosten, Produktionsausfall u. a.) abgedeckt. Die Sachschäden, die sich danach auf etwa 10,1 Mrd. € belaufen, setzen sich zusammen aus der Beseitigung von Fahrzeugschäden (67 %), den Nebenkosten (17 %) und den fiktiven Abrechnungen (16 %), unabhängig von der tatsächlichen Schadensbeseitigung. Unter Berücksichtigung der Dunkelziffer aufgrund der nicht gemeldeten und nicht durch Versicherungen regulierten Unfälle kann davon ausgegangen werden, dass sich die direkten Unfallfolgen im Verhältnis von ungefähr 2 : 1 in Verletzungsfolgekosten und Sachschäden aufteilen. Da die Schadenhöhe bei der Beseitigung von Fahrzeugschäden nach so genannten Reparatur-Crashes bei der Einstufung neuer Fahrzeugmodelle in die Schadensklassen der Kaskoversicherungen eine nicht unerhebliche Rolle spielt, gewinnt die Frage nach der Reparaturfähigkeit von Kraftfahrzeugen als Entwicklungskriterium weiterhin an Bedeutung.

## Literatur

1. Kramer, F., Deter, T.: Zur Quantifizierung der Straßenverkehrssicherheit. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik. Bd. 1. Verlag Information Ambs GmbH, Kippenheim (1992).
2. Statistisches Bundesamt Wiesbaden (Hrsg.): Verkehrsunfälle 2011. Fachserie 8, Reihe 7. Internet-Abruf am 2.7.2012 unter <http://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/VerkehrsunfaelleJ.html>.
3. Lehmann, D.: Aktuelle und zukünftige Vorschriften zur Bewertung der passiven Sicherheit. 2. Internationales Symposium on Sophisticated Car Occupant Safety Systems. Karlsruhe (1994).
4. Grupe, D.: Die Gesetz- und Verordnungsgebung auf dem Gebiet der Fahrzeugsicherheit in Deutschland und der Europäischen Union. 2. International Symposium on Sophisticated Car Occupant Safety Systems. Karlsruhe (1994).
5. European Commission, Enterprise and Industry Directorate-General: CARS 21 – A Competitive Automotive Regulatory System for the 21st Century. (2006).
6. Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5.9.2007 zur Schaffung eines Rahmens für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge (Rahmenrichtlinie), Amtsblatt der europ7, L263/1-160, 9.10.2007.
7. Verordnung (EG) No 661/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13.7.2009 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen, Kraftfahrzeuganhängern und von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge hinsichtlich ihrer allgemeinen Sicherheit, Amtsblatt der europäischen Union, L200/1-24, 31.7.2009.
8. Seiffert, U.: Fahrzeugsicherheit: Personenwagen. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf (1992).
9. Economic Commission for Europe (Hrsg.): World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP 29): How it Works How to Join it, 3. Aufl. United Nations, New York and Geneva (2012).
10. EEVC Working Group 17 Report: Improved Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection Afforded by Passenger Cars (December 1998 with September 2002 updates). <http://www.eevc.org/wgpages/wg17/wg17index.htm>.
11. Glaeser, K.-P.: Der Anprall des Kopfes auf die Fronthaube von PKW beim Fußgängerunfall – Entwicklung eines Prüfverfahrens. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Fahrzeugtechnik, Heft F 14. Bergisch Gladbach (1996).
12. Florian, M.: Darstellung von Schutzmaßnahmen zur Verbesserung der Kraftfahrzeugsicherheit und deren Wirkprinzipien. Großer Beleg an der Technischen Universität Dresden (1996).
13. Appel, H., Kramer, F., Glatz, W., Lutter, G. et al.: Quantifizierung der passiven Sicherheit für PKW-Insassen. Technische Universität Berlin. Bericht zum Forschungsprojekt 8517/2 der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.). Bergisch Gladbach (1991).
14. Zeidler, F.: Die Bedeutung der Energy Equivalent Speed (EES) für die Unfallrekonstruktion und die Verletzungsmechanik. Broschüre zu einem im Rahmen einer Sachverständigenschulung durchgeführten Seminar. Mercedes-Benz, Sindelfingen (1992).
15. Hupfer, P., Richter, R., Wech, L.: Das ECV-Crash-System des TÜV Bayern. Automobiltechnische Zeitschrift 94/5. (1994).
16. Penoyre, S.: A Crash Worthiness Rating System for Cars. 9th International ESV Conference. Kyoto (J) (1984).

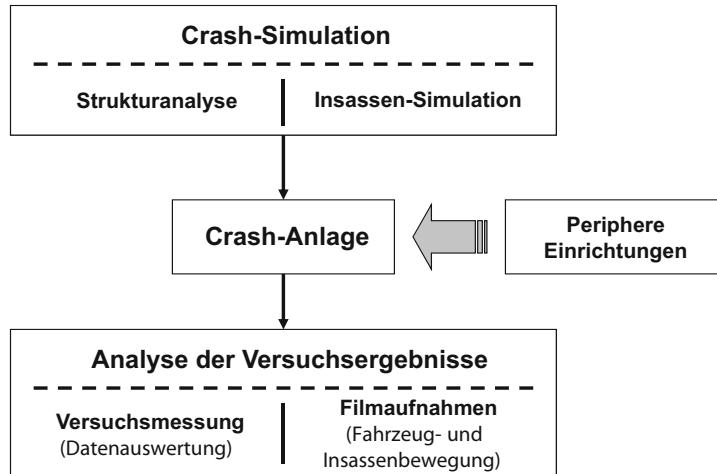
17. World Health Organization: Decade of Action for Road Safety 2011-2020, Saving Millions of Lives. [http://www.who.int/roadsafety/decade\\_of\\_action](http://www.who.int/roadsafety/decade_of_action). (2011).
18. NCAP Crash Test Scores for Previously Tested Motor Vehicles 2004. <http://www.nhtsa.dot.gov/ncap/cars>. (Nov. 2005).
19. Hackney, J.R., Kahane, C.J.: The New Car Assessment Program: Five Star Rating System and Vehicle Safety Performance Characteristics. SAE Technical Paper Series 950888. International Congress and Exposition. Detroit (MI), USA (1995).
20. European Commission, Directorate-General for Mobility and Transport: White Paper – Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a Competitive and Resource Efficient Transport System. European Union (2011).
21. Kramer, F., Fruck, K., Bigi, D.: Sicherheitsindex – eine Möglichkeit zur objektiven Bewertung von Insassenschutzsystemen. Beitrag bei der Tagung „Bedeutung der Rückhaltesysteme in der passiven Sicherheit“ im Haus der Technik. Essen (1995).
22. Reimer, J., Werner, R.: Die Bewertung der passiven Sicherheit bei relevanten Kollisionen mit Hilfe des Sicherheitskriterien-Systems (SiKriS). Diplomarbeit an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden (2005).
23. Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV): Statistisches Taschenbuch der Versicherungswirtschaft. Berlin (2007).
24. Kramer, F.: The Development of the KTI (Kraftfahrzeugtechnisches Institut) – Objectives, Tasks and Organisation as well as planned Projects. Conference The RCAR Meeting 1995. Rotherwick, UK (Sept. 1995).
25. Geier, S.: Neugewichtung bei den Schadensersatzleistungen für Personen- und Sachschäden? Deutscher Verkehrsgerichtstag in Goslar (1996).

Die Zielsetzung der experimentellen Simulation im Rahmen der passiven Sicherheit ist darin zu sehen, Sicherheitsmaßnahmen unter möglichst realistischen Bedingungen nachzubilden und deren Verhalten zu ermitteln. Die Realität ist dabei die Gesamtheit des Verkehrsunfallgeschehens, weil die unter Laborbedingungen ermittelten Versuchsergebnisse eine Aussage über die Wirksamkeit von Sicherheitsmaßnahmen im Unfall ermöglichen sollen. Dazu werden auftretende Deformationen an der Fahrzeugkarosserie und Beschädigungen an den Insassenschutzsystemen untersucht; die auf verwendete Testpuppen einwirkende Kräfte, Beschleunigungen und andere Belastungsgrößen dienen als Kriterium für die Schwere der zu erwartenden Verletzungen. Da jedoch aufgrund der Vielzahl möglicher Unfallkonstellationen nicht jeder einzelne Unfall nachgefahren werden kann, werden Unfallsituationen in der Regel nach international festgelegten Vereinbarungen nachgebildet, die eine bestimmte Unfallgruppe repräsentieren und sich hinsichtlich der Unfall- und Verletzungsmechanik ähnlich verhalten, so z. B. bei Frontal-, bei Seiten- und bei Heckkollisionen. Je nach Fragestellung und Anforderung lassen sich jedoch auch Teilsysteme ableiten, deren Überprüfung ausreicht, um die Funktionalität und Wirksamkeit von Sicherheitskomponenten zu untersuchen und nachzuweisen; hierbei spielen zudem Verfügbarkeit und Kosten, insbesondere in der Entwicklungsphase von Kraftfahrzeugen, eine entscheidende Rolle.

Bei der Auswahl und der Durchführung von Versuchen zur Überprüfung und Bewertung der passiven Sicherheit ist die Berücksichtigung der notwendigen Randbedingungen von Bedeutung, die sich mit Hilfe der „drei großen Rs“ ausdrücken lassen:

- Relevanz hinsichtlich des Unfallgeschehens,
- Repräsentativität hinsichtlich der Unfall- und Verletzungsmechanik sowie
- Reproduzierbarkeit hinsichtlich der Messergebnisse.

Mit der experimentellen Simulation, im vorliegenden Fall also der experimentellen Crashmechanik-Simulation, wird das Ziel verfolgt, das Struktur-Deformationsverhalten und die Insassenbelastung im Falle einer Kollision zu beobachten und zu analysieren. Dies erfolgt mit Hilfe der Crash-Anlage und den zugehörigen peripheren Einrichtungen, wobei die Messungen physikalischer Größen und die Filmaufnahmen des Bewegungsverhaltens der Analyse und schließlich der Dokumentation der Versuchsergebnisse dienen (Abb. 7.1).



**Abb. 7.1** Crash-Anlage und damit verfolgte Zielsetzung (aus [1])

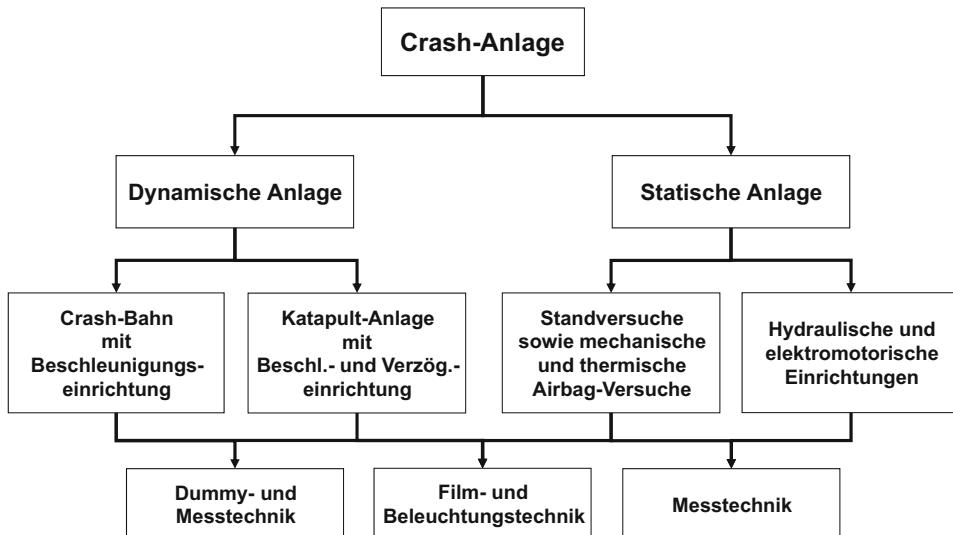
## 7.1 Versucharten

Das Unfallgeschehen ist zu vielfältig, um einzeln oder in seiner Gesamtheit simuliert werden zu können. Daher werden Versuchsarten unterschieden, die nachfolgend im Einzelnen dargestellt werden sollen. Sie repräsentieren einen bestimmten Ausschnitt der Unfallwelt, unterscheiden sich aber in der Simulationsgüte, d. h. sie lassen eine Aussage zu, in welchem Umfang der jeweilige Unfall nachgebildet wird. Zudem ist die Zielsetzung für die experimentelle Simulation von ausschlaggebender Bedeutung, die zum Einen darin zu sehen ist, die Funktionalität von Schutzsystemkomponenten unter Unfallbedingungen zu überprüfen; zum Anderen besteht das Untersuchungsziel darin, die Wirksamkeit von Schutzmaßnahmen hinsichtlich einer bestimmten Unfallkonstellation nachzuweisen.

### 7.1.1 Fahrzeugversuche

Die höchste Simulationsgüte wird bei Versuchen mit vollständigen Fahrzeugen erreicht, und zwar im Hinblick auf deren Bewegungs- und Deformationsverhalten. Die bei Fahr-

zeugversuchen erforderliche Verwendung von anthropometrischen Testpuppen, so genannte Dummys, als Insassen und Fußgänger dient einerseits der Bewegungs- und andererseits der Belastungssimulation, d. h. es werden sowohl die Anprall- und Kontaktstellen ermittelt als auch die „Verletzungs“-Wahrscheinlichkeit nachgebildet. In den Dummys sind dazu Messdaten-Aufnehmer installiert mit deren Hilfe sich Belastungsgrößen in Form von Beschleunigungen, Kontakt- und Deformationskräften, Drehmomenten und Deformationen bzw. Verschiebungen messen lassen (vgl. Abb. 7.2).



**Abb. 7.2** Crash-Anlage und zugehörige Einrichtungen (aus [1])

Bei **frontalen Fahrzeug-Aufprallversuchen** (Full-size crash tests) werden die z. T. fahrfertigen Fahrzeuge auf der Crash-Bahn mittels Beschleunigungseinrichtung (Abb. 7.2) aus dem Stand auf die vorgesehene Geschwindigkeit gebracht und prallen gegen ein definiertes Hindernis, das starr oder deformierbar ist und eine volle oder nur eine teilweise Überdeckung aufweist. In der nachfolgenden Zusammenfassung (Tab. 7.1) ist ohne Anspruch auf Vollständigkeit die Vielzahl der heute üblichen Versuchskonstellationen für Frontalkollisionen dargestellt.

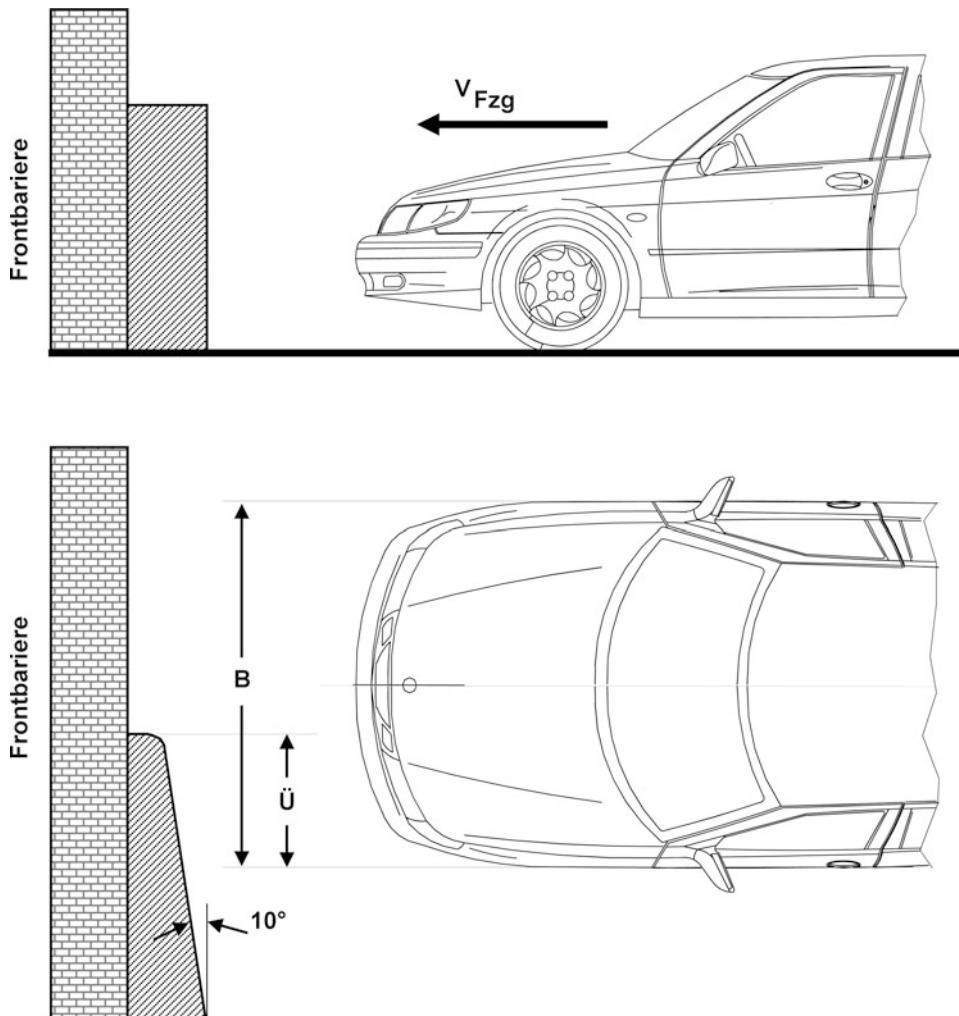
Die Tests haben im Wesentlichen die Überprüfung der Deformations- und der Zellenstruktur sowie der Insassenschutz-Systeme (ISS) zum Ziel; als Beurteilungskriterium dienen die Dummy-Belastungswerte. Dabei muss die Vielzahl zusätzlicher, hersteller-spezifischer Versuchskonstellationen, z. B. der in [2] vorgesehene Frontal-Aufpralltest von zwei PKW zur Überprüfung der Strukturkompatibilität oder der Pfahlauftaill, unberücksichtigt bleiben. Ebenso wenig werden die vielfach durchgeführten Versuche zur äußereren Sicherheit, etwa zur Simulation von Fußgänger-Unfällen oder von Unfällen mit motorisierten Zweirädern und Fahrrädern, dargestellt. Allerdings sind in Tab. 7.1 die Versuche zur Reparaturfreundlichkeit bei Aufprall- und Parkierunfällen sowie zur anfänglichen Einstu-

**Tab. 7.1** Versuchsmethoden zu Frontalkollisionen

Geltungsbereich	Barriere	Überdeckung	Geschwindigkeit [km/h]	Zielsetzung
Europa	deformierbar	40 % fahrerseitig	56	Struktur, ISS, Dummy-Belastung
Euro NCAP	deformierbar	40 % fahrerseitig	64	Struktur, ISS, Dummy-Belastung
USA, Kanada	0°, starr oder deformierbar	100 bzw. 40 %	48... 53	Struktur, ISS, Dummy-Belastung
USA	30°, starr	100 %	48... 53	Struktur, ISS, Dummy-Belastung
NCAP (USA)	0°, starr	100 %	56	Rating-Versuch zur passiven Sicherheit
AMS	15° links, starr	50 % fahrerseitig	55	Rating-Versuch zur passiven Sicherheit
Europa	10°, starr	40 % fahrerseitig	15	Rep.freundlichkeit, VK-Vers.einstufung
USA	starres Pendel	seitlich, mittig	(2,5 mph) 4,0	am Stoßfänger kein Schaden zulässig
Kanada	starres Pendel	seitlich, mittig	(4,8 mph) 8,0	keine Funktionsbeeinträchtigung zulässig

fung der Vollkasko- (VK-) Versicherung einbezogen [3]; auf eine im Jahr 2003 eingeführten Änderung sei an dieser Stelle hingewiesen [4]: Die Anprallfläche wurde um 10° schräggestellt (Abb. 7.3). Beim europäischen Rating-System Euro NCAP war in der Vergangenheit neben der Methodik der Bewertung auch die Aufprallgeschwindigkeit umstritten: es wurde eine Testgeschwindigkeit von  $v = 64 \text{ km/h}$  eingeführt, die, gegenüber der Geschwindigkeit des ECE-Aufprallversuchs mit  $v = 56 \text{ km/h}$ , einer etwa 30 % höheren Aufprallenergie entspricht. Fälschlicherweise wird in diesem Zusammenhang oftmals argumentiert, mit einer höheren Testgeschwindigkeit würde eine entsprechend höhere Sicherheit korrespondieren. Dagegen treten unfallanalytische Fakten, wie die Geschwindigkeitsverteilung bei Frontalkollisionen, der in der Stoßmechanik begründete  $\Delta v$ -Nachteil kleinerer Fahrzeuge bei Fahrzeug/Fahrzeug-Kollisionen sowie die Wahrscheinlichkeit der Seitenkollisionen und die mit einer steiferen Frontstruktur einhergehende höhere Gefährdung der seitlich beaufschlagten Insassen bei Lateralunfällen, allzu häufig in den Hintergrund. Aufgrund der Komplexität des Unfallgeschehens steht daher zu befürchten, dass sich bei einer Erhöhung der Testgeschwindigkeiten beim Frontalaufprall das Verletzungsrisiko der Insassen bei frontalen Unfällen zwar reduzieren lässt, allerdings zu Ungunsten der Insassenbelastung bei Seitenkollisionen.

Bei der Durchführung von **Seitenauftprall-Versuchen** steht in der Regel das zu untersuchende Fahrzeug, während ein Schlitten aus dem Stand mittels einer Beschleunigungseinrichtung auf die Testgeschwindigkeit gebracht wird und auf das stehende Fahrzeug aufprallt. Zur Berücksichtigung der Geschwindigkeitskomponente des sich beim Unfall in Längsrichtung bewegenden Fahrzeugs wird nach der US-amerikanischen Vorschrift FMVSS 214 das um einen Winkel von 27° gedrehte, stehende Fahrzeug von einem schrägwinkligen bewegten Schlitten beaufschlagt. Dementsprechend wirkt der anfängliche Stoßimpuls nicht wie beim ECE-Test genau in lateraler Richtung, d. h. quer zur Fahrtrichtung, sondern unter einem Winkel von 27° nach hinten. Die Testkonstel-



**Abb. 7.3** Versuchsanordnung zum Frontalaufprall zur Überprüfung der Reparaturfreundlichkeit;  $v = 15^{+1} \text{ km/h}$ , 40 % Überdeckung,  $10^\circ$  Schrägstellung (aus [5])

lationen zu Seitenkollisionen nach den europäischen und US-amerikanischen Sicherheitsstandards sind in Abb. 6.5 gegenübergestellt. Beim Pfahlaufprall-Test lassen sich beide Bewegungsmöglichkeiten nutzen: einmal das seitlich bewegte Fahrzeug gegen den an der Crash-Barriere befestigten Pfahl und zum anderen ein auf dem bewegten Schlitten angebrachten Pfahl gegen das stehende Fahrzeug. In den meisten Fällen allerdings wird heute das Fahrzeug gegen den starren Pfahl bewegt. Zur Berücksichtigung der aus dem Wandaufprall resultierenden Steifigkeit der Frontdeformationsstruktur wird beim Kompatibilitätstest eine Seitenkollision mit zwei baugleichen PKW durch-

geführt; erstmals vorgeschlagen in [6]. Damit soll vermieden werden, dass die Frontstruktur zum Schutz der Insassen bei Frontalkollisionen allzu steif ausgelegt wird, sich aber ansonsten bei der Seitenkollision aggressiver auswirken und zu höheren Dummy-Belastungswerten führen kann. In Tab. 7.2 sind übliche Testmethoden zu Seitenkollisionsversuchen, die wesentlichen Testbedingungen und die Zielsetzungen zusammenfassend dargestellt.

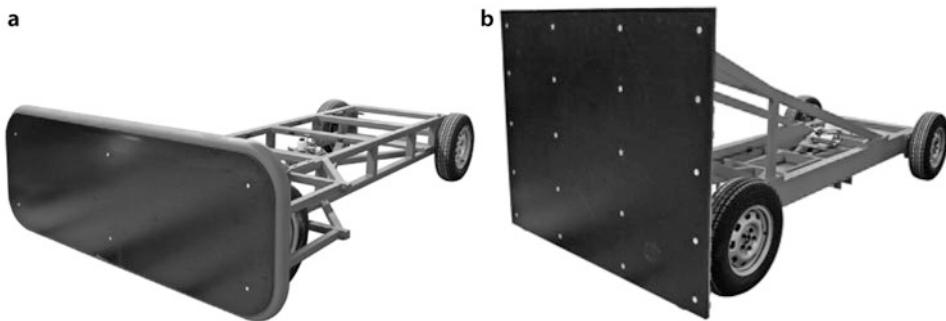
**Tab. 7.2** Versuchsmethoden zu Seitenkollisionen

Geltungsbereich	Barriere	Richtung	Geschw. [km/h]	Zielsetzung
Europa	deformierbar	90°	50	Seitenstruktur, ISS, Dummy-Belastung
Euro NCAP	deformierbar	90°	50	Seitenstruktur, ISS, Dummy-Belastung
Euro NCAP	Pfahl, $\varnothing \geq 254$	90°	29	Seitenstruktur, ISS, Dummy-Belastung
USA	deformierbar	27°	(33,5 mph) 54	Seitenstruktur, ISS, Dummy-Belastung
USA	starr	90°	(20,0 mph) 32	Dichtigkeit der Kraftstoffanlage
SI-NCAP (USA)	deformierbar	27°	(38,0 mph) 61	Rating-Versuch
Hersteller-spez.	Pfahl, $\varnothing \geq 250$	90°	$\leq 35$	Seitenstruktur, ISS, Dummy-Belastung
Hersteller-spez.	PKW-Front	90°	50	Kompatibilität bei Seitenkollisionen

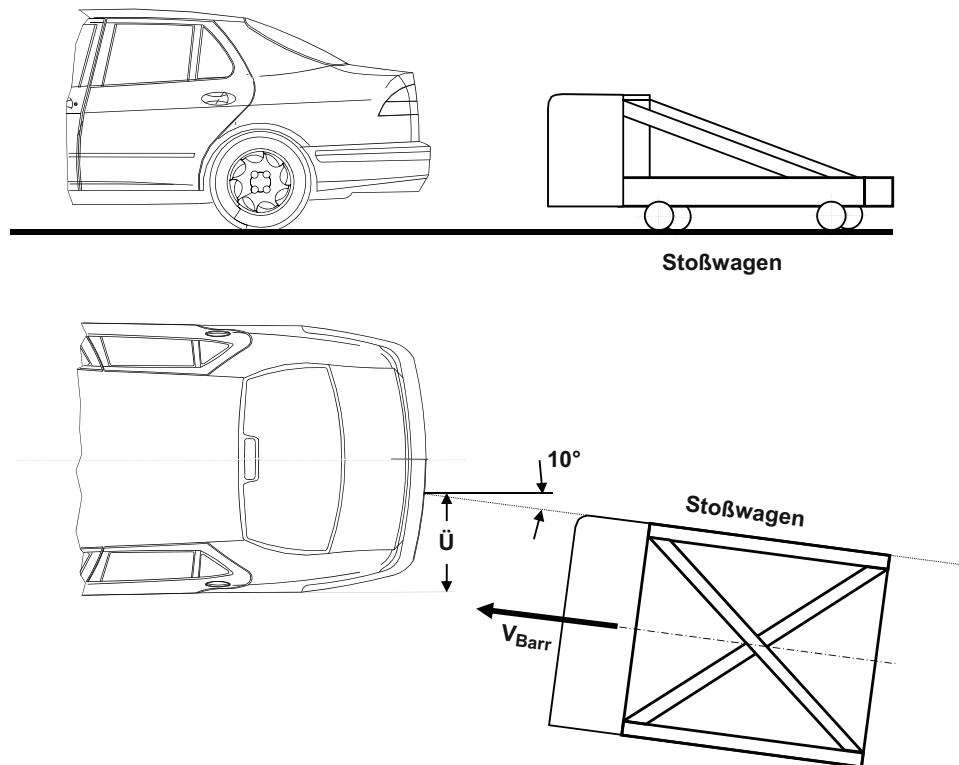
Mit Hilfe der **Heckaufprall-Versuche** wird vornehmlich das Ziel verfolgt, gemäß FMVSS 301 die Dichtigkeit der Kraftstoff-Versorgungsanlage zu überprüfen. Dazu prallt ein Schlitten mit einer starren Barriere gegen das stehende Fahrzeug; die dazu verwendete fahrbare Barriere ist in Abb. 7.4 dargestellt. Unmittelbar nach dem Test wird das Fahrzeug auf eine Gitter-Plattform gespannt und um seine Längsachse in bestimmte Positionen gedreht; die dabei ggf. austretende Tankflüssigkeit darf eine definierte Leckmenge nicht überschreiten. Neben der Dichtigkeitsprüfung lässt sich beim Heckaufprall-Test das Deformationsverhalten der Heckstruktur, die Türöffnungsmöglichkeit, die Sitzbefestigung und die Lehnfestigkeit sowie der Insassenschutz gemäß FMVSS 208 untersuchen.

Wie bei Frontalkollisionen dienen die Niedriggeschwindigkeitstests bei den Heckaufprall-Versuchen der Überprüfung der Reparaturfreundlichkeit bei Aufprall- und Parkierunfällen sowie der Einstufung der Vollkasko- (VK-) Versicherung [3]; auch hierbei ist seit 2003 die Anprallfläche um 10° gedreht [4] (Abb. 7.5). Eine Zusammenfassung der Versuchsmethoden zur Heckkollision ist in Tab. 7.3 dargestellt.

Die Gewährleistung für den Erhalt des **Überlebensraums der Fahrgastzelle** kann auf verschiedene Weise, nämlich statisch oder dynamisch, überprüft werden. Bei der statischen Methode wird der Dachrahmen seitlich mit einer bestimmten Last beaufschlagt. Zur dynamisch Überprüfung kann das Fahrzeug durch Befahren einer einseitigen Rampe und plötzlichem Lenkungseinschlag zum Überschlag gebracht werden. Üblich ist jedoch das seitliche Bewegen des Fahrzeugs auf einem um 23° geneigten Schlitten (Roll-over-



**Abb. 7.4** Fahrbare Barriere für Heck-Aufprallversuche, gemäß ECE-R 34 (a) bzw. FMVSS 208/301 (b); entnommen aus [7]

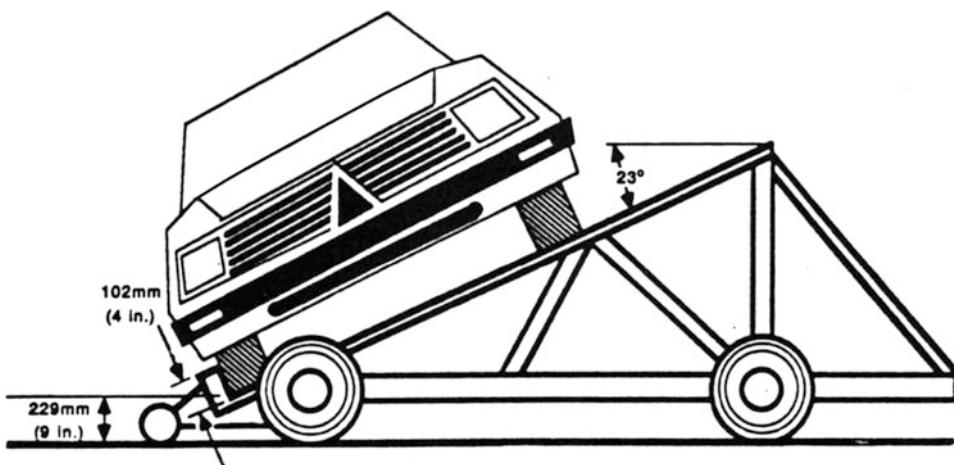


**Abb. 7.5** Versuchsanordnung zum Heckaupprall zur Überprüfung der Reparaturfreundlichkeit;  $v = 15^{+1} \text{ km/h}$ , 40 % Überdeckung,  $10^\circ$  Schrägstellung (aus [5])

Schlitten); es wird abgeworfen durch die Einleitung einer starken Schlittenverzögerung mittels Deformationselementen, so dass sich das Fahrzeug mehrfach seitlich überschlägt (Überschlag- oder Roll-over-Versuch). Die Versuchsanordnung wird in Abb. 7.6 gezeigt.

**Tab. 7.3** Versuchsmethoden zu Heckkollisionen

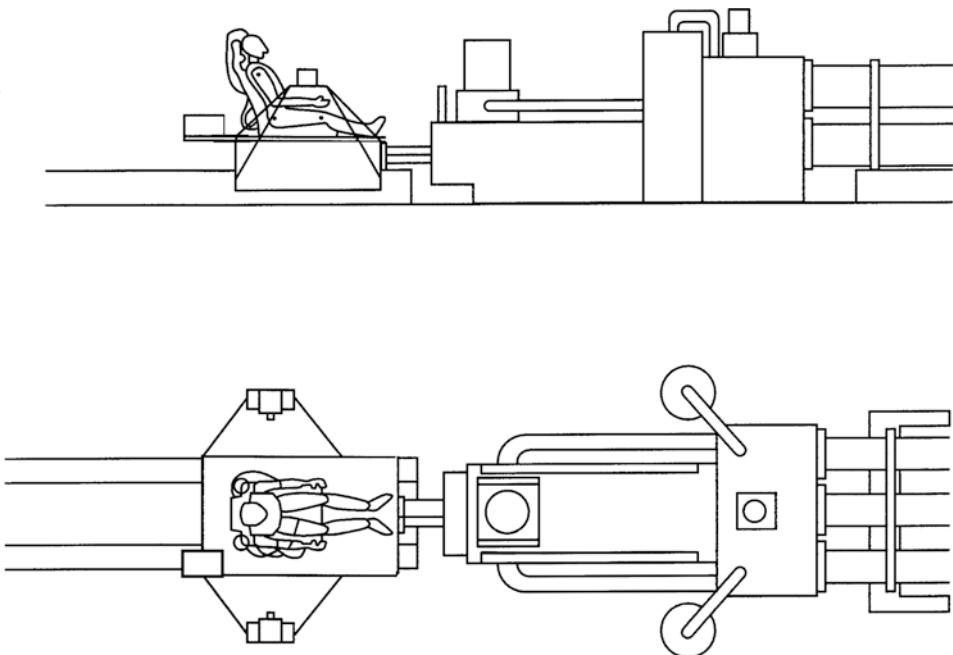
Geltungsbereich	Barriere	Überdeckung	Geschw. [km/h]	Zielsetzung
USA	180°, starr	100 %	80	Tankdichtigkeit, Strukturverhalten, Sitze
Europa	170°, starr	40 % fahrerseitig	15	Rep.freundlichkeit, VK-Vers.einstufung
USA	starres Pendel	seitlich, mittig	(2,5 mph) 4,0	am Stoßfänger kein Schaden zulässig
Kanada	starres Pendel	seitlich, mittig	(4,8 mph) 8,0	keine Funktionsbeeinträchtigung zulässig

**Abb. 7.6** Anordnung zum Überschlag-Versuch mittels Roll-over-Schlitten (aus [9])

### 7.1.2 Schlittenversuche

Mit Hilfe von Fahrzeug-Versuchen wird die passive Sicherheit unter Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen der Deformationsstruktur und dem Rückhaltesystem überprüft, während Schlittenversuche in erster Linie der Auslegung von Rückhaltesystem-Komponenten dienen. Der wesentliche Vorteil von Schlittenversuchen liegt darin begründet, dass die Wirkung von Insassenschutzsystemen ohne Zerstörung eines kompletten Fahrzeuges untersucht werden kann. Zur Aufnahme des Insassenschutzsystems wird der Schlitten zwar oftmals mit einer Teilkarosserie versehen, diese ist jedoch derart versteift, dass sie mehrere Tests (bis zu 50 Versuche) übersteht, ohne deformiert zu werden. Daher lassen sich nur mit großem Aufwand und daher in den seltensten Fällen verletzungsrelevante Intrusionen, wie Eindringen des Lenkrades, der Armaturentafel und des Fußraums, nachbilden.

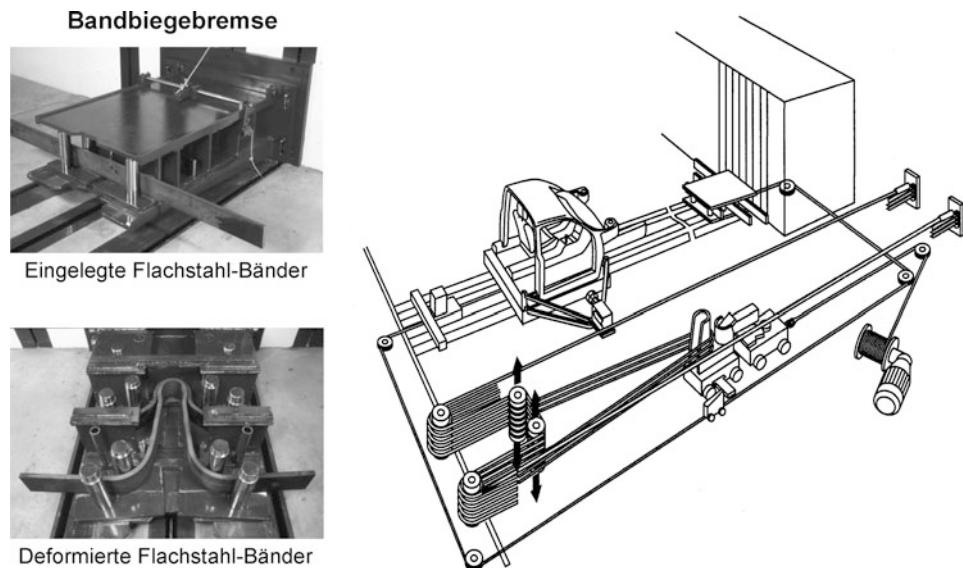
Zur **Simulation von Frontalkollisionen** kommen zwei unterschiedliche Prinzipien zum Einsatz: der Beschleunigungs- und der Verzögerungsschlitten (vgl. Abb. 7.2). Der **Beschleunigungsschlitten** (Katapultschlitten) wird aus der Ruhelage entgegen der Fahrtrichtung beschleunigt, wobei der veränderbare zeitliche Verlauf der Beschleunigung der Verzögerung des Fahrzeugs beim Wandaufprall entspricht (Abb. 7.7). Der sich nach der Beschleunigungsphase, in der die Messung der Dummy-Belastung erfolgt, rückwärts bewegende Schlitten wird mittels einer Bremse wieder zum Stillstand gebracht. In der Beschleunigungsphase wird der Schlitten über einen Hydraulikkolben mit einer Kraft von bis zu 1.600 kN angetrieben. Eine entsprechend vorgespannte Gassäule, die durch eine Membrane vom Hydrauliköl getrennt ist, setzt die dazu erforderliche Energie frei. Zur Regelung des Ölstroms ( $\leq 90.000 \text{ l/min}$ ) und damit des Beschleunigungssignals ( $\leq 55 \text{ g}$ ) kommen mehrere unterschiedlich große Servoventile zum Einsatz [10]. Eine andere Möglichkeit der Ölstromversorgung besteht in der Formgebung des Steuerkolbens, der beim Öffnen des Hydrauliköl-Durchlasses in bestimmten Stellungen unterschiedliche Querschnitte freigibt. Allerdings muss bei diesem Steuerungsprinzip zur Realisierung eines bestimmten Beschleunigungsverlaufs der Steuerkolben ausgetauscht werden [11]. Dieses nach der Hersteller-Firma benannte Bendix-Prinzip wurde allerdings durch die schnell und präzise arbeitende Servoventil-Regelung weitgehend verdrängt.



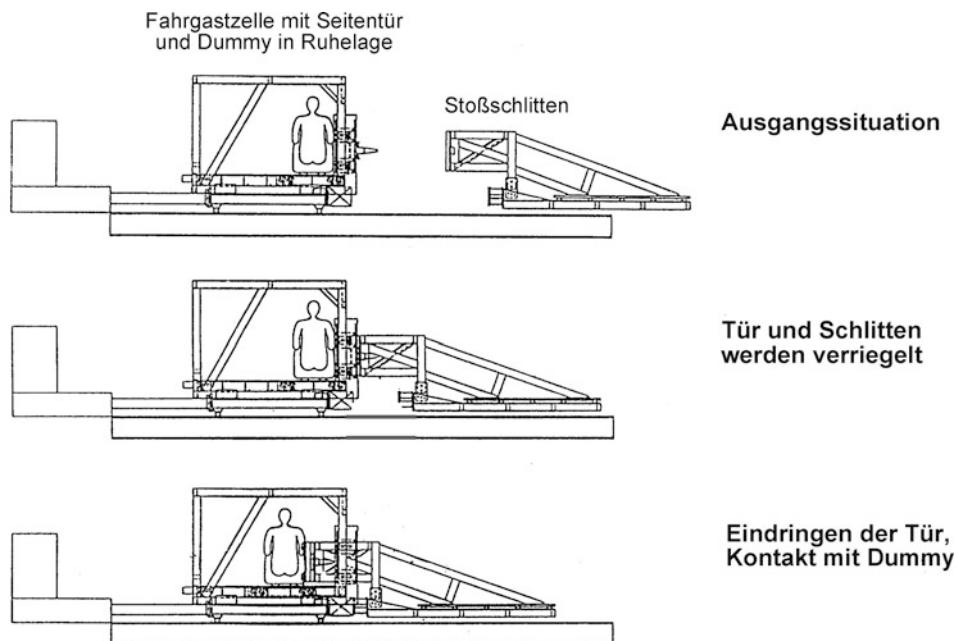
**Abb. 7.7** Beschleunigungsschlitten mit hydraulischen Antrieb (nach [10])

Der **Verzögerungsschlitten** wird aus der Ruhelage mit Hilfe eines Zugseils in Fahrtrichtung auf eine definierte Testgeschwindigkeit gebracht (Antriebsphase); dabei erfolgt der Seilantrieb durch eine Energiespeicherung in Form eines Fallgewichts, eines Hydraulik-, Elektro- oder Verbrennungsmotors oder vorgespannter Gummiseile. Beim Erreichen der Testgeschwindigkeit wird der Seilantrieb vom Schlitten getrennt, so dass sich der Schlitten in einem nicht-beschleunigtem Zustand befindet (Freilaufphase). Die Verzögerung des Schlittens (Verzögerungsphase) erfolgt wegen der fehlenden Fahrzeug-Deformationsstruktur mittels einer stationären Verzögerungseinrichtung (vgl. Abb. 7.2), bei der die Bewegungsenergie in Formänderungsarbeit oder Strömungsenergie umgewandelt wird. Als Deformationselemente dienen Kunststoffrohre, die mit einem am Schlitten befestigten Dorn beim Eindringen aufgeweitet werden [12]. Die Variationsmöglichkeiten, einen vorgegebenen Verzögerungsverlauf nachzubilden, sind dabei jedoch äußerst gering, sie reichen allerdings aus, um den beispielsweise in [12] definierten Verzögerung/Zeit-Korridor einhalten zu können. Ein anderes Prinzip wird durch die parallele Anordnung mehrerer, ggf. gestufter Deformationsrohre realisiert. Mit diesem Prinzip lässt sich zwar der Anstieg, nur begrenzt jedoch der Abfall eines vorgegebenen Verzögerung/Zeit-Verlaufs nachbilden. Üblicherweise werden heute wegen der Variationsmöglichkeiten Bandbiegebremse-Einrichtungen eingesetzt, bei denen eine am Schlitten befestigte „Nase“ handelsübliche Flachstahl-Bänder durch Biegung deformiert; diese sind durch Rollen fixiert und in mehreren, hintereinander angeordneten Stufen angeordnet. Eine neuere Verzögerungseinrichtung beruht auf dem Prinzip der Verdrängung von Flüssigkeiten, bei der eine als schiefe Ebene ausgebildete, am Schlitten montierte Nase einen Hydraulikkolben senkrecht zur Schlittenbewegung verschiebt, der wiederum Hydrauliköl durch definierte Ventilquerschnitte verdrängt und so den geforderten Verzögerungsverlauf realisiert [13]. Die Messung der Belastung am Dummy erfolgt ab Verzögerungsbeginn. Abbildung 7.8 zeigt einen Schlitten mit verstieifter Karosserie und die als Bandbiegebremse ausgelegte Verzögerungseinrichtung.

Aufgrund der komplexeren Verletzungsmechanik gestaltet sich, je nach Anspruch der Simulationsgüte, eine **Schlittenanlage für Seitenkollisionen** weitaus komplizierter, da die verletzungsinduzierende, eindringende Seitentür aus dem Stillstand auf die definierte Eindringgeschwindigkeit gebracht werden muss, um die bei Seitenkollisionen vorherrschenden Bewegungsgrößen, insbesondere die Kontaktgeschwindigkeit zwischen Tür und Insassen, realistisch nachbilden zu können. Bei der in Abb. 7.9 gezeigten TRW-Schlittenanlage befindet sich die Fahrgastzelle einschließlich des einsitzenden Dummy und der mit Deformationselementen am Türrahmen befestigten Seitentür in Ruhelage. Der mittels Seilantrieb auf Kollisionsgeschwindigkeit gebrachte Stoßschlitten ist mit einer Schließvorrichtung versehen, mit der zum Berührungszeitpunkt die Tür mit dem Schlitten verriegelt wird. Im weiteren Verlauf dringt die Seitentür mit der ihr vom Schlitten aufgezwungenen Geschwindigkeit in die Fahrgastzelle ein und kontaktiert den noch in Ruhestellung verharrenden Dummy. Die dabei ermittelten Belastungen entsprechen weitestgehend den in Fahrzeug-Versuchen gemessenen Werten. Bei weniger aufwendig ausgelegten Schlitten-



**Abb. 7.8** Verzögerungsschlitten mit Verzögerungseinrichtung (nach [14])



**Abb. 7.9** Schlittenanlage zur Simulation von Seitenkollisionen nach TRW [15]

anlagen zu Seitenkollisionstests müssen hinsichtlich Belastung und zeitlichem Verlauf der Bewegungsgrößen mehr oder wenig große Abstriche bei der Simulationsgüte in Kauf genommen werden.

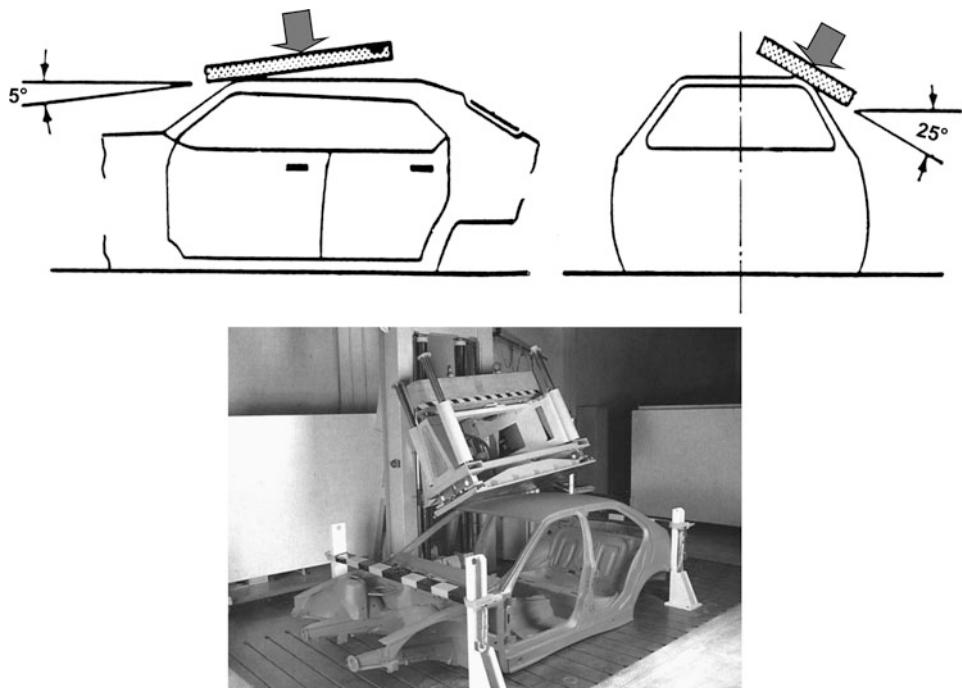
### 7.1.3 Komponentenversuche

Mit Hilfe von Komponententests werden Untersuchungen zur Funktionalität von Subsystemen der passiven Sicherheit durchgeführt. Diese können sich auf das Deformations- und Intrusionsverhalten äußerer oder innerer Strukturen beziehen, sie können aber auch die Funktion und Wirkungsweise von Komponenten des Insassenschutzsystems zum Ziel haben. Dazu werden Rohkarosserien, Baugruppen wie Stoßfänger mit Längsträgern, Lenkeinrichtung mit Vorbau und Teilsysteme wie Sitz, Instrumententafel, Gurtsystem und Airbag vorbereitet und für die jeweiligen Untersuchungen bereitgestellt. Ein Großteil dieser Komponentenversuche ist nach Art und Kriterien in gesetzlichen Vorschriften, Standards oder hersteller-spezifischen Lastenheften festgelegt.

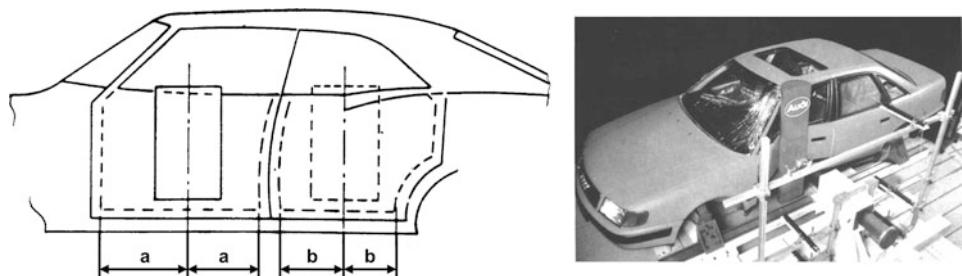
Zur Untersuchung der Steifigkeits- und Deformationsverhältnisse an **Rohkarosserien** und **Baugruppen** werden beispielsweise

- statische Dacheindrück-Versuche (Abb. 7.10) nach FMVSS 216 zur Sicherstellung des Überlebensraumes bei Überschlag-Unfällen,
- statische und dynamische Versuche an Stoßfängern, Deformationselementen und Längsträgern in Anlehnung an FMVSS 215 zur Überprüfung der Nachgiebigkeit und des Energieabsorptionsvermögens bei Parkier- und Bagatellunfällen,
- statische Türeindrück-Versuche (Abb. 7.11) nach FMVSS 214 a zur Sicherstellung der Türsteifigkeit bei Seitenkollisionen – ersetzt durch den dynamischen Seitenaufprall-Versuch nach FMVSS 214,
- statische Zugversuche an den Gurtverankerungspunkten (Abb. 7.12) nach FMVSS 210 zur Sicherstellung der Karosseriefestigkeit an den entsprechenden Befestigungspunkten an der B- und C-Säule,
- dynamische Anprallversuche nach FMVSS 204 mittels eines Torsoblocks zur Überprüfung der Nachgiebigkeit und des Energieabsorptionsvermögens beim Lenkradanprall sowie
- dynamische Anprallversuche mittels einer freifliegenden Kopfkalotte (Free Motion Head Form) nach FMVSS 201 zur Überprüfung der Nachgiebigkeit und des Energieabsorptionsvermögens der Kontaktstellen (Verkleidung am Dachrahmen sowie an A-, B-, C- und ggf. D-Säulen) im Innenraum

unter Aufbringung einer definierten quasi-statischen oder dynamischen Belastung durchgeführt. Die einzelnen Versuchsanordnungen und Ausführungsvorschriften sind im jährlich erscheinenden, überarbeiteten und erweiterten SAE-Handbuch (z. B. [8, 9, 16, 17, 18]) detailliert beschrieben und dargestellt.

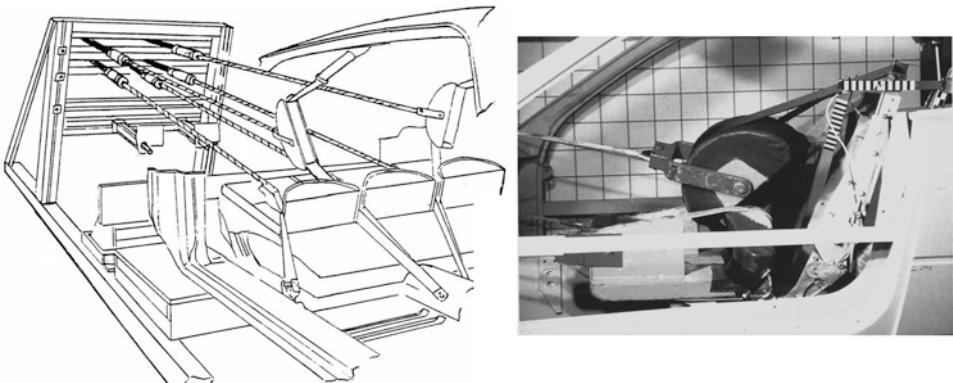


**Abb. 7.10** Versuchsanordnung zum statischen Dacheindrück-Versuch zur Überprüfung der Dachsteifigkeit (nach [16])



**Abb. 7.11** Anordnung zum statischen Türeindrück-Versuch zur Überprüfung der Türsteifigkeit (nach [17])

**Teilsysteme** dienen der Untersuchung der Funktionalität von Insassenschutzsystemen unter Unfallbedingungen, die über die Dauer ihres Einsatzes (zunächst 12, dann 15 Jahre, mittlerweile zeitlich unbegrenzt) sichergestellt sein muss. Dabei bedient man sich künstlicher Alterungseffekte durch Zeitraffung hinsichtlich verschiedener Umwelteinflüsse wie Erschütterungen, Temperatur, Sonnenlicht, Feuchtigkeit und anderer Langzeitwirkungen.



**Abb. 7.12** Anordnung zum Zugversuch der Gurtverankerungspunkte zur Überprüfung der Karosseriefestigkeit (entnommen aus [18])

Als Beispiele für Funktionsuntersuchungen an Teilsystemen lassen sich ohne Anspruch auf Vollständigkeit folgende Tests benennen:

- Statische und dynamische Versuche an Sitzen, Sitzlehnen und Kopfstützen nach FMVSS 201 und 202 zur Überprüfung der Festigkeit und des Energieabsorptionsvermögens bei Frontal- und Heckkollisionen,
- dynamische Anprallversuche an Instrumententafeln mittels einer freifliegenden Kopfkalotte nach FMVSS 201 zur Überprüfung der Nachgiebigkeit und des Energieabsorptionsvermögens der Kontaktstellen sowie Überprüfung scharfer Kanten durch Mindestradien,
- statische und dynamische Prüfung an Kinder-Rückhaltesystemen nach FMVSS 210 zur Überprüfung der Festigkeit, Funktion und Bedienbarkeit,
- statische und Dauerlauf-Versuche an Gurtbändern, Befestigungsbeschlägen und Aufroll-Automaten sowie Umweltsimulation nach FMVSS 209 und 210 zur Überprüfung der Festigkeit, der Abriebfestigkeit, der Funktion und der Beständigkeit aufgrund von Umwelteinflüssen,
- dynamische Versuche an aufroller- oder schlossseitig angeordneten Gurtstraffern zur Überprüfung der Festigkeit und der Funktion und
- Aufblas- und Standversuche mit Fahrer-, Beifahrer und Seiten-Airbags zur Überprüfung der Formgebung, der Funktion und der Wirksamkeit auf Erwachsenen- und Kinder-Dummys bei OoP-(Out-of-Position-)Situationen (nach FMVSS 208) unter Einbeziehung der Abdeckungen und der Verkleidungsteile; diese OoP-Versuche werden mitunter fälschlicherweise als „statische“ Versuche bezeichnet, was jedoch unberücksichtigt lässt, dass es sich hierbei um hoch-dynamische Prozesse handelt.

Die Aufzählung der hier genannten Versuchsarten orientiert sich im Wesentlichen an gesetzlich vorgeschriebenen oder standardisierten Versuchsanordnungen und -prozeduren. Diese Vorschriften sind in der Regel jedoch lediglich Mindestanforderungen an Wirk-

samkeit und Funktionalität von Schutzmaßnahmen. Es ist daher nahe liegend, dass bei Fahrzeug-Herstellern und Zulieferern von Insassenschutzsystemen insbesondere im Entwicklungsstadium ein erheblich umfangreicherer Versuchs- und Erprobungsumfang stattfinden muss, dessen Beschreibung sich hier allerdings aus Vertraulichkeitsgesichtspunkten verbietet. Daneben unterliegen Erprobungsversuche einem ständigen Wandel, der sich, bevor sich die Versuche standardisieren lassen, an der Neuentwicklung von Schutzmaßnahmen ausrichtet.

---

## 7.2 Versuchseinrichtungen und -anlagen

Die Durchführung der im vorstehenden Unterkapitel genannten Versuchsarten erfolgt in Versuchslabors und auf Crash-Anlagen, die je nach Aufgabenstellung und Anforderung in Versuchshallen und – heute allerdings in geringerem Umfang – im Freien stattfinden. Die **Freianlagen** dienen der Simulation von Fahrzeugbegegnungsunfällen (Nutzfahrzeuge, Busse und Personenkraftwagen) im Gegenverkehr und unter bestimmten Winkeln und zeichnen sich durch den Platzbedarf für die Anlaufstrecke und den erforderlichen Auslauf aus. Der wesentliche Nachteil liegt in der Abhängigkeit von der Witterung (Temperatur, Wind, Regen oder Schnee und Lichtverhältnisse) und beschränkt sich daher auf das notwendigste Maß an Fällen, die sich in der Versuchshalle aufgrund der Platzverhältnisse nicht durchführen lassen.

Die weitaus größte Anzahl von Fahrzeug- und Schlitten-Versuchen findet auf **Crash-Anlagen** in Versuchshallen statt. Diese umfassen die eigentliche Crash-Bahn (bis zu 160 m lang), an deren Ende sich der aus Beton gegossene Crash-Block befindet. Auf der Frontseite des Crash-Blocks ist eine Montageplatte eingegossen, an der eine Holzplatte für Frontalaufprall-Versuche oder verschiedenen Vorbauten (Kraftmesswand, winklige oder versetzte Barrieren mit und ohne Deformationselementen oder mit Pfahlvorbau) befestigt werden kann. Die Crash-Bahn lässt sich unterteilen in die Beschleunigungs-, die Beruhigungs- und die Verzögerungs- bzw. Crash-Strecke. Die Länge der Verzögerungsstrecke setzt sich zusammen aus dem Deformations- und Auslaufweg und aus der Baulänge der Vorbauten; sie beträgt etwa 3 Meter. Die Länge der Beschleunigungsstrecke richtet sich nach der zu erzielenden Kollisionsgeschwindigkeit (bis zu 90 km/h) und der maximal zugelassenen Fahrzeug- oder Schlittenbeschleunigung ( $\leq 0,3g$ ) und hat damit einen Bedarf von ungefähr 160 m. Da das Fahrzeug bzw. der Schlitten unbeschleunigt gegen das Hindernis prallen soll, liegt zwischen der Beschleunigungs- und der Verzögerungsstrecke eine Beruhigungsstrecke von etwa 2 m Länge. Die Gesamtlänge der Crash-Bahn beträgt somit ungefähr 170 m. Sollen höhere Geschwindigkeiten erzielt werden, muss entweder die Gesamtlänge entsprechend größer ausgelegt oder die maximal zulässige Fahrzeugbeschleunigung erhöht werden.

Zur Beschleunigung von Fahrzeug oder Versuchsschlitten dient ein mittig geführtes Endlos-Stahlseil in einem Schacht unterhalb der Crash-Bahn, dessen **Antrieb** über eine Seilrolle erfolgt, die durch einen Hydraulik-, Elektro- oder Verbrennungsmotor angetrie-

ben wird. Der Antrieb wird durch Soll/Ist-Vergleich der Seilgeschwindigkeit dergestalt geregelt, dass die am Ende der Beschleunigungsphase vorgesehene Aufprallgeschwindigkeit ausreichend zuverlässig, mit einer Abweichung von  $\pm 0,1 \text{ km/h}$ , realisiert werden kann. Andere Arten der Beschleunigung sind heute immer seltener in der Verwendung eines Fallgewichts oder eines Gummiseil-Antriebes zu sehen. Dabei ergibt sich die vorgesehene Geschwindigkeit aus einer bestimmten Auszugslänge des Fallgewichts bzw. der Gummiseile. Das Fahrzeug oder der Schlitten wird mittels einer Seilwinde gegen das über das Zugseil aufgebrachte Fallgewicht bzw. die Gummiseil-Spannkraft in eine bestimmte Position gebracht und auf der Crash-Bahn verriegelt. Anschließend wird das Seil der Winde vom Fahrzeug bzw. vom Schlitten gelöst, die sich dann in vorgespanntem Zustand in Ruheposition befinden. Der Anlauf erfolgt durch die Entriegelung, und das Fahrzeug bzw. der Schlitten bewegt sich mit zunehmender Geschwindigkeit auf den Crash-Block zu.

Seitlich an der Crash-Bahn sind in der Regel Räumlichkeiten für die Katapultanlage und zur Fahrzeug- oder Schlittenvorbereitung sowie Labors für Komponentenversuche, für Messtechnik und für die Dummy-Kalibrierung untergebracht.

Über Crash-Anlagen in der hier beschriebenen Art verfügen aus nahe liegenden Gründen alle Automobil-Hersteller und die Zuliefer-Firmen für Insassenschutzsysteme wie Gurt- und Airbag-Systeme, Sitze, Kinder-Rückhaltesysteme u. a.; aber auch Hochschul-Institute und Überwachungsinstitutionen (DEKRA, TÜV etc.) und in zunehmendem Umfang auch innovative Systementwicklungsfirmen und Dienstleistungsunternehmen sind mit derartigen Einrichtungen ausgestattet.

---

### 7.3 Anthropometrische Testpuppen (Dummies)

Das wesentliche Kriterium für die Wirksamkeit von Sicherheitsmaßnahmen ist die erwartete Verletzungswahrscheinlichkeit und die Verletzungsschwere von Verkehrsteilnehmern bei Unfällen. Aus nahe liegenden Gründen verbietet sich der Einsatz von Menschen in der experimentellen Simulation, da eine Verletzungsgefährdung nicht ausgeschlossen werden kann. Im Rahmen der Biomechanik-Forschung wurde und wird daher unter Zuhilfenahme von Freiwilligen, menschlichen Leichen, Tieren, mathematischen und mechanischen Modellen der Zusammenhang zwischen unfalltypischen Verletzungen und messbaren Belastungen hergestellt, der es gestattet, im Versuch Belastungswerte messtechnisch zu ermitteln, um damit Aussagen für das Verletzungsrisiko treffen zu können. Bei der experimentellen Simulation kommen daher mechanische Modelle zum Einsatz, die von Größe und Masse, von der Massenverteilung und vom Bewegungsverhalten dem menschlichen Körper weitgehend entsprechen. Sie sind mit Aufnehmern zum Messen mechanischer Größen, d. h. Belastungsgrößen, ausgestattet, aus denen sich Belastungswerte ermitteln lassen. Diese anthropometrischen Testpuppen oder Dummies bestehen normalerweise aus einem Skelett aus Metall oder Kunststoff, dessen Körperteile gelenkig miteinander verbunden sind. Muskeln und Weichteile werden durch einen Kunststoffschaum nachgebildet, die Körperoberfläche besteht aus einer abnehmbaren Kunststoffhaut. Ein wesentliches Merkmal der

Konstruktion, der Ausstattung und der Zusammensetzung ist die zu erzielende Reproduzierbarkeit der Messergebnisse bei gleichen Versuchsbedingungen.

### 7.3.1 Anforderungen

Die meisten Dummies werden in frontalen, lateralen oder heckseitigen Fahrzeug- oder Schlittentests eingesetzt. Die entscheidende Anforderung für die Auslegung des Dummies ist daher zunächst die **Belastungsrichtung**. Vorhaben, in denen ein universell einsetzbarer Dummy für alle Anwendungsfälle entwickelt werden sollte, sind bisher gescheitert [19]. Der Einsatz der komplexen Dummies ist allerdings nicht in allen Fällen erforderlich; vielmehr sind bei einigen Komponentenversuchen vereinfachte Körperteil-Ersatzmodelle ausreichend, so z. B. der Torsoblock für den Body-Block-Versuch zur Überprüfung der Nachgiebigkeit der Lenkeinrichtung, der Oberschenkel beim Impaktor zur vorgesehenen Stoßfänger-Prüfung oder die freifliegende Kopfkalotte zur Überprüfung der Motorhaube und des Innenraums. Der Grund für derartige **Simplifizierungen** ist in der Mehrdeutigkeit der Versuchsergebnisse, in der höheren Fehlerwahrscheinlichkeit und in der teuren und aufwendigeren Kalibrierung des komplexen Dummies mit seiner umfangreichen Instrumentierung zu sehen.

In Sicherheitsversuchen kommt am häufigsten der 50 %-Dummy zum Einsatz, d. h., 50 % der männlichen Population sind kleiner als der 50 %-Wert, der den Durchschnittswert der Häufigkeitsverteilung einer anthropometrischen Reihenuntersuchung [20] repräsentiert. Zur Untersuchung extremer Situationen hinsichtlich der **Anthropometrie** (Größe und Masse) der Insassen werden zwei weitere Dummy-Größen verwendet: ein 5 %-Frau-Dummy und ein 95 %-Mann-Dummy für kleine bzw. große Insassen. Der 5 %-Dummy repräsentiert dabei Größe und Gewicht des Wertes der Population, bei der 5 % aller Frauen kleiner und der 95 %-Dummy die anthropometrischen Daten der Population, bei denen 95 % aller Männer kleiner sind. Für diese beiden Dummies wurden die Gelenkabstände, die Körperteilmassen und deren Schwerpunkte sowie die Nachgiebigkeiten der Körperteile bei Belastung über einen Skalierungsansatz aus der Ähnlichkeitsmechanik vom 50 %-Dummy abgeleitet [21].

Die schwierigste Aufgabe bei der Dummy-Entwicklung ist sicherlich die Nachbildung der mechanischen Charakteristika von menschlichen Gliedmaßen und Körperpartien; diese Eigenschaft wird als **Simulationsgüte** oder **Biofidelity** bezeichnet. So muss der bei Versuchen eingesetzte Dummy das gleiche Bewegungsverhalten und die gleichen Steifigkeits- und Dämpfungseigenschaften aufweisen wie sie der menschliche Insasse beim Anprall während eines Unfalls zeigt. Das bedeutet, dass der Dummy im Versuch die Kontaktstruktur in gleicher Weise deformieren muss wie sie im Unfall durch den Menschen beschädigt wird. Ist dies nicht der Fall, so wird der Dummy die Kontaktstruktur nicht oder unter einem falschen Winkel treffen oder eine andere Ausprägung der Deformation hervorrufen; seine Gelenkigkeit und Nachgiebigkeit wäre unzutreffend nachempfunden. Der Dummy wird beim Testeinsatz einer Situation ausgesetzt, in der der menschliche Körper verletzt wür-

de oder Gliedmaßen brechen können. Im Gegensatz dazu darf der Dummy bzw. dessen Glieder nicht entzweigehen, sondern der Anprall muss so erfassbar sein, dass der Grad der entsprechenden Überlast, die bei menschlichen Körperteilen zu Frakturen führt, messbar sein muss und somit bewertet werden kann.

Die eingangs geforderte **Reproduzierbarkeit** bedeutet beim Dummy-Einsatz, dass zum einen der gleiche Dummy bei wiederholt durchgeführten, gleichen Anprallversuchen zu gleichen Messergebnissen führt. Andererseits muss sichergestellt sein, dass sich bei Verwendung verschiedener Dummies bei ansonsten identischen Versuchen auch die gleichen Messresultate einstellen müssen. Die entscheidende Voraussetzung dafür ist die Kalibrierung von Dummies, die auf der Basis von Messungen bei definierten Versuchsbedingungen und Sichtkontrollen durchzuführen sind. Da die Kalibrierung zeit- und kostenintensiv ist, muss der Dummy eine größere Anzahl von Versuchen, z. B. 15 Versuche ohne Gurt- oder Airbag-System, überstehen, ohne Zerstörungen aufzuweisen. Zudem müssen die definierten Kalibrier-Grenzkurven, die eine zuverlässige Funktion garantieren, eingehalten werden. Üblicherweise aber wird ein Dummy nach fünf Tests, selbst wenn am Dummy keine äußerlich sichtbaren Beschädigungen auftreten, einer Kalibrierung unterzogen, um die Reproduzierbarkeit der Dummy-Messwerte sicherzustellen.

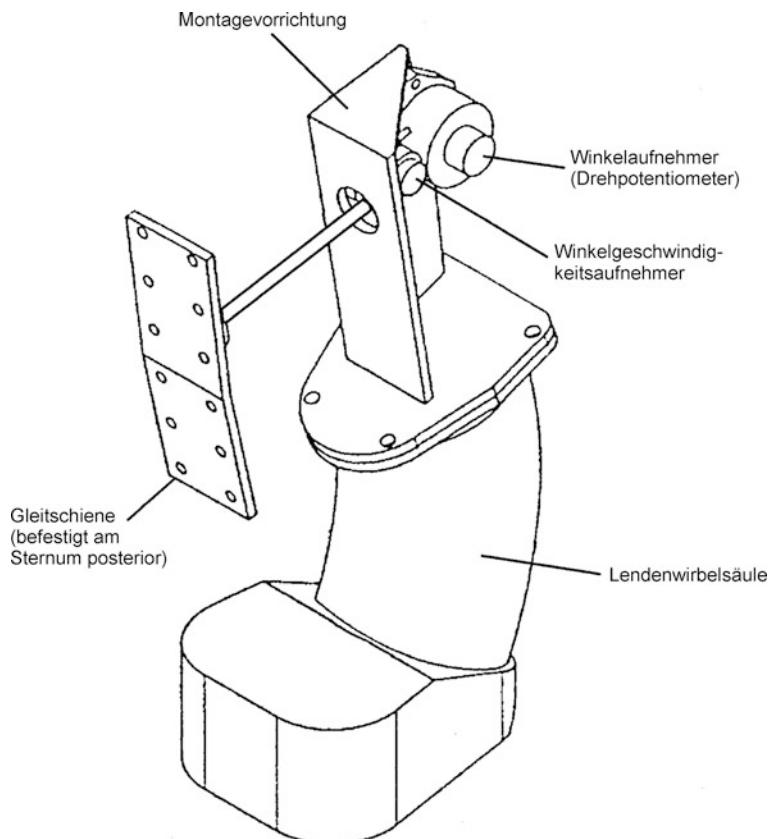
### 7.3.2 Instrumentierung

Verletzungskriterien für die verschiedenen Körperregionen des lebenden Menschen werden in Schutzkriterien am Dummy, die in gesetzlichen Vorschriften und Sicherheitsstandards festgelegt sind, überführt. Beide Kriterien werden in physikalischen Größen ausgedrückt, die sich am Dummy messen lassen. Die Toleranzschwelle korrespondiert dabei mit den Test-Grenzwerten, die bei gesetzlich vorgeschriebenen Versuchen anzustreben sind, um die Schutzkriterien nicht zu überschreiten. Die am Dummy installierten Aufnehmer ermöglichen das Messen dieser physikalischen Größen.

Die heute übliche Methode, Verletzungen im **Kopf** zu bewerten, besteht darin, die Resultierende der drei-axial gemessenen, translatorischen Beschleunigung im Kopfschwerpunkt zu messen und daraus das Head Injury Criterion (HIC; Gl. 3.4) zu berechnen. Der Messbereich dieser piezoresistiven Aufnehmer reicht von 200 bis 2.000 g. Da die biomechanische Basis für den HIC-Wert aus dem direkten Kopfanprall resultiert, wird die HIC-Berechnung nur auf ein Intervall von maximal 15 bzw. 36 ms begrenzt. Bei Versuchen werden im Dummy-Kopf mitunter Spitzenwerte von bis zu 200 g gemessen. Zur Berechnung des GAMBIT-Wertes sind neben den translatorischen Beschleunigungskomponenten die orthogonalen Komponenten der rotatorischen Beschleunigungen erforderlich. Deren Messung erfolgt durch die Ableitung der Signale aus drei-axialen Drehwinkel-Geschwindigkeitsaufnehmern mit einem Messbereich von maximal 100 krad/s<sup>2</sup>.

An der **Hals- und der Lenden-Wirbelsäule** werden als Schutzkriterien Biegemomente, Biegewinkel, Kompressionen und Scherkräfte gemessen. Dabei ist die Messung von Kräften und Momenten mit Hilfe von piezoresistiven Aufnehmern problemlos möglich. Sie sind entweder ein-axial ausgelegt oder weisen mehrere Komponenten auf.

Bei direkter Belastung des **Thorax** treten viele der Verletzungen aufgrund ausgedehnter Brustdeformationen auf. Andererseits resultieren Verletzungen aus den trägheitsbedingten Reaktionen innerer Organe, die zu Überdehnungen und Zerreißungen führen. Derartige Verletzungen geschehen, ohne dass es zu größeren Rippendeformationen kommt. Daher werden im Thorax sowohl Beschleunigungen als auch Eindrückungen messtechnisch erfasst. Zur Ermittlung des Thoracic Trauma Index (TTI; Gl. 3.15) werden bei lateraler Belastung am US-SID-Dummy Maximalwerte der Beschleunigungen an der Brust-Wirbelsäule (T 12) und an der seitlichen Rippe gemessen. Die Kombination der Deformationsgeschwindigkeit und der relativen Thorax-Eindrückung führt zur Berechnung des Viscous Tolerance Criterion (VC; Gl. 3.12), wobei die Geschwindigkeit aus der messtechnisch ermittelten Eindrückung errechnet wird. Die Eindrückungen werden mittels Drehpotentiometern (Abb. 7.13) oder mit kapazitiven bzw. induktiven Wegaufnehmern, die Beschleunigungen mit piezoresistiven Beschleunigungsaufnehmern erfassen.



**Abb. 7.13** Anordnung des Drehpotentiometers zur messtechnischen Erfassung der Brustindrückung (aus [22])

Bei Frontal-Kollisionsversuchen führt die Penetration des Beckengurts zu Verletzungen des **Abdominalbereichs**. Als Submarining-Kriterium werden daher Drehwinkel des Beckens aus rotatorischen Geschwindigkeiten integriert oder Dehnmessstreifen-Kraftaufnehmer beidseitig auf dem Beckenkamm zur Messung eingesetzt. Bei lateraler Belastung werden Eindrückungen und Kräfte gemessen.

Frontale Belastungen des **Beckens** werden durch Knie- und Oberschenkelkräfte eingeleitet und führen gelegentlich zu Frakturen der Gelenkpfanne, während laterale Belastungen zu Frakturen des knöchernen Beckens führen können. Es erscheint daher als ausreichend, im Dummy-Becken drei-axiale Beschleunigungen zu messen, für die jedoch bei Frontal-Kollisionsversuchen keine Test-Grenzwerte festgeschrieben sind. Lediglich in FMVSS 214 ist für Lateralbelastungen ein Spitzenwert von bis zu 130 g zulässig. Im europäischen Regelwerk ECE-R 95 hingegen wird eine Kraftmessung in der Schambeinfuge mit einem Grenzwert von bis zu 10 kN zugelassen.

Die Verletzungsmechanik der **unteren Extremitäten** umfasst Frakturen der knöchernen Struktur, Rupturen und Dislokationen der Gelenke sowie Beschädigungen der Bänderstruktur. Für den Bereich Knie – Oberschenkel – Becken ist als Schutzkriterium die Oberschenkel-Längskraft, gemessen mit Kraftaufnehmern, etabliert. Daneben werden in zunehmendem Maße Längskräfte und Biegemomente an den Unterschenkeln sowie Scherkräfte im Kniegelenk gemessen.

### 7.3.3 Verwendete Dummies und ihr Einsatz

Es wurde bereits dargelegt, dass sich der Einsatz lebender Menschen im Rahmen der experimentellen Simulation aufgrund der zu erwartenden Belastung nur auf Ausnahmefälle – Freiwilligen-Versuche im unterkritischen Belastungsbereich – beschränken kann. Daher wurden bereits seit Ende der 1940er Jahre Dummies zunächst für Frontkollisionen (SAM, VIP, HYBRID I, II und III) und seit Ende der 1970er Jahre für Seitenkollisionen (US-SID, Bio-SID, EuroSID bzw. ES 2) entwickelt. Zur Untersuchung der an zunehmender Bedeutung gewonnenen HWS-Distorsionen wurde an der Technischen Hochschule Chalmers in Göteborg (S) seit Ende der 1990er Jahre der BioRID (Biofidelic Rear Impact Dummy) entwickelt, seit 2002 vertrieben und im Versuch eingesetzt. Er zeichnet sich insbesondere durch eine realistische Nachbildung der Wirbelsäule aus [23]. Der zeitliche Ablauf der **Dummy-Entwicklung** ist in Tab. 7.4 dargestellt.

Bei der Festlegung des Hüftpunktes zur Festlegung des für die Entwicklung entscheidenden Sitz-Referenzpunktes (SRP: Seat Reference Point) wird eine metallene, anatomische Gliederpuppe, **H-point manikin**, eingesetzt, mit deren Hilfe die Einsatzkräfte am Sitz simuliert werden können. Liegt dieser Punkt fest, so muss sichergestellt sein, dass ein Dummy die entsprechende Position einnimmt; d. h., die H-Punkt-Maschine dient dann der Einstellung der Sitzposition und der Lehnenneigung. Bei diesem stark vereinfachten Dummy (Abb. 7.14) werden Torso-, Gesäß-, Oberschenkel- und Unterschenkel-Gewichte in ein Gestell, bestehend aus gelenkig verbundener Sitz- und Rückenform sowie Ober-

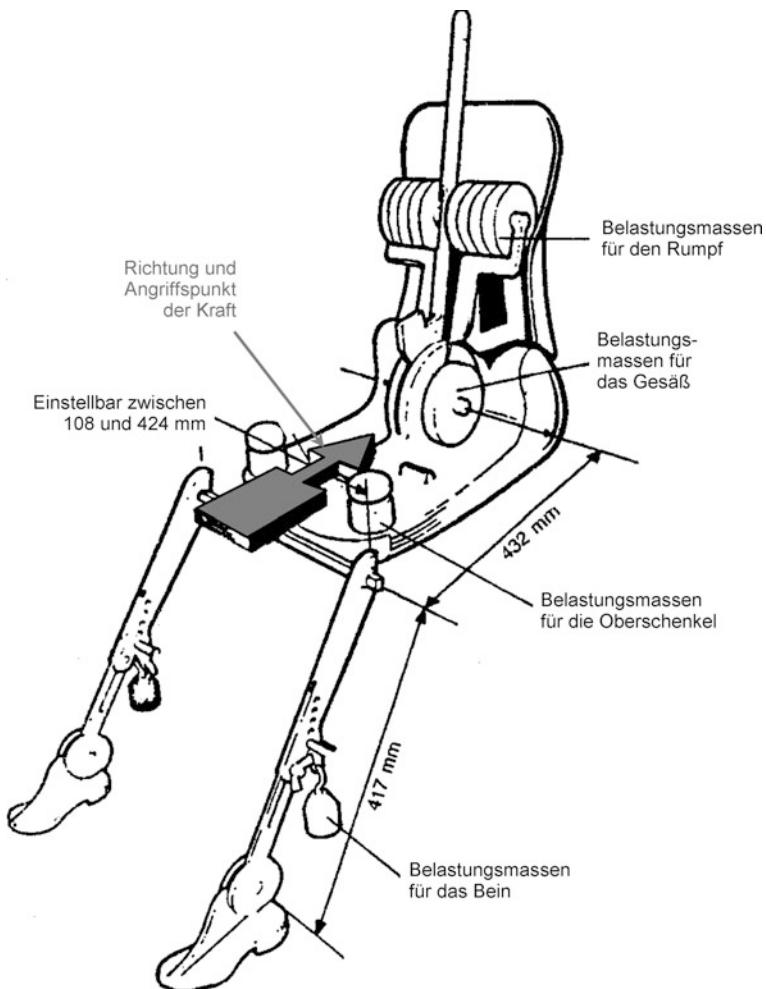
**Tab. 7.4** Historie der Dummy-Entwicklung zur fahrzeugsicherheitstechnischen Anwendung (nach [23], [24] und [25])

Bezeichnung	Entwickler	Start der Entwickl.	Erläuterungen
<b>ALDERSON</b>	Alderson Res.Lab. & Sierra Engineering	1946	Mechanische Nachbildungen menschlicher Glieder
<b>SAM</b>	Sierra Engineering	1949	Dummy für die US-Air Force
<b>GARD DUMMY</b>	Grumman-Alderson	1952	Forschungs-Dummy
<b>FBP-Dummy</b>	Alderson Res.Lab.	1954	Weiterentwicklung des GARD DUMMYs zur Anwendung für US-Air Force und Automobiltechnik
<b>ASP-Dummy</b>	Alderson Res.Lab.	1956	Dummy für APOLLO-Weltraumprojekt
<b>VIP</b>	Alderson Res.Lab.	1962	Dummy in sitzender Position für Fahrzeugtechnik (50, 5-, 95 %) und Kinder-Dummy (3 und 6 Jahre)
	Holloman Air Force Base	1963	Vergleichsstudie zwischen SIERRA SAM- und ARL VIP-Dummy sowie Freiwilligen im Test; Ergebnis: VIP-Dummy realistischer als SIERRA SAM
<b>VIP 50 A und B</b>	Alderson Res.Lab.	1964-69	Verbesserungen; Basis: VIP 50 %-Dummy; Weiterentwicklung von Dummies zum Testen vom Schleudersitzen bei der US-Navy und der US-Air Force
<b>ACTD</b>	ARL & SIERRA	1950-70	Entwicklung des Crash-Test-Dummies für Fahrzeugsicherheit (ACTD: Automotive Crash Test Dummy); 50 und 95 %-Dummy (männlich) sowie 5 %-Dummy (weiblich) auf der Basis GARD DUMMY, VIP und SAM
<b>HYBRID I</b>	Alderson Res.Lab.	1971	Standardisierung des ARL- und des SIERRA 50 %-Dummies (männlich) zu einem Dummy; Kopf von SIERRA
<b>HYBRID II</b>	General Motors (GM)	1972	Verbesserung des HYBRID I hinsichtlich Kopf, Hals, Schulter, Wirbelsäule und Knie. Ausführliche Dokumentation
<b>Part 572</b>	NHTSA	1973	Einführung des HYBRID II-Dummies als Standard für FMVSS 208, Part 572 (daher die Benennung)
<b>ATD 502</b>	NHTSA ⇒ GM	1973	Verbesserung des Part 572 (= HYBRID II) hinsichtlich Kopf, Hals, Gelenke, Rippen; Neuentwicklung der Wirbelsäule und der Knie; Verbesserung der Körperhaltung (ATD: Automotive Test Dummy)
<b>HYBRID III</b>	NHTSA ⇒ GM	1976	Weiterentwicklung des ATD 502; Neuentwicklung des Halses und des Thorax; mehr Aufnehmer. Optional einsetzbar für HYBRID II als Standard für FMVSS 208
<b>US-SID</b>	NHTSA ⇒ Univ. of Michigan Transportation Inst. (UMTRI)	1979	Side Impact Dummy (SID) auf der Basis des HYBRID II; neue Thorax-Entwicklung zur Anwendung bei Seitenkollisionen. Standard für FMVSS 214
<b>EuroSID</b>	EEVC-WG9 ⇒ TRL, INRETS, APR, BASF & TNO	1983	Neuentwicklung eines Dummies für Seitenkollisionen; Anwendung bei Tests nach ECE-R 95
<b>HYBRID III</b>	HUMANETICS & SAE	1988	Ableitung des 95 %-Dummy (männlich) und des 5 %-Dummy (weiblich) auf der Basis HYBRID III 50 %-Dummy
<b>Bio-SID</b>	GM, FTSS & SAE	1988	Entwicklung eines realistischeren Dummies für Seitenkollisionen (BIO-SID: Biofidelic Side Impact Dummy) auf der Basis des HYBRID III
<b>BioRID</b>	Technische Hochschule Chalmers (S), SAAB & VOLVO, Vertrieb: Robert A. Denton Inc., später HUMANETICS	1998	Entwicklung eines realistischeren Dummies für Heckkollisionen (BioRID: Biofidelic Rear Impact Dummy) modifiziert auf der Basis des HYBRID III. Neuentwicklung der Wirbelsäule

schenkeln, eingehängt, so dass sich die Belastungen des Sitzpolsters und der -lehne einstellen.

Die Einsitz-Prozedur ist in ECE-R 14 festgeschrieben; schwierig dabei gestaltet sich das Einsetzen deshalb, weil die Eindringtiefe aufgrund des viskos-elastischen Verhaltens der Sitzpolster von der Eindringgeschwindigkeit anhängt.

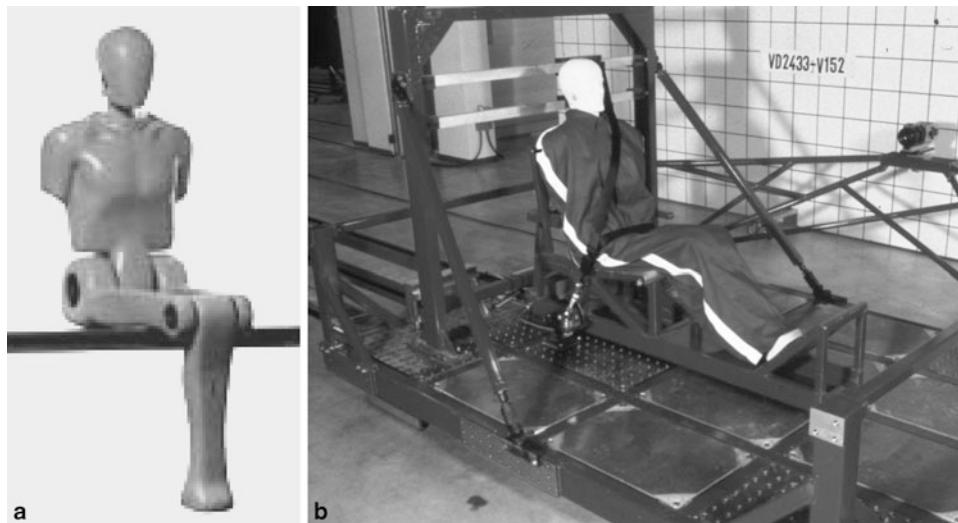
In den frühen 1960er Jahren wurde von TNO Road-Vehicle Research Institute der vereinfachte **TNO-10-Dummy** zur Überprüfung der Gurtsystem-Auslegung (ECE-R 16) entwickelt und 1970 eingeführt. Er setzt sich zusammen aus Kopf, Hals, Torso, Oberschenkeln, aber nur einem Unterschenkel (Abb. 7.15). Die Gelenke zwischen den Körpereinzelteilen können eingestellt werden. Seine Größe beträgt 174 cm, und sein Gewicht kann variiert



**Abb. 7.14** H-Punkt-Maschine (H-point manikin) zur Festlegung des Sitz-Referenzpunktes (aus ECE-R 14)

werden zwischen 70 und 82 kg. Am Dummy selbst lassen sich keine Beschleunigungs- oder Kraftmessungen vornehmen. Vielmehr wird bei dem im ECE-Reglement 16 vorgeschriebenen Schlittentest, bei dem das Reißen des Gurtes und das Brechen von Komponenten ausgeschlossen sind, lediglich die Grenze der Dummy-Vorverlagerung festgelegt.

Mit Einführung des ECE-Reglements 44 zu Kinder-Rückhaltsystemen in Kraftfahrzeugen im Jahre 1980 stellte TNO eine parallel dazu entwickelte **Kinder-Dummy-Serie** vor, die Kinder im Alter von neun Monaten ( $P_{\frac{3}{4}}$ ), drei (P3), sechs (P6) und zehn Jahren (P10) repräsentieren. Hinzu kam 1984 ein Dummy, der einem neugeborenen Kind entspricht. Zur Gewährleistung eines realistischen Bewegungsverhaltens sind Schulter- und Hüftgelenk als

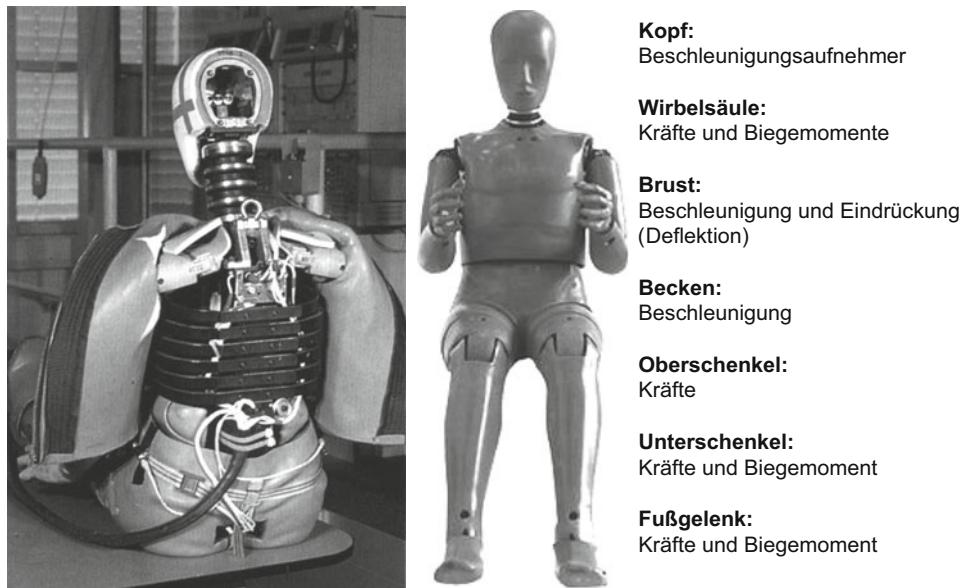


**Abb. 7.15** Struktur des TNO-10-Dummy (a) und im Einsatz beim Schlittenversuch (b)

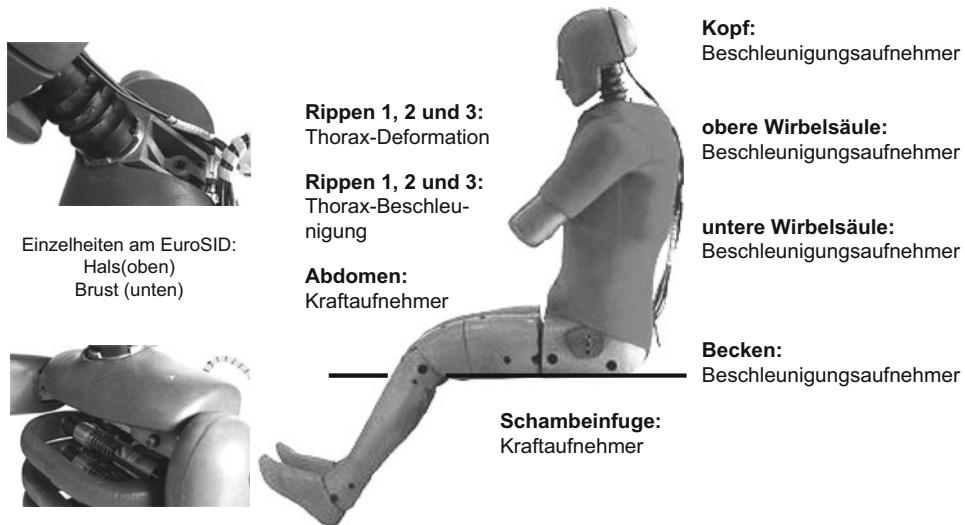
Kugelgelenke, Ellbogen und Knie hingegen als Scharniergelede ausgelegt. Der Kopf lässt sich um seine vertikale Achse und in Höhe der beiden oberen Halswirbel (Atlas und Axis) um seine Querachse drehen. Der Abdominalbereich enthält einen aus weichem Schaum geformten Bauchsitz. Im Kopf und in der Brust lassen sich mit drei-axialen Aufnehmern Beschleunigungen messen, darüber hinaus werden Aufnehmer zur messtechnischen Erfassung der Halskräfte und -momente eingesetzt. Allerdings werden ab dem Jahr 2013 die veralteten Dummys der P-Familie ( $P_4^3$ ,  $P1\frac{1}{2}$ , P6 etc.) durch Kinder-Dummys einer neuen Generation, der so genannten Q-Serie ( $Q1\frac{1}{2}$  und Q3), abgelöst.

Zur experimentellen Überprüfung kompletter Kraftfahrzeuge sind hoch entwickelte Dummys erforderlich. Mittlerweile wird weltweit bei Frontalkollisionen der von General Motors entwickelte HYBRID II und dessen Nachfolger HYBRID III als Dummy beim Standard-Wandaufprall nach FMVSS 208 und bei allen Forschungsaktivitäten in diesem Bereich angewandt (Tab. 7.4 und Abb. 7.16). Sie werden auch als Fußgänger- und Motorradfahrer-Dummys eingesetzt. Aus dem HYBRID-III-50 %-Dummy wurde der 5 %-(weiblich) und der 95 %-Dummy (männlich) abgeleitet. Beim HYBRID-III-Dummy können bis zu 60 Messkanäle zum Einsatz gebracht werden.

Bei der Überprüfung von **Seitenkollisionen** existieren zwei unterschiedliche Test-Prozeduren, die US-amerikanische nach FMVSS 214 und die europäische nach der Regelung ECE-R 95, die jeweils eigene, spezifische Dummys vorschreiben: für FMVSS 214-Versuche wird der US-SID und für ECE-R 95-Versuche der EuroSID eingesetzt (Tab. 7.4 und Abb. 7.17). Die amerikanische Automobilindustrie lehnt allerdings den Einsatz des US-SID-Dummy ab und bevorzugt den BIO-SID. Dieser Dummy wird mittlerweile, gemeinsam mit dem Nachfolge-Dummy des EuroSID, dem ES 2, durch die US-amerikanische Administration als Alternative anerkannt.



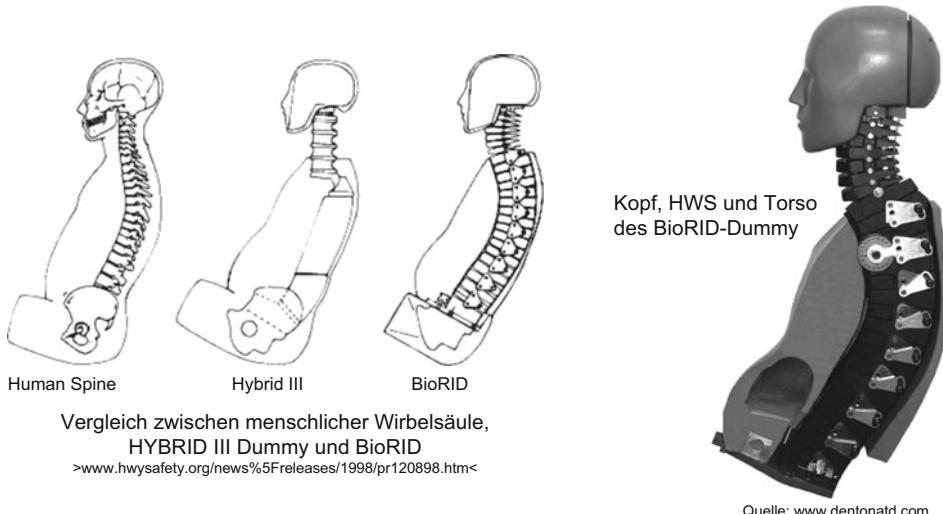
**Abb. 7.16** Dummy HYBRID III – Struktur und Messstellen (nach [26])



**Abb. 7.17** Der europäische Dummy für Seitenkollisionen (EuroSID) mit Einzelheiten des Halses und der Brust (nach [26])

Zur experimentellen Simulation von Heckkollisionen wurden in den vergangenen Jahren spezielle Dummys, einerseits der **ASTC-RID** (Rear impact dummy) und andererseits der **BioRID** (Tab. 7.4 und Abb. 7.18) entwickelt, die sich im Vergleich zum HYBRID-III-

Dummy durch eine bessere Simulationsgüte auszeichnen. Allerdings waren sie zunächst in ihrem Bewegungsverhaltens und in ihrer Reproduzierbarkeit verbesserungsbedürftig, so dass weitere Untersuchungen erforderlich erschienen, um sie in gesetzlich vorgeschriebenen Sicherheitsversuchen widerspruchsfrei einsetzen zu können. Die derzeit aktuelle Version kommt unter der Bezeichnung BioRID-II c bei Versuchen zu Heck-Kollisionen zum Einsatz.



**Abb. 7.18** BioRID (Biofidelic Rear Impact Dummy) im Vergleich und in Realität

Derzeit läuft ein US-amerikanisches Forschungsprogramm zur Weiterentwicklung eines **AATD-Dummies** (Advanced Anthropometric Test Device) zur Überprüfung von Versuchen zu Frontal-, Seiten- und Überschlagunfällen. Er wird sich auszeichnen durch eine hohe Simulationsgüte für alle auftretenden Belastungsrichtungen. Neue Messtechniken sind vorgesehen für Kriterien in der Brust und im Abdomen mit Hilfe von Beuteln, die mit Flüssigkeit gefüllt sind und das Herz, die Lungen u. a. Organe nachbilden sollen. Insgesamt werden 70 bis 100 Messkanäle erforderlich sein, deren Daten am Dummy gespeichert werden und durch einen externen Rechner abgerufen werden können. Das Einsatzdatum ist derzeit noch unbekannt.

## 7.4 Messtechnik

Am Dummy gemessene Belastungsgrößen dienen als Kriterium für die Schwere der beim Unfall zu erwartenden Verletzungen von Personen, während die am Fahrzeug messtechnisch erfassten Größen ein Maß für die Unfallschwere darstellen. Diese mechanischen Größen werden mit Hilfe von Aufnehmern erfasst und in elektrische Signale umgewandelt, die sich in analoger oder digitaler Form umwandeln, analysieren und speichern oder re-

gistrieren lassen. Im Folgenden soll zunächst auf den allgemeinen Aufbau von Messketten eingegangen werden. Anschließend werden Prinzipien von Messwert-Gebern bzw. Sensoren, die bei Sicherheitsversuchen Verwendung finden, erläutert und die Erfassung und Verarbeitung der Messdaten dargestellt.

### 7.4.1 Messkette

Als Messkette bezeichnet man die Gesamtheit aller Einrichtungen, um den Messwert einer Messgröße zu ermitteln [27]. Der Aufbau einer derartigen Messkette zeichnet sich im Wesentlichen durch drei Teilsysteme aus: den Messwert-Geber, den Übertragungsteil und die Speicherung oder Registrierung. Die Messaufgabe entscheidet dabei über die Gebereigenschaften, die Art der Anzeige- oder Registriergeräte und das Übertragungsverhalten der gesamten Messkette. Bei der Wahl der Messkette sind folgende Kriterien von Bedeutung:

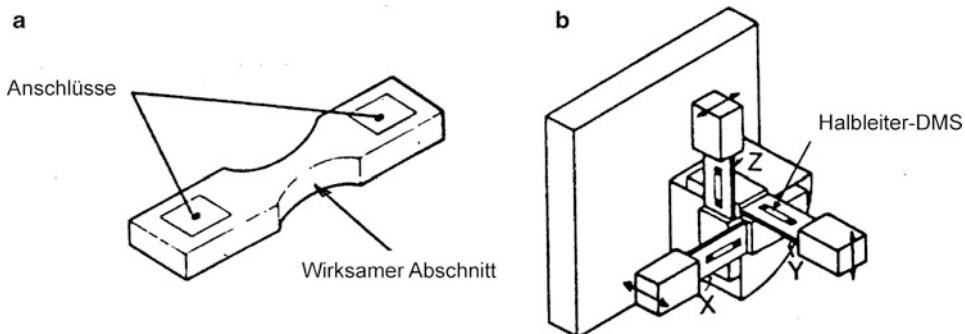
- Messbereich, Empfindlichkeit und Fehlergrenzen,
- untere und obere Grenzfrequenz,
- Raumbedarf, d. h. Entfernung zwischen Messobjekt (Geber) und Messperipherie (Speicher- und Registriergerät) sowie
- Rückkopplung auf das Messobjekt durch mechanische, klimatische, chemische und elektromagnetische Einflussfaktoren im Messbetrieb.

### 7.4.2 Messwert-Geber

Messwert-Gebern kommt die Aufgabe zu, eine physikalische, meist nicht-elektrische Größe (Beschleunigung, Weg, Kraft u. a.) in eine elektrische Größe umzusetzen; oftmals geschieht dies über eine nicht-elektrische Zwischenstufe. Im eigentlichen Sinn besteht daher der Geber aus einem Messgrößen-Aufnehmer (z. B. Beschleunigung am Messobjekt und am Gebergehäuse – seismische Masse – Balkenbiegung) und einem Wandler, der eine mechanische Größe in ein elektrisches Messsignal (Erfassung der Auslenkung des Biegebalakens mittels Dehnmessstreifen oder piezoresistive Elemente) umwandelt. Der Zusammenhang zwischen dem elektrischen Ausgangssignal und der mechanischen Eingangs- oder Messgröße wird durch die Kalibrierkurve charakterisiert, die linear, nicht-linear und/oder unstetig sein kann. Im Falle eines (weitgehend) linearen Zusammenhangs vereinfacht sich die Kalibrierkurve zu einem Kalibrierwert, dieser wird als Geberkonstante bezeichnet.

Bei der **Beschleunigungsmessung** werden Sensoren eingesetzt, die eine schwingungsfähig aufgehängte Masse (sog. seismische Masse) aufweisen. Die Masse ist über eine Feder mit dem Gehäuse verbunden. Die sich aufgrund der Beschleunigungs- oder Trägheitskraft ergebende Relativbewegung der Masse gegenüber dem Gehäuse wird zur Messung genutzt, indem piezoresistive Elemente (früher: Dehnmessstreifen), die ihren elektrischen Widerstand entsprechend der mechanischen Belastung ändern, auf dem freitragenden Biegeträger befestigt und elektrisch als Wheatstonesche Brücke geschaltet werden. Die sich bei wirk-

samer Beschleunigung einstellende Auslenkung der Biegefeder bewirkt eine Spannungsänderung der Brückenschaltung, die proportional zur eingeleiteten Beschleunigung ist. Im Vergleich zu den anfangs üblichen Dehnmessstreifen weisen piezoresistive Messelemente nur eine geringe, vernachlässigbare mechanische Hysterese auf und sind um Größenordnungen empfindlicher. Mit Piezo-Beschleunigungsaufnehmern können quasi-statische Messungen ( $f = 0 \text{ Hz}$ ) durchgeführt werden [1]. Abbildung 7.19 zeigt ein piezoresistives Messelement (linke Darstellung) und drei orthogonal angeordnete Beschleunigungsaufnehmer (rechte Darstellung) zur Messung der drei ortsfesten Beschleunigungskomponenten in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung, die beim Dummy zum Einsatz kommen. Eine andere Möglichkeit der Beschleunigungsmessung besteht darin, die Masse durch Piezoelemente oder Kohleblättchen, die elektrische Widerstände sind, getrennt vom Gehäuse anzutreiben. Die bei einer Beschleunigung wirksame Trägheitskraft ergibt eine Druckänderung, die eine Spannungs- oder Widerstandsänderung (Brückenschaltung) bewirkt und sich abgreifen lässt [28]. Zur Dämpfung von Eigenschwingungen dient das im Gehäuse eingefüllte Silikonöl.



**Abb. 7.19** a Piezoresistives Messelement aus Silizium und b drei-axialer Beschleunigungsaufnehmer (aus [1])

Die **Kraftmessung** erfolgt über eine Weg- oder Dehnungsmessung an einem elastisch verformbaren Körper. Die in einer Brückenschaltung angeordneten Dehnmeßstreifen aus Draht oder piezoresistiven Messelementen ergeben Widerstandsänderungen, die eine Änderung der Brückenspannung zur Folge haben. Bei piezoelektrischen Kraftmessdosen ergeben sich Spannungsänderungen, die proportional zur messenden Kraft sind. Kraftmessungen sind aber auch möglich mittels des Tauchspulsystems. Der zu messenden Kraft wird eine elektrisch erzeugte Reaktionskraft entgegengesetzt (Kompensationsmessung). Durch die Nachregelung stellt sich ein Kräftegleichgewicht ein. Der dazu erforderliche Strom ist proportional zur Reaktionskraft und kann zur Messung abgegriffen werden.

Bei der **Druckmessung** kommt das Prinzip der Kraftmessung zur Anwendung, denn sie erfolgt durch die Messung der sich einstellenden Kraft über die Verformung einer Membran, auf der Dehnmeßstreifen angebracht sind. Neuere Techniken benutzen die Anwendung von Dickschicht-Widerständen.

Bei der **Winkelmessung** werden meist Schleifenpotentiometer eingesetzt, mit deren Hilfe die Analogie zwischen der Länge eines Draht- oder Schichtwiderstandes und seinem Widerstandswert zur Messung verwendet wird. Die abgegriffene Drahtlänge ergibt sich konstruktiv aus dem zu messenden Relativwinkel.

Eindrückungen und Deformationen werden mit Hilfe der **Wegmessung** ermittelt. Die Wegänderung wird dabei in elektrische analoge oder digitale Signale in der Weise umgesetzt, dass aus den Abstandsänderungen zum Messobjekt proportionale Änderungen der Kapazität oder der Induktivität eines Kondensators oder eines Magnetfeldes resultieren. Eindrückungen lassen sich aber auch aus der Messung der Geschwindigkeit oder der Beschleunigung ermitteln, an die sich eine ein- oder mehrmalige Integration anschließt. Bei der Brustdeformation am Dummy kommt, unter Zuhilfenahme einer Kompensationsschaltung zur Berücksichtigung der Winkelfunktion, ein Drehpotentiometer zum Einsatz (vgl. Abb. 7.13).

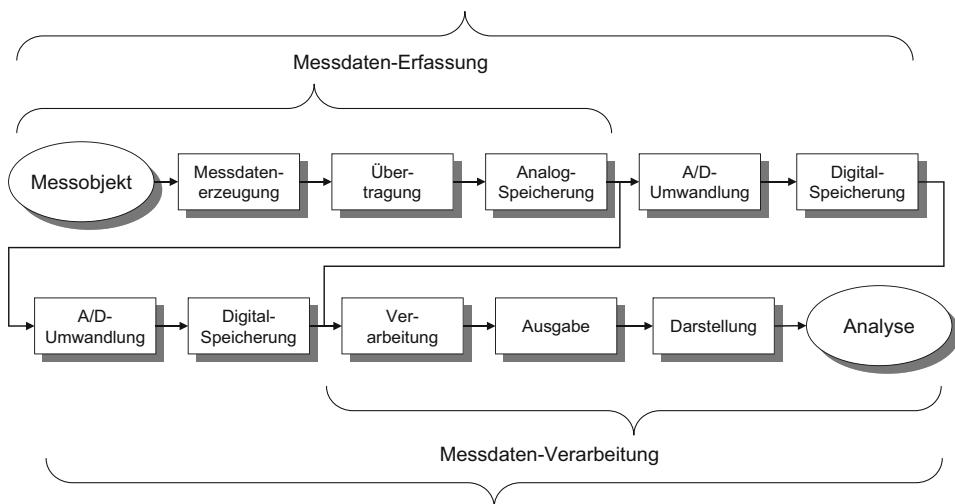
**Integrierte Sensoren** umfassen Messwertgeber und Signalelektronik direkt an der Messstelle, um das Steuergerät zu entlasten. Die Datenübertragung kann mit digitalisierten Signalen erfolgen, sie lässt sich damit erheblich störsicherer gestalten. Die Signalelektronik kann erforderlichenfalls aus einer Signalaufbereitungseinheit, einem Digital/Analog-Wandler und/oder einem Mikro-Computer bestehen.

### 7.4.3 Messdaten-Erfassung und -Verarbeitung

Während bei der Beschreibung der Messkette auf drei Teilsysteme abgehoben wurde (Messwert-Geber, Übertragungsteil und Speicherung oder Registrierung), soll hier auf die am Messobjekt vorgenommene Erfassung von Messdaten und deren Verarbeitung eingegangen werden, die schließlich zur Analyse der Messergebnisse führt. Unter der Messdaten-Erfassung versteht man, wie Abb. 7.20 zeigt, die Generierung der Messdaten mit Hilfe des Aufnehmers, die Übertragung, die analoge oder die digitale Speicherung sowie die ggf. erforderliche Umsetzung vor der digitalen Speicherung. Die Messdaten-Verarbeitung umfasst dagegen im Allgemeinen die Umsetzung der Messdaten zur digitalen Speicherung und die Speicherung selbst, die numerische Verarbeitung sowie die Ausgabe der Daten in Speicher und/oder die Darstellung der Messdaten und Ergebnisse. Die Umsetzung und die digitale Speicherung der Messdaten kann damit sowohl im Rahmen der Erfassung als auch bei der Verarbeitung der Messdaten erfolgen.

Bei der **Generierung oder Erzeugung** von Messdaten wird die zu messende physikalische Größe in eine messtechnisch erfassbare Größe umgesetzt, z. B. wird aus der Beschleunigung eine Balkenbiegung, und in ein elektrisches Messsignal (Verstimmung der Brückenspannung) umgewandelt. Dabei muss das elektrische Messsignal an die erwartete physikalische Größe am Messobjekt hinsichtlich Messbereich und Empfindlichkeit angepasst sein und ggf. verstärkt werden.

Die **Übertragung** von Messdaten umfasst die Kommutierung, die Modulation, die Analog/Digital-(A/D-)Umsetzung und das Multiplexen des Messsignals. Dabei dient die



**Abb. 7.20** Aufgaben und Begriffe der Messdaten-Erfassung und -Verarbeitung (aus [1])

**Modulation**, eine temporäre Umformung des Messsignals, vor allem der Übertragungssicherheit. Die Umkehrung bezeichnet man als Demodulation. Gelegentlich werden aber auch solche Umformungen als Modulation bezeichnet, bei denen unter Verzicht auf die Kontinuität der Signale die Anzahl der übertragenen Signale erhöht wird, ohne dabei die Übertragungssicherheit zu erhöhen (z. B. bei der PAM). Die wichtigsten Modulationsarten sind nach [29]:

- AM: Amplituden-Modulation (zeit- und amplitudenkontinuierlich),
- FM: Frequenz-Modulation (zeit- und amplitudenkontinuierlich),
- PM: Phasen-Modulation (zeit- und amplitudenkontinuierlich),
- PLM: Puls-Längen-Modulation (zeitkontinuierlich, amplitudendiskret),
- PPM: Puls-Phasen-Modulation (zeitkontinuierlich, amplitudendiskret),
- PFM: Puls-Frequenz-Modulation (zeitkontinuierlich, amplitudendiskret),
- PAM: Puls-Amplituden-Modulation (zeitdiskret, amplitudenkontinuierlich) und
- PCM: Puls-Code-Modulation (zeit- und amplitudendiskret).

Oftmals besteht die Notwendigkeit, mehrere Messsignale über nur einen Kanal zu übertragen. Dies umso mehr, je größer die Entfernung zwischen Messobjekt und Analog- oder Digital-Speicher ist. Dabei ist es unerheblich, ob die Übertragung über ein Kabel oder per Telemetrie, also drahtlos, erfolgt. Es handelt sich hierbei um die Multiplex-Übertragung, bei der zwei verschiedene Verfahren existieren: Das wesentliche Merkmal beim

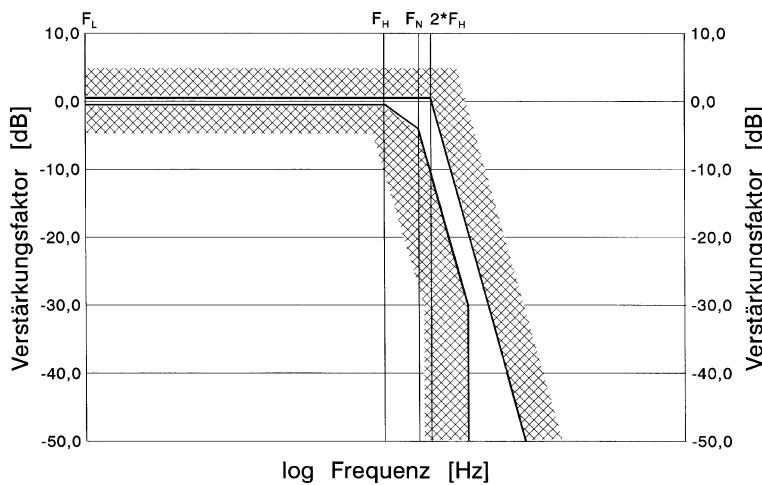
**Zeitmultiplex-Verfahren** ist in der Kommutation und der Dekommutation zu sehen. Dabei werden alle am Kommutator anliegenden Signale zyklisch abgegriffen, und es entsteht ein Übertragungssignal, das sich aus einer zeitlich aneinander gereihten Kette

von Zeitabschnitten der verschiedenen Signale zusammensetzt. Diese werden später wieder durch den synchron laufenden Dekommutator zerlegt und es entstehen diskrete Darstellungen der zu übertragenden, ursprünglich kontinuierlichen Signale. Beim **Frequenzmultiplex-Verfahren** wird jedem einzelnen zu übertragenden Signal ein bestimmter Frequenzbereich zugeordnet. Anschließend werden die modulierten Signale gemischt und direkt oder nach nochmaliger Frequenzmodulation übertragen. Die Vorteile der Frequenzmodulation, wie Kontinuität und Störungsempfindlichkeit, bleiben erhalten und dennoch können mehrere Messsignale gleichzeitig über einen Kanal übertragen werden.

Analoge Messdaten lassen sich mit Hilfe eines Magnetband-Aufzeichnungsgerät speichern, dies entspricht jedoch heute nicht mehr dem Stand der Technik und beschränkt sich daher lediglich auf Sonderfälle. Allerdings lassen sich Analogsignale hervorragend mit einem x/y-Schreiber, einem Direktschreiber, einem Lichtstrahlloszillographen oder einem Oszilloskop registrieren. Analoge Daten werden zur **Speicherung** meist mittels des A/D-Wandlers umgesetzt und einer Zentralen Steuereinheit zugeführt, während digitale Messdaten direkt an die Steuereinheit zur Speicherung übertragen werden. Von der Zentraleinheit gelangen die Messdaten zur digitalen Speicherung. Als Medien kommen digitale Magnetbänder, Magnetplatten, Magnetplattenstapel, Compact Discs (CDs) sowie (zumindest früher) Lochstreifen und Lochkarten zur Anwendung. Ein mittlerweile häufig anzutreffender Digitalspeicher ist der Transientenrekorder, der die digitalisierten Dummy- und Fahrzeug-Messdaten direkt am Fahrzeug oder am Schlitten aufnehmen kann. Er ist schockfest und kann daher den beim Crash-Test auftretenden Beschleunigungen ohne Beschädigung ausgesetzt werden.

Messwerte werden häufig von unerwünschten elektrischen Signalen überlagert. Um die Messwerte von diesen Störsignalen zu trennen, kommen **Filter** zum Einsatz, die das Signal im Amplitudenspektrum zu höheren (Tiefpass-Filter) und gelegentlich zu niedrigeren Frequenzen (Hochpass-Filter) hin „abschneiden“. Für Messsignale bei Aufprall-Versuchen wird nach [30] eine Kanal-Frequenz-Klasse (CFC: Channel frequency class) für die verschiedenen Anwendungen durch die Angabe der Filterfrequenz-Klasse (z. B. CFC 1000) definiert. Sie gibt einen zulässigen Bereich an, in dem das Amplitudenspektrum des Messwert-Gebers liegen muss (Abb. 7.21).

In Tab. 7.5 sind typische Anwendungen aufgelistet und neben der Frequenzklasse ( $F_H$ ) die Eck- und die obere Grenzfrequenz ( $F_N$  bzw.  $2 \cdot F_H$ ) angegeben. Der Abfall der Grenzlinien beträgt  $-24$  dB. Die am häufigsten angewandten Filter sind das *Butterworth*-, das *Tschebyscheff*- und das *Bessel*-Filter. Während ersteres gewöhnlich für stetige Signale verwendet wird, besitzt das *Tschebyscheff*-Filter zwei Eigenschaften, die es für manche Anwendungen ungeeignet machen: der Frequenzgang ist nicht eben und der Phasengang beginnt bereits bei einer sehr niedrigen Frequenz. Der Vorteil liegt zweifellos in der hohen Filtersteinheit. *Bessel*-Filter zeichnen sich durch die lineare Phasenverschiebung in Abhängigkeit von der Frequenz und die guten Dämpfungseigenschaften aus. Bei einer digitalen Filterung wird das Messsignal derart digitalisiert und aufbereitet, dass das rückgeführte Analogsignal bei bestimmten Frequenzen gedämpft ist. Wie bei jedem Digitalisierungsvorgang



**Abb. 7.21** Zulässiger Bereich des Amplitudenspektrums für Messsignale bei Sicherheitsversuchen (aus Channel Frequency Class in [30])

**Tab. 7.5** Frequenz-Klassen bei Sicherheitsversuchen (nach [30])

Anwendung	Frequenzklasse FH [Hz]	Eck-Frequenz FN [Hz]	Grenzfrequenz 2 · FH [Hz]
<b>Beschleunigung an Fahrzeugstrukturen und an Versuchseinrichtungen zur Anwendung bei:</b>			
Zellen- oder Schlittenverzögerungen (experimentell und rechnerisch)	60	100	120
Integration zur Ermittlung der Geschwindigkeit und des Weges	180	300	360
Strukturkomponenten	600	1.000	1.200
Kraftmessung an der Barriere	60	100	120
Kräfte am Gurtsystem	60	100	120
Belastungen am Lenksystem	600	1.000	1.200
<b>Test-Dummy:</b>			
Kopfbeschleunigungen (translatorisch und rotatorisch) und Halskräfte	1.000	1.650	2.000
Beschleunigungen der Kopfkalotte	1.000	1.650	2.000
Halsmomente, Brustindrückung, Oberschenkelkräfte und -momente	600	1.000	1.200
Wirbelsäulenbeschleunigungen	180	300	360
Rippen- und Brustbeinbeschleunigungen	1.000	1.650	2.000
Lendenwirbelsäulenkräfte und -momente	1.000	1.650	2.000
Beckenbeschleunigungen, -kräfte und -momente	1.000	1.650	2.000

muss daher der so genannte Alias-Effekt, d. h. der Fehler, der beim digitalen Abtasten durch Nichtbeachtung des Abtasttheorems auftritt, vermieden werden. Dies geschieht durch eine vorangehende analoge Filterung (Anti-Aliasing) oder durch eine Abtastrate, die mindestens den dreifachen Wert der höchsten Signalfrequenz aufweist [28].

Die **numerische Verarbeitung** der Messdaten, beispielsweise zur Berechnung der Resultierenden aus den einzelnen Beschleunigungskomponenten oder des HIC-Wertes, sowie die Gesamtbewertung der Versuchsergebnisse, etwa in Form des im vorstehenden Kapitel beschriebenen Sicherheitsindexes oder eines Sterne-Rankings bei NCAP-Versuchen [31], erfolgt meist mit Hilfe kommerziell vertriebener Software-Pakete, gelegentlich ergänzt und erweitert durch Anwender-Programme, auf elektronischen Rechnern. Am Bildschirm darstellbare Messsignal-Verläufe und numerische Ergebnisse lassen sich mit Stiftplottern und mit Tintenstrahl- oder Laserdruckern aufgrund der hohen Auflösung in hervorragender Qualität zu **Dokumentationszwecken** ausgeben. Erste Ergebnisse von Crash-Versuchen sind wenige Minuten nach der Versuchsdurchführung verfügbar; für die komplette Auswertung werden allerdings einige Stunden benötigt.

Bei neueren Crash-Anlagen werden zeitgleich bis zu 256 Kanäle aufgenommen und gespeichert. Zur effizienten Durchführung von Versuchen ist daher eine **zentrale Ablaufsteuerung** zur Aufnehmer-Kalibrierung, für die Warn- und Sicherheitseinrichtung (Verriegelung zur Sperrung des Crash-Bahnzugangs, Hupe und Warnleuchte), für das Einschalten der Beleuchtungseinrichtung, zum Starten des Schlitten- oder Fahrzeuganlaufs, zum Hochfahren der Hochgeschwindigkeitskameras sowie für die Datenaufnahme, die -speicherung und die Verarbeitung der Messdaten erforderlich.

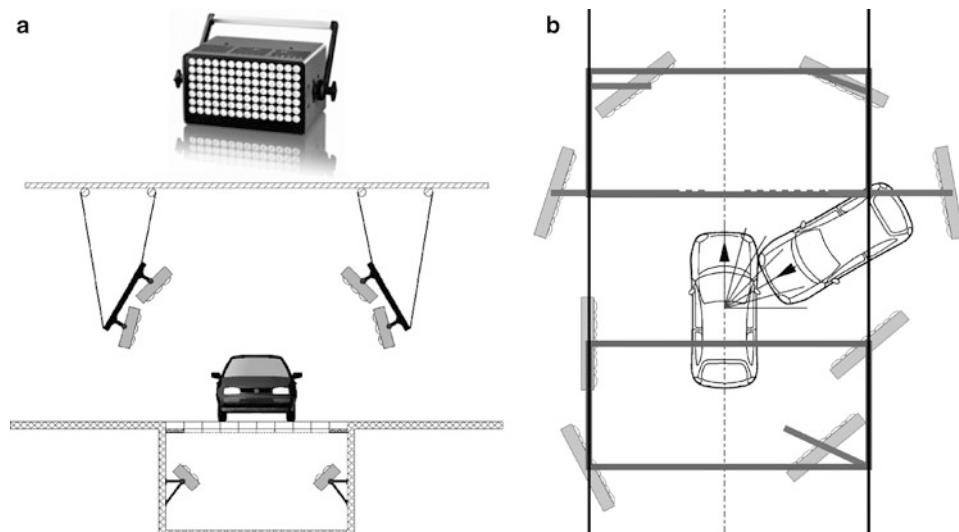
---

## 7.5 Film- und Beleuchtungstechnik

Zur Analyse des Deformationsverhaltens von Fahrzeugstrukturen sowie zur Bewegungs- und Kontaktstellenanalyse bei der Interaktion zwischen Dummy-Körperteilen und Innenraumteilen wird bei der experimentellen Simulation die **Hochgeschwindigkeitsfilmtechnik** eingesetzt. Hierbei unterscheidet man stationäre und am Schlitten oder am Fahrzeug montierte, mitfahrende Filmkameras. Seit einigen Jahren werden vornehmlich **Hochgeschwindigkeitsvideokameras** mit bis zu 36.000 Bildern/Sekunde verwendet, weil sie unmittelbar nach dem Versuch verfügbar sind und eine einfachere und schnellere fotogrammetrische Auswertung ermöglichen. Mitfahrende Videokameras mit einer Bildfrequenz von bis zu 10.000 Bildern/Sekunde sind schockresistent, d. h. beschleunigungsfest, bis zu Beschleunigungen von 60 g. Sie werden auf schwingungsstabilen Auslegern am Schlitten oder am Fahrzeug montiert. Die Steuereinheit und die Stromversorgung sind meist ebenfalls auf dem Schlitten bzw. dem Fahrzeug montiert. Gestartet werden sie durch eine zentrale Ansteuerung über Schleppkabel. Die zur Auswertung erforderliche Synchronisation zwischen Messsignalen und Filmaufnahmen erfolgt durch das gleichzeitige Triggern der Mess- und der Filmtechnik. Mit Hilfe des Triggersignals werden Blitzlampen aktiviert und

die crash-festen Zeituhren gestartet. Sie werden so positioniert, dass sie im Filmausschnitt sichtbar sind.

Die für die Hochgeschwindigkeitsaufnahmetechnik erforderliche **Beleuchtungsanlage** besteht in der Regel aus zwei, beidseitig über dem Betrachtungsobjekt angebrachten, verfahrbaren Beleuchtungseinheiten, die jeweils mit einer Reihe von Metall-Halogenlampen (HMI) ausgestattet sind. Die Beleuchtungsstärke beträgt bis zu 200.000 Lux (lx) und erzeugt ein gleichmäßig helles, bis zu einer Bildfrequenz von 36.000 Bildern/Sekunde flackerfreies Licht [14]. Derartige Beleuchtungsanlagen weisen eine Lebensdauer von bis zu 500 Stunden oder 1600 Ein-/Ausschaltungen auf. Eine innovative Beleuchtungstechnik ist in den LED-Scheinwerfern zu sehen, die von Messring [7] unter der Bezeichnung M = LIGHT LED entwickelt wurden und erhebliche Vorteile hinsichtlich Lebensdauer, Energieverbrauch und Lichtleistung bieten (Abb. 7.22). Zur Ausleuchtung des Fahrgasträumes finden sog. On-Board-Beleuchtungseinheiten Anwendung, die wie die Kameras crash-fest ausgelegt sein müssen.



**Abb. 7.22** Konzept für Beleuchtungseinrichtungen für Frontalkollisionen (a) und für schrägwinklige Kollisionen (b) sowie Einzelscheinwerfer mit neuartiger LED-Technologie (aus [7])

## Literatur

1. Kramer, F.: Passive Sicherheit/Biomechanik I/II. Vorlesungsskript zur gleichnamigen Lehrveranstaltung an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden (2012).
2. Vieweg, C.: Alles über die Mercedes-Benz A-Klasse. Daimler-Benz Service, Stuttgart (1997).
3. The Insurance Crash Test Parameters, Appendix 1 in Vehicle Design Features for Optimum Low Speed Impact Performance. RCAR Research Committee for Automobile Repairs. Conference The RCAR Meeting 1995. Rotherwick, UK (1995).
4. RCAR Research Committee for Automobile Repairs: News Release: November 2003 – Low Speed Crash Testing. InterNet <http://www.rcar.org> (2006).
5. Kramer, F.: Unfallrekonstruktion. Vorlesungsskript zur gleichnamigen Lehrveranstaltung an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden (2010/11).
6. Appel, H., Kramer, F., Glatz, W., Lutter, G. et al.: Quantifizierung der passiven Sicherheit für PKW-Insassen. Technische Universität Berlin. Bericht zum Forschungsprojekt 8517/2 der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.). Bergisch Gladbach (1991).
7. Messring. Prüfeinrichtungen – Daten-Akquisition – Beleuchtung. Internet-Abruf am 11.10.2012 unter <http://www.messring.de>.
8. Moving Rigid Barrier Collision Tests. SAE J972 DEC88, SAE Recommended Practice. 2003 SAE Handbook, Vol. 3 On-Highway Vehicles and Off-Highway Machinery. Society of Automotive Engineers Inc. Warrendale (PA), USA (2003).
9. Dolly Rollover Recommended Test Procedure. SAE J2114 APR93, SAE Recommended Practice. 2003 SAE Handbook, Vol. 3 On-Highway Vehicles and Off-Highway Machinery. Society of Automotive Engineers Inc. Warrendale (PA), USA (2003).
10. Krämer, J.: Crash Simulationsanlagen – Technische Dokumentation. Vertriebsinformation Produktbereich P der Fa. SCHENCK AG. (1994).
11. Appel, H., Kramer, F.: Biomechanik und Kraftfahrzeugsicherheit. Umdruck zur gleichnamigen Vorlesung am Institut für Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität Berlin (1987).
12. ECE-R 16: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Sicherheitsgurte und Rückhaltesysteme für erwachsene Personen in Kraftfahrzeugen. Bremseinrichtung, Anhang 6.
13. News 2005, Crash Test – Facility Design – Crash Components – Data Analysis: Präsentation der Firma Messring Systembau MSG GmbH, München (2005).
14. Böhmler, K.: Beschreibung der TRW Repa-Crashanlage. Alfdorf (1990).
15. Kramer, F.: Significance of Restraint Systems for the Secondary Safety of Motor Vehicles. 6th KIA International Academic Seminar. Seoul, Korea (1993).
16. Vehicle Roof Strength Test Procedure SAE J374 MAY91, SAE Recommended Practice. 2003 SAE Handbook, Vol. 3 On-Highway Vehicles and Off-Highway Machinery. Society of Automotive Engineers Inc. Warrendale (PA), USA (2003).
17. Passenger Car Door System Crush Test Procedure. SAE J367 JUN80, SAE Recommended Practice. 2003 SAE Handbook, Vol. 3 On-Highway Vehicles and Off-Highway Machinery. Society of Automotive Engineers Inc. Warrendale (PA), USA (2003).
18. Motor Vehicle Seat Belt Anchorages – Test Procedure. SAE J384 JUN94, SAE Recommended Practice. 2003 SAE Handbook, Vol. 3 On-Highway Vehicles and Off-Highway Machinery. Society of Automotive Engineers Inc. Warrendale (PA), USA (2003).

19. Janssen, E.G.: Mechanical Human Body Simulators. TNO Industrial Report. TNO Road-Vehicles Research Institute, Delft, NL (1993).
20. Schneider, L.W., et al.: Development of Anthropometrically Based Design Specification for an advanced adult anthropomorphic dummy family. The University of Michigan Transportation Research Institute, Ann Arbor (MI), USA (1983).
21. Mertz, H.J., Irwin, A.L., Melvin, J.W., Stalnaker, R.L., Beebe, M.S.: Size, Weight and Biomechanical Impact Response Requirements for Adult Size Small Female and Large Male Dummies. SAE Technical Paper Series 890756. International Congress and Exposition. Detroit (MI), USA (1989).
22. Uriot, J., Page, M., Tarriere, C., Bendjellal, F. et al.: Measurement of Submarining on HYBRID III 50° & 5° Percentile Dummies. 14th ESV Conference. München (1994).
23. Kelly, J.R.: BioRID-IIc Rear Impact Crash Test Dummy. Robert A. Denton, Inc., Rochester Hills (MI, USA) (2003).
24. Crash Test Dummy Development History. Newsline of the First Technology Safety Systems, Inc. Plymouth (MI), USA (1993).
25. Beusenberg, M.C., Janssen, E.G., Schreuder, J.J.H.: Five Years Experience of Using EUROSID-1 in Sled and Car Tests. Report Paper. Bd. 94 S6 O 09. TNO Crash-Safety Research Centre, Delft (1994).
26. Denton Products & Service: Presentation Robert A. Denton, Inc., Rochester Hills MI (USA) (2004).
27. Stühler, W.: Experimentelle Schwingungslehre und Schwingungsmesstechnik. Manuscript zur gleichnamigen Lehrveranstaltung an der Technischen Universität Berlin (1974).
28. Petzsche, T.: Handbuch der Schock- und Vibrationsmesstechnik – Ein Leitfaden für die praktische Anwendung. Endevco, Heidelberg (1992).
29. Schneider, H.-J.: Lexikon der Informatik und Datenverarbeitung. R. Oldenbourg Verlag GmbH, München (1983).
30. Instrumentation for Impact Test – Part 1 – Electronic Instrumentation. SAE J211/1 MAR95, SAE Recommended Practice. 2003 SAE Handbook, Bd. 3 On-Highway Vehicles and Off-Highway Machinery. Society of Automotive Engineers Inc. Warrendale (PA), USA (2003).
31. Hackney, J.R., Kahane, C.J.: The New Car Assessment Program: Five Star Rating System and Vehicle Safety Performance Characteristics. SAE Technical Paper Series 950888. International Congress and Exposition. Detroit (MI), USA (1995).

Für eine Zulassung im Straßenverkehr sind Fahrzeugversuche international vereinbart und gesetzlich vorgeschrieben. Mit der experimentellen Simulation werden nicht selten unerwartete Schwachstellen aufgedeckt. Nachteilig ist allerdings der Umstand, dass Testobjekte erst als Prototypen oder Muster vorliegen müssen, um experimentell überprüft werden zu können. Dies bedeutet nicht nur hohe Erstellungskosten, sondern auch einen hohen Zeitaufwand, der mit den immer kürzer werdenden Entwicklungszyklen neuer Fahrzeugtypen und -plattformen unvereinbar ist. Daher entwickelte sich die rechnerische Simulation hin zum entscheidenden und anerkannten Entwicklungswerkzeug. Die Anwendung reicht von der Konzeptphase bis hin zur Serienentwicklung und zeichnet sich durch ein hohes Maß an Zuverlässigkeit und Genauigkeit aus. Dies gilt für die statische und dynamische Berechnung des Fahrzeugverhaltens und der Komponenten des Insassenschutz-Systems als auch für die Simulation des Bewegungs- und Belastungsverhaltens von Insassen.

Innerhalb der Crash-Simulation werden Rechenverfahren eingesetzt, bei denen die zu untersuchenden Komponenten als deformierbar oder als gekoppelte Starrkörper angenommen werden. Entsprechend nutzt man Programme aus dem Bereich der Finite-Elemente-Methode (FEM) bzw. Programme für Mehr-Körper-Systeme (MKS). Nach einer Zusammenfassung der geschichtlichen Entwicklung der Berechnungsverfahren werden die einzelnen mathematischen Methoden kurz umrissen. Daran schließt sich die Beschreibung von verwendeten Modellarten in den unterschiedlichen Berechnungsdisziplinen an. Abschließend werden erforderliche Kriterien zur Bewertung einer Berechnung diskutiert und die Möglichkeiten der Optimierung von Systemen mittels Simulation erläutert.

## 8.1 Die Geschichte der rechnerischen Simulation

Verwendet man MKS-Formulierungen, führt dies zu Systemen von gewöhnlichen Differentialgleichungen. Eine noch heute aktuelle Gruppe von Algorithmen zur Lösung von Anfangswert-Problemen von gewöhnlichen Differentialgleichungen wurde Anfang des 20. Jahrhunderts, also vor der Entwicklung und Verbreitung von Computern, veröffentlicht. Die Methoden sind nach den Entwicklern, dem deutschen Mathematiker und Physiker Carl David Tolmé *Runge* (1856–1927), der Professor in Göttingen war, und dem deutschen Mathematiker Martin Wilhelm *Kutta* (1867–1944), der in Stuttgart lehrte, benannt. Die *Runge-Kutta*-Verfahren sind aber noch nicht in der Lage, die in der Insassensicherheit auftretenden Gleichungen effektiv zu lösen. Dazu wurden Mitte des 20. Jahrhunderts in Arbeiten von Charles *Curtiss* und Joseph *Hirschfelder* Untersuchungen zu so genannten steifen Systemen gemacht. Verfahren zum Lösen des steifen Systems wie *Runge-Kutta-Rosenbrock* oder *Runge-Kutta-Nyström* erlauben die Aufgaben numerisch zu lösen.

Eines der ersten zweidimensionalen Insassen-Simulationsmodelle wurde 1963 in den USA durch *Calspan* von *McHenry* unter der Bezeichnung CAL-2D aufgestellt und laufend weiterentwickelt. So entstanden z. B. das Programm ROS (Revised Occupant Simulation) von *Segal* im Jahre 1971, das Programm MODROS (Modified Revised Occupant Simulation) von *Danforth* und *Randall* 1972 und das Programm PSOS (Programm zur Simulation und Optimierung von Sicherheitsgurten) von *Niederer* 1977. Parallel zum *Calspan*-Modell entwickelte *Robbins* das als MVMA-2D bezeichnete Modell, das von ihm und anderen Co-Autoren 1970 veröffentlicht wurde. Das Anfang der 1980er Jahre von *Kramer* an der Technischen Universität Berlin entwickelte Insassen-Crashmechanik-Rechenmodell ICMF [1] wurde zwar in Forschungsprojekten intensiv angewandt, jedoch nie kommerziell vertrieben; es geht ursprünglich zurück auf ein von *Anselm* 1975 aufgestelltes Programm. TNO in den Niederlanden entwickelte das Programm MADYMO-2D, dessen Beschreibung *Bacchetti* und *Maltha* im Jahr 1978 erstmals veröffentlicht haben.

Die Entwicklung dreidimensionaler Insassen-Simulationmodelle begann 1970 mit dem HSRI-Modell durch *Robbins*, das 1972 von *King* modifiziert wurde, und schritt in den folgenden Jahren rasch fort. Zeitlich parallel dazu (1970 veröffentlicht) wurde auch am Texas Transportation Institute (TTI) durch *Young* ein derartiges Modell geschaffen. Ebenfalls 1970 erweiterten *Furusho* und *Yokoya* ihr ebenes Modell, dessen Formulierung dem HSRI-Modell sehr ähnlich war. Im Jahre 1972 entwickelte *Bartz* bei *Calspan* ein räumliches Modell. Dessen Modifikation, bei dem der Insasse durch eine Baumstruktur von bis zu 20 Massenelementen beschrieben werden kann, erfolgte durch *Fleck* im Jahre 1975. Schließlich veränderten im Jahre 1974 *Huston* et al. ihr „Superman“-Modell UCIN zu einem aus zwölf Körperteilen bestehenden Insassen-Simulationsmodell für Frontalkollisionen.

In Europa wurden im Wesentlichen zwei räumliche Insassenmodelle entwickelt, das allgemein formulierte, dreidimensionale Mehr-Massen-System von *Wittenburg* im Jahre 1977, das aber heute kaum mehr angewandt wird, und das Programm MADYMO-3D, das

1977 von *Maltha, Bacchetti* und *Heijer* erstmals veröffentlicht wurde. Diese kurze Darstellung der Entwicklungsgeschichte von Insassen-Simulationprogrammen mit dem MKS-Ansatz erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, der interessierte Leser sei auf die in [1] dargelegte detaillierte Dokumentation verwiesen.

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) wird in der Crash-Simulation verwendet, um Deformationen von Bauteilen zu bestimmen. Die ersten Untersuchungen zum FEM-Verfahren fanden überraschenderweise zu einer Zeit statt, in der es noch gar keine entsprechenden Rechner gab. So wurde das *Ritz*-Verfahren, von dem in Zürich und Göttingen tätigen Schweizer Mathematiker und Physiker Walter *Ritz* (1878–1909) und dem Mathematiker Richard *Courant* (1888–1972), der 1943 von Göttingen nach New York emigrierte, untersucht. Die Arbeiten der Mathematiker fanden aber wegen der damals fehlenden Rechenleistung keine praktische Bedeutung. Erste Anwendungen des FEM-Verfahrens waren 1956 die Berechnungen gepfeilter Flugzeug-Tragflügel bei dem Flugzeughersteller *Boeing* in Seattle. Mit dem Aufkommen leistungsfähiger Rechner nahm die FE-Methode dann eine stürmische Entwicklung in der Strukturmechanik. Die Entwicklung in dieser Zeit wurde im Wesentlichen von den Ingenieurwissenschaften vorangetrieben. Von internationalem Einfluss waren die Universität von Kalifornien in Berkeley, geprägt von R. W. *Clough*, Edward *Wilson* und R. L. *Taylor*, die Universität Stuttgart mit J. *Argyris* und die Universität von Wales in Swansea mit O. C. *Zienkiewicz*. Die ersten Veröffentlichungen über nichtlineare Finite Elemente waren in den Jahren 1965 und 1967 von *Argyris, Marcal* und *King*. Ein erstes kommerzielles Programm im nichtlinearen FEM-Bereich war *Marc*, benannt nach dem Namen des Gründers *Marcal*, im Jahr 1969, und im Jahr 1972 war das Programm *Wrecker* verfügbar, mit dem erstmals Untersuchungen nichtlinearer 3-dimensionaler transienter (zeitabhängiger) Probleme der Strukturmechanik durchgeführt werden konnten. Ein wichtiger Schritt für explizite FEM-Programme war die erste Version des Programms DYNA von den Lawrence Livermore National Laboratories in Kalifornien im Jahr 1976. Seit 1980 sind drei kommerzielle Programme aus dem Programm DYNA abgeleitet worden, die heute den Markt der Crash-Simulation beherrschen.

---

## 8.2 Berechnungsverfahren

Nachfolgend sollen einige wenige theoretische Aspekte der einzelnen Verfahren beleuchtet werden. Dies geschieht mit dem Ziel, den einen oder anderen Begriff, der in der Anwendung eines entsprechenden Programmsystems auftaucht, zu erläutern. Für detaillierte Beschreibungen der Verfahren sei auf die im Folgenden genannten Quellen verwiesen.

### 8.2.1 Mehrkörper-Systeme mit dem Fokus „Insassensicherheit“

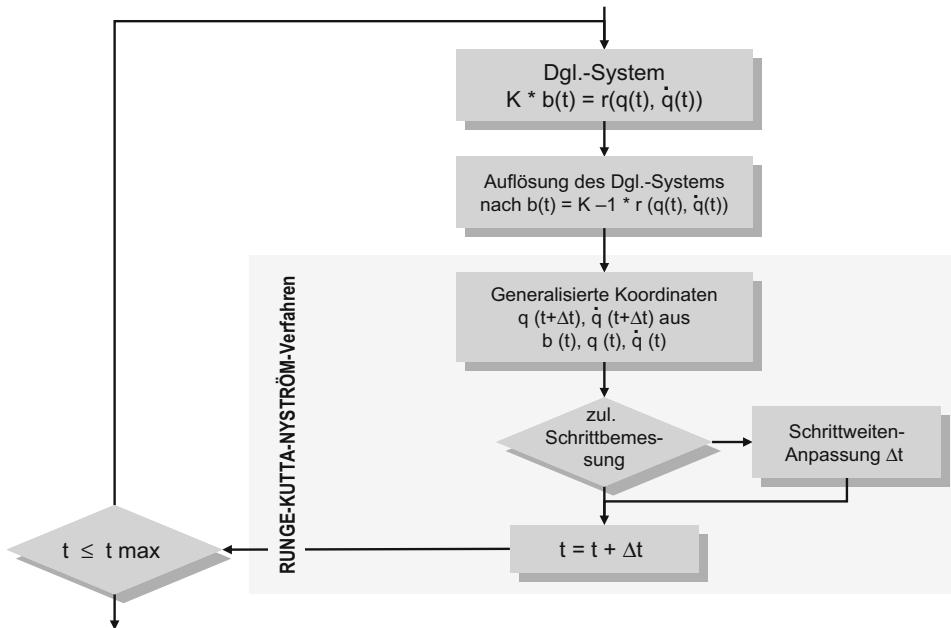
Bei Mehrkörper-Systemen wird ein System betrachtet, das sich aus starren, gelenkig miteinander verbundenen Körpern zusammensetzt; es wird daher auch häufig als Starrkörper-

System bezeichnet. Für jeden dieser Körper ist eine translatorische und rotatorische Bewegung zugelassen, sofern dies die Anbindungen an die benachbarten Körper erlauben. Insassenmodelle setzen sich aus einzelnen Körperelementen zusammen, die sich zu einer Gliederkette zusammenfassen lassen, und es liegt ein kinetisches System starrer Körper vor. Die zur Aufstellung der Bewegungsgleichungen erforderlichen Prinzipien der Analytischen Mechanik enthalten im Wesentlichen Energieaussagen, allerdings nicht unter Berücksichtigung wirklicher, aktueller Verschiebungen, sondern durch die Einführung virtueller Verrückungen entlang einer gedachten (fiktiven) Bewegung.

Mit den *Lagrangeschen* Bewegungsgleichungen, die in [1] ausführlich hergeleitet sind, wird ein Satz von genau  $f$  Gleichungen für die  $f$  unabhängigen Bewegungsmöglichkeiten des Insassenmodells erhalten;  $f$  kennzeichnet dabei die Anzahl der Freiheitsgrade. Die nicht zur Bewegung beitragenden Reaktionskräfte, die z. B. bei elementaren Berechnungsmethoden aufgestellt und dann in den Bewegungsgleichungen wieder eliminiert werden müssen, treten hierbei von vornherein in der Rechnung nicht auf. Darin ist der wesentliche Vorteil bei der Formulierung der Bewegungsgleichungen nach *Lagrange* zu sehen. Im mathematischen Sinn liegt mit den  $f$  Gleichungen ein nichtlineares, inhomogenes und gewöhnliches Differentialgleichungssystem zweiter Ordnung vor, das sich einer geschlossenen analytischen Behandlung verschließt. Es kann aber mittels eines numerischen Näherungsverfahrens gelöst werden. Dabei können Lösungen mit beinahe jeder gewünschten Genauigkeit erreicht werden.

Unter Anwendung beispielsweise des *Runge-Kutta-Nyström*-Verfahrens werden daraus die Weg- und Geschwindigkeitskoordinaten näherungsweise berechnet. Dazu werden Mittelwerte aus insgesamt vier vorläufigen Funktionswerten (einer beim zeitlichen Ausgangswert, zwei bei halber Schrittweite und schließlich einer bei Schrittende) bestimmt, aus denen die endgültigen Näherungswerte bei Schrittende, also an der Stelle  $(t+\Delta t)$ , berechnet werden. Dieses numerische Integrationsverfahren arbeitet ohne Iteration und Anlaufrechnung, sondern bestimmt die Näherungslösung durch Extrapolation. Hinsichtlich seiner Genauigkeit ist es ein Verfahren vieter Ordnung, d. h. die Fehler gehen mit fünfter Ordnung ein. Daraus folgt, dass der Fehler bei Schrittverkleinerung sehr rasch abnimmt. Da das Verfahren ein Überschreiten der zulässigen Schrittweite nicht von selbst durch große Ergebnisdifferenzen (Stabilität) und auffällig langsame oder keine Konvergenz anzeigen, ist eine richtige und automatische Schrittbenennung von entscheidender Bedeutung [1].

In Abb. 8.1 ist der Ablauf der Vorgehensweise bei der Lösung des Differentialgleichungssystems dargestellt. Ausgehend von der Bereitstellung des Gleichungssystems – unter Verwendung des Kontaktmodells zur Ermittlung der Kräfte und Momente – wird die Gleichung in Matrizenform nach dem Beschleunigungsvektor aufgelöst. Das numerische Integrationsverfahren liefert für den nächsten Zeitschritt die Wege und die Geschwindigkeiten, aus denen die Insassenverlagerung und die Kontaktkräfte ermittelt werden. Daraus ergibt sich wieder ein Differentialgleichungssystem, das erneut aufgelöst und integriert wird. Diese Schleife wird solange durchlaufen, bis die vorgegebene Zeitschranke (beispielsweise  $t_{\max} = 200 \text{ ms}$ ) überschritten wird [2].



**Abb. 8.1** Aufstellung und Lösung des Differentialgleichungssystems (aus [2])

### 8.2.2 Mehrkörper-Systeme mit dem Fokus „Unfallrekonstruktion“

In der Unfallrekonstruktion findet eine Vielzahl von Programmen und Verfahren Anwendung, die sich auf Gesetzmäßigkeiten der klassischen Mechanik zurückführen lassen, wie Stoßtheorie mit unterschiedlichen Ergänzungshypothesen, den Schwerpunkt- und Drallsatz, den Impuls- und Drehimpulssatz sowie den Energieerhaltungssatz, wobei elasto-plastische Stoffgesetze verwendet werden. Sie sind für die forensische Unfallanalyse zur Ermittlung der Kollisionsgeschwindigkeiten von entscheidender Bedeutung [3, 4]. Die etwa bis Mitte der 1990er Jahre am häufigsten eingesetzten Rekonstruktionsverfahren werden unter dem Begriff „Rückwärts-Rechnung“ zusammengefasst und wurden in grafisch-manueller Weise angewandt. Später wurden sie dann in Rechnerprogramme umgesetzt und genutzt (ausführlich erläutert in [5, 6]). Bei dieser Art der Rekonstruktion wird aus den Endlagen der beteiligten Fahrzeuge unter bestimmten Voraussetzungen auf die Kollisions- und schließlich die Fahrgeschwindigkeit geschlossen.

Mit den Rechenprogrammen zur „Vorwärts-Rechnung“ dagegen wird der Bewegungsablauf einer Fahrzeug/Fahrzeug- oder einer Fahrzeug/Hindernis-Kollision von einem beliebigen Zeitpunkt vor Kollisionsbeginn bis zum Stillstand des Fahrzeugs bzw. der Fahrzeuge betrachtet. Dazu wird ein theoretisches Fahrzeugmodell zugrunde gelegt, für das die Bewegungsgleichungen zur Beschreibung des Bewegungsablaufs während der InCrash- und der PostCrash-Phase aufgestellt werden.

### 8.2.3 Finite-Elemente-Methode

In Abschn. 8.2.1 wurden Systeme gewöhnlicher Differentialgleichungen behandelt, die sich aus der Bewegung von Starrkörpern ergeben. Untersucht man die Bewegung von deformierbaren Körpern, ergeben sich partielle Differentialgleichungen 2. Ordnung. Man klassifiziert die partiellen Differentialgleichungen in drei Gruppen: elliptische, parabolische und hyperbolische Differentialgleichungen, wobei die beiden letzteren transiente Probleme beschreiben. Zur Lösung der Gleichungen der Crash-Simulation haben sich Programm-systeme durchgesetzt, die auf der Methode der Finiten Elemente aufbauen. In der Literatur finden sich unterschiedliche äquivalente Zugänge zur Finite-Elemente-Methode (FEM). In der Mathematik wird die FEM oft über die schwache Formulierung der Differentialgleichung und einer geeigneten Wahl der Ansatzfunktionen hergeleitet [7, 8]. In der Mechanik dagegen wird die FEM über das Prinzip der virtuellen Verschiebungen oder auch über das Prinzip der minimalen potentiellen Energie hergeleitet. Zahlreiche Lehrbücher über die Finite-Elemente-Methode mit ingenieurwissenschaftlichem Hintergrund sind geschrieben worden, wovon hier nur einige Beispiele genannt werden sollen [9, 10, 11, 12, 13].

Alle Formulierungen haben gemeinsam, dass die Lösung des Problems durch eine geeignete Summation von Funktionen angenähert wird, die jeweils nur auf einem kleinen Gebiet von Null verschieden ist; diese Funktionen werden Ansatz- oder Formfunktionen genannt. Für die Finite-Elemente-Methode wird die Geometrie vernetzt, d. h. das Bauteil wird durch kleine zusammenhängende Elemente (Balken-, Schalen- oder Volumenelemente) beschrieben. Die Eckpunkte der Elemente nennt man Knoten. Die Formfunktionen ergeben sich automatisch durch die Knoten, d. h. bei linearen Elementen ergeben sich Funktionen, die an einem Knoten den Wert eins haben und linear zu den benachbarten Knoten der umliegenden Elemente auf Null abfallen. Mit der FEM findet man eine Näherungslösung, die sich aus der geeigneten gewichteten Summation der durch die Knoten definierten Formfunktionen ergibt.

Eine Aufgabenstellung, die zu einer elliptischen Differentialgleichung führt, ist beispielsweise die Berechnung der Spannungsverteilung in einem Bauteil bei statischer Last. In der Crash-Simulation löst man Differentialgleichungen mit hyperbolischem Charakter. Bei transienten Problemen wird die Finite-Elemente-Methode zur Beschreibung des räumlichen Problems verwendet, was zu einer Gleichung führt, die nur noch zeitliche Ableitungen enthält (Semi-Diskretisierung). Diese können numerisch gelöst werden, indem die verbleibenden Zeit-Variablen mit einem geeigneten Zeitschrittverfahren diskretisiert werden. In der Praxis kommen verschiedene Zeitschrittverfahren zur Anwendung, die aber alle auf dem Verfahren der Finiten Differenzen basieren. Nach einer Zeitdiskretisierung ist das Problem so weit aufbereitet, dass mit Hilfe eines Computers die Lösung des Problems ermittelt werden kann. Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal der Zeitdiskretisierungen ist, ob bei der Lösung ein großes lineares Gleichungssystem gelöst werden muss oder nicht. Ist ein großes Gleichungssystem zu lösen, spricht man von impliziten Verfahren, ist dies nicht nötig, spricht man von expliziten Verfahren. Dieser Unterschied hat in der Praxis eine

große Bedeutung, da sich durch das Lösen eines großen Gleichungssystems spezielle Anforderungen an die Rechnerarchitekturen ergeben. Soll ein Computersystem für explizite Verfahren verwendet werden, ist die wichtigste Anforderung die Prozessorgeschwindigkeit. Die Anforderungen an Arbeitsspeicher und IO- (Input/Output-) Leistung dagegen sind wesentlich geringer als bei Rechnersystemen für implizite Verfahren. Ein weiterer Vorteil der expliziten Verfahren besteht darin, dass sich viele nicht-lineare Phänomene, wie z. B. Kontakt von zwei Bauteilen, einfacher darstellen lassen. Der numerische Vorteil der expliziten Verfahren, der darin besteht, dass kein Gleichungssystem gelöst werden muss, geht jedoch mit dem Nachteil einher, dass nur Vorgänge mit relativ kurzer Zeitdauer untersucht werden können. Diese Einschränkung gilt nicht für implizite Verfahren, hier kann der einzelne Zeitschritt, vor allem bei linearen oder schwach nichtlinearen Aufgabenstellungen, sehr groß sein.

Die unterschiedlichen Anforderungen und Möglichkeiten, die sich aus der Zeitdiskretisierung ergeben, sind sicherlich ein Grund dafür, dass ursprünglich die kommerziellen Hersteller von FEM-Software entweder auf das implizite oder das explizite Verfahren fokussiert waren. Erst in jüngster Zeit wurde in die kommerziellen Programme das jeweils andere Zeitschrittverfahren implementiert. Damit können jeweils die Vorteile beider Verfahren genutzt werden. Auf eine Kombination beider Verfahren wird in Abschn. 8.2.4 eingegangen.

Da es sich in der Insassensimulation oft um nichtlineare, dynamische Vorgänge von kurzer Dauer handelt, kommt meist die Finite-Elemente-Methode mit der expliziten Zeitdiskretisierung, auch Explizite Finite-Elemente-Methode genannt, zum Einsatz. Dem Anwender stehen kommerzielle Implementierungen zur Verfügung, die Detailkenntnisse der Theorie nicht mehr erforderlich machen. Darüber hinaus ist das Aufstellen einer Differentialgleichung nicht erforderlich. Das Lösen einer Aufgabe erfordert lediglich die Beschreibung der Geometrie (Gebiet), die Materialeigenschaften, die Rand- und Anfangsbedingungen sowie die äußeren Lasten.

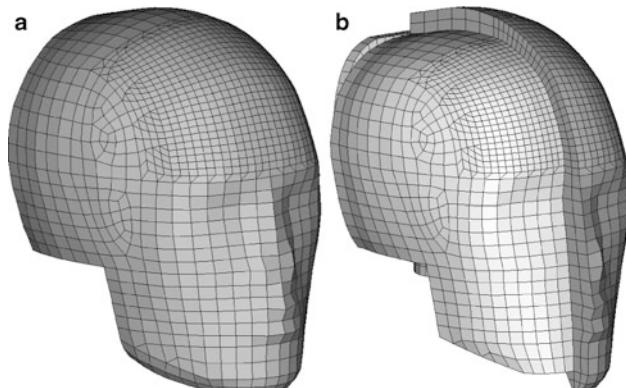
Im Folgenden soll an einem einfachen Beispiel illustriert werden, welche Arbeitsschritte nötig sind, um ein Problem für eine FEM-Berechnung aufzubereiten. Dabei soll der Aufprall eines Dummy-Kopfes auf ein Stahlprofil mit der Finite-Elemente-Methode bearbeitet werden. Ziel der Aufgabe ist es, die auftretende Kopfbeschleunigung zu berechnen. Als erster Schritt wird die Geometrie so beschrieben, dass das Programm die Ansatzfunktionen bestimmen kann. Dazu wird die Geometrie in einem Pre-Prozessor eingelesen und vernetzt. Durch diesen Arbeitsschritt wird die Geometrie in kleine Segmente und einfache Volumina zerlegt. Neben Volumenelementen stehen Elementtypen mit besonderen Eigenschaften zur Verfügung, wie Schalen-, Platten-, Balken- und Stab-Elemente. Die Programme bieten für jeden Elementtyp oft unterschiedliche Elementformulierungen an. Unterschiede können sich durch die Verwendung unterschiedlicher Annahmen, wie beispielsweise in der klassischen Schalentheorie diskutiert, oder unterschiedliche Eigenschaften der Ansatzfunktionen ergeben. Das Aufteilen der Geometrie wird als Vernetzung bezeichnet. Diejenigen Elemente, die durch gemeinsame Knoten verbunden sind, werden als Kontinuum angesehen. Da sich die Lösung aus der Linearkombination der Formfunk-

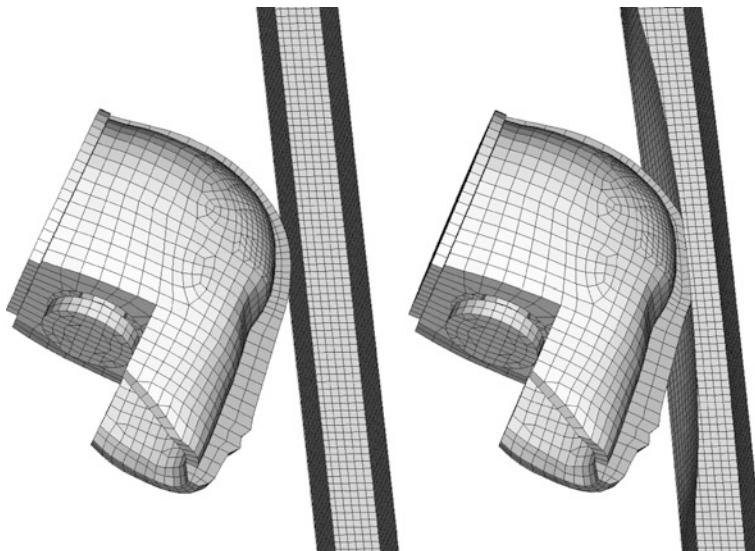
tionen ergibt, die über die Aufteilung der Geometrie definiert werden, sollte es an den Stellen fein strukturiert sein, an denen lokal auftretende Deformationen erwartet werden. So ist es beispielsweise sinnvoll, die Kopfhaut im Bereich des Auftreffpunktes feiner zu vernetzen.

Neben den geometrischen Eigenschaften müssen Materialeigenschaften berücksichtigt werden, die das Bauteilverhalten bestimmen. Diese werden durch Materialgesetze, also dem Zusammenhang zwischen Dehnungs- und Spannungszustand, beschrieben. Für das Stahlprofil soll hier ein sehr einfacher Zusammenhang, das *Hooksche Gesetz*, verwendet werden. Dies ist ein linear-elastisches Materialgesetz, für dessen Beschreibung lediglich der E-Modul und die Poisson-Zahl benötigt werden. Die Haut des Dummy-Kopfes besteht aus Vinyl, das mit einem visko-elastischen Materialgesetz modelliert werden soll. Der Anwender muss sich hier entscheiden, welches der im Programm angebotenen Materialgesetze er verwenden will. Entsprechend dieser Wahl kann er Materialkennwerte aus der Literatur verwenden oder er muss Materialtests durchführen, um die Materialparameter zu bestimmen. Die Vinyl-Haut des Kopfes ist über einen hohen Aluminiumkörper, der den Schädel repräsentiert, gespannt. Der Aluminiumkörper kann in der Rechnung als starr angenommen werden, soll ein lokales Separieren der Kopfhaut vom Aluminium-Schädel möglich sein. Die Zuordnung zwischen den Materialeigenschaften und der Geometrie erfolgt über eine Zuweisung auf die einzelnen Elemente.

Zur weiteren Beschreibung des Problems sind die Randbedingungen zu definieren. Dies ist im vorliegenden Beispiel die feste Lagerung des Stahlprofils am Rand der sie umgebenden Karosseriestruktur. Die Anprallgeschwindigkeit des Kopfes wird als Anfangsbedingung vorgegeben. Abschließend ist noch die Kontaktdefinition mit den Kontaktparametern (z. B. Reibungskoeffizienten) für den Kontakt zwischen der Kopfhaut mit dem Aluminiumkörper und dem Träger auszuführen. Bevor die Rechnung startet, ist noch anzugeben, welcher Zeitraum betrachtet werden soll. Damit sind alle notwendigen Eingaben getätig, und die Berechnung kann starten. Im Anschluss an die Berechnung erfolgt das so genannte Post-Processing, bei dem die Ergebnisse visualisiert werden. Die Darstellung in Abb. 8.2 zeigt das Modell des Kopfes und Abb. 8.3 eine Abfolge des Kopfanpralls.

**Abb. 8.2** Einfaches Finite-Elemente-Modell für den Kopfanprall nach FMVSS 201, **a** Kopfhaut aus Vinyl, **b** Aluminiumkern (Modell aus [14])





**Abb. 8.3** Bildfolge beim Kopfanprall auf deformierbares Stahlprofil (rechte Hälfte der Vinylhaut ausgeblendet)

Die kommerziellen FEM-Programme, die in der passiven Sicherheit zur Anwendung kommen, verfügen neben den rein klassischen FEM-Funktionen über viele weitere spezifische, vereinfachte Modelle. Die vereinfachten Modelle erlauben, komplexe Vorgänge in Komponenten vereinfacht abzubilden. So kann z. B. die Wirkung eines Retraktors in einem vereinfachten Modell mit Lastkurven sowie Zünd- und Verzögerungszeiten beschrieben werden. Die Modellierung des mechanischen Aufbaus des Retraktors ist somit nicht erforderlich. Weitere Ersatzmodelle existieren beispielsweise für Schweißpunkte, Gelenke, Gelenkanschläge, Feder-Dämpfer, Gurte, Gurtaufroller, Gurtkraftbegrenzer, Gurtumlenkpunkte und Beschleunigungssensoren.

#### 8.2.4 Kontrollvolumen und Strömungssimulation

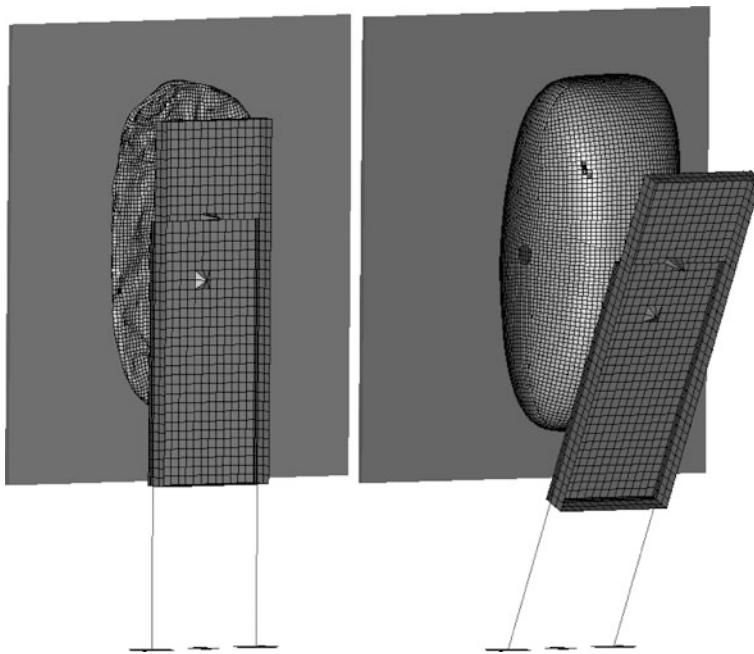
Ein wichtiger Baustein des Insassenschutzsystems eines Fahrzeugs ist der Airbag. Dabei ist der Entfaltungsprozess des Airbags, der durch die Zündung des Gasgenerators ausgelöst wird, ein hochkomplexer Vorgang. Die Druckverhältnisse im Airbag sind stark abhängig vom zeitlichen Verlauf der Entfaltung und dem damit entstehenden Gasvolumen. Zudem werden sie sowohl von der einströmenden Gasmasse und ihrer Temperatur als auch von den Gasverlusten am durchlässigen Airbaggewebe bzw. an den Ausströmöffnungen beeinflusst. Ferner wird die Gasströmung, die örtlich Überschallgeschwindigkeit erreicht, durch Umlenkbleche am Generator und Fangbänder im Airbag umgelenkt und behin-

dert. Schließlich gestaltet sich die exakte Beschreibung des orthotropen nichtlinearen Airbag-Materials als überaus schwierig. Daher begnügen sich viele Simulationen mit einer stark vereinfachten Modellierung des Gasraums. Diese geht von einer skalaren Bilanzgleichung aus, die ein- und ausströmende Massen bilanziert. Das Verfahren beruht auf einer Ende der 1980er Jahre erschienenen Veröffentlichung von Wang und Nefske [15]. Im Laufe der Jahre wurde das Verfahren verschiedentlich erweitert, um Effekte, die bei der komplexen Entfaltung auftreten, durch zusätzliche Parameter zu modellieren. So sind mittlerweile beispielsweise Jetting-Effekte, Temperatureinflüsse oder komplexe Gewebedurchlässigkeiten abbildbar. All diesen Erweiterungen ist jedoch gemein, dass sich der Druck nicht lokal auflösen lässt. Eine weitere gängige Vereinfachung findet sich bei der Modellierung der Gewebeeigenschaften: Beim Falten, aber auch während des Entfaltungsvorganges treten viele sehr kleine Falten in Erscheinung, für deren Modellierung ein extrem feines Netz erforderlich wäre. Um aber eine Modellierung mit einer vertretbaren Elementanzahl zu ermöglichen, wird den Elementen erlaubt, sich in Druckrichtung zu deformieren. Damit kann die geometrische Eigenschaft von Stoffen, unter Druckspannungen auszuknicken, durch diese Modifikation der Materialeigenschaften abgebildet werden.

Diese und weitere Vereinfachungen erfordern bei der Modellerstellung eines Airbags einen Versuch zum Abgleich des Modells; die Einbeziehung der experimentellen Simulation wird als Validierung des Modells bezeichnet. Dazu wird ein gefalteter Airbag gezündet und der Impuls beim Aufprall auf ein Pendel oder eine Kugel gemessen. Das Modell wird anschließend durch sinnvolle Anpassung der Parameter in der Airbag-Definition so angepasst, dass es mit dem Versuch vergleichbare Beschleunigungen des Pendels liefert. Ist das Simulationsmodell auf diese Weise abgeglichen, wird es zur Berechnung in komplexeren Umgebungen zur Auslegung des Rückhaltesystems verwendet. Abbildung 8.4 stellt zwei typische Versuchsaufbauten zur Airbag-Validierung dar. In Lastfällen, bei denen die Interaktion des Insassen mit dem Airbag zu einem Zeitpunkt stattfindet, bei dem der Airbag bereits entfaltet ist, können mit dem oben beschriebenen Verfahren und einem relativ geringem Rechenaufwand sehr gute Ergebnisse erzielt werden.

Neuere Vorschriften, wie beispielsweise der Sicherheitsstandard FMVSS 208, und komplexe Airbag-Konstruktionen erfordern jedoch in zunehmendem Maße die exakte Simulation auch in der frühen Entfaltungsphase. Hier sind die vereinfachten Modelle oft nicht mehr ausreichend, da es mit ihnen nicht möglich ist, die Strömungsverhältnisse im Airbag lokal aufzulösen. Eine Schwierigkeit ergibt sich aus den örtlich sehr kleinen geometrischen Details des Generatorgehäuses, der Umlenkleche und eventuell vorhandener Zuführungsleitungen. Darüber hinaus weist der Airbag im gefalteten Zustand sehr viele kleine Kammern und ausgedehnte flache Schichten auf, durch die das Gas während des Entfaltens strömen muss. Dies erfordert eine sehr genaue räumliche Auflösung. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die Lage der Airbag-Falten räumlich ändert.

Zur Simulation des teilweise mit Überschallgeschwindigkeit einströmenden Gases existieren in den verfügbaren kommerziellen Programmen unterschiedliche Ansätze: Gearbeitet wird mit der Finite Point-set Method (FPM) oder einer besonderen Art der ALE-



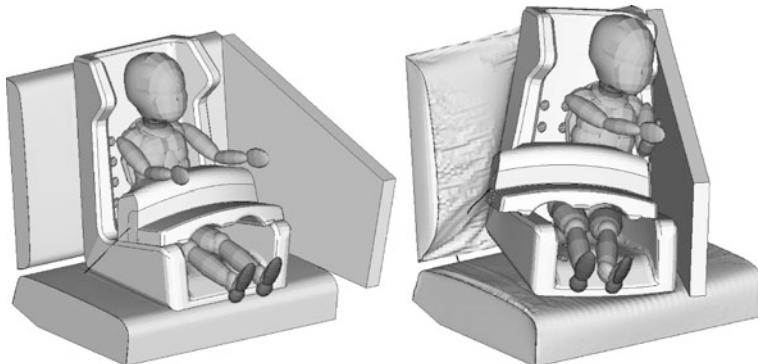
**Abb. 8.4** Finite-Elemente-Modell eines einfachen Versuchs mit stehendem Pendel zur Validierung eines Airbag-Modells (mit freundlicher Genehmigung der Volkswagen AG [16])

Kopplung (ALE: Arbitrary Lagrangian-Eulerian) [17] oder der Kopplung mit bestehenden Strömungsprogrammen CFD (Computational Fluid Dynamics). Eine sehr weit verbreitete Methode ist die Corpuskular-Methode, bei der die Gasmoleküle zusammengefasst werden und ihre Interaktion untersucht wird [18]. All diese Verfahren sind in der Lage, den Zustand des Gases lokal aufzulösen, arbeiten aber weiterhin mit Vereinfachungen der Gasmodellierung und der geometrischen Details, da eine exakte Behandlung der komplizierten physikalischen Vorgänge mit einem vertretbaren Rechenaufwand derzeit nicht möglich ist. Trotz der Vereinfachungen kann man heute den Entfaltungsvorgang eines Airbags in allen Entfaltungsphasen realistisch abbilden und somit die Entwicklungszeiten für Rückhaltesysteme mit der numerischen Simulation stark verkürzen.

### 8.2.5 Gekoppelte Löser

Falls ein einzelnes Programm nicht alle erforderlichen Eigenschaften aufweist, können die Programme gekoppelt werden. Eine Kopplung kann einmalig erfolgen, indem das Ergebnis eines Programms oder Verfahrens Eingang findet in das andere. Eine Kopplung kann jedoch auch simultan erfolgen. Dabei wird zwischen den verschiedenen angewandten Programmen ein regelmäßiger Austausch von Informationen während einer Berechnung

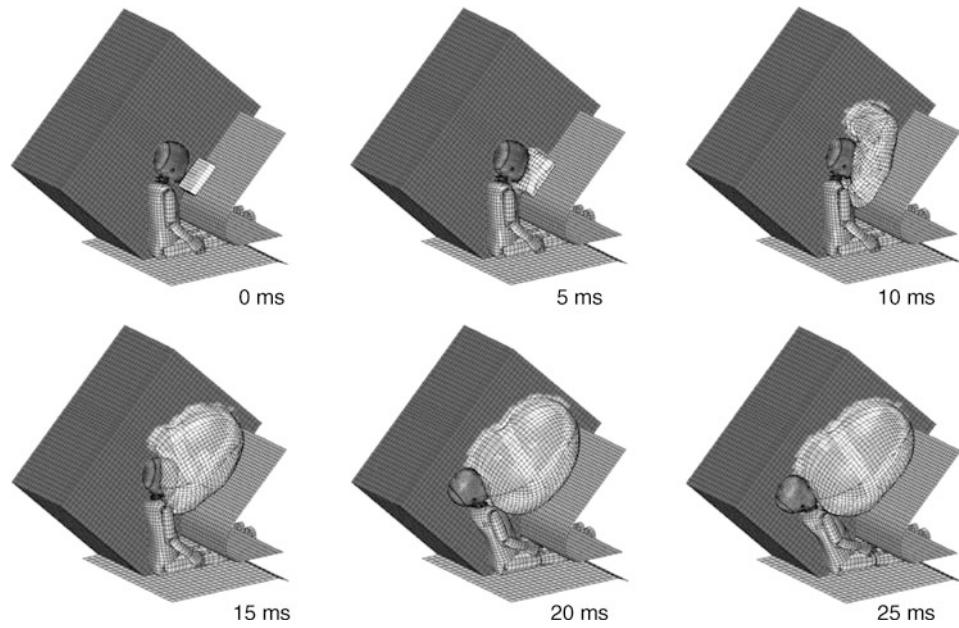
durchgeführt. Eine gelegentlich genutzte Programmkopplung ist die Verbindung eines MKS-Programms, das die Dummy-Bewegung liefert, mit einem expliziten FEM-Löser, der die Deformation der Kontaktumgebung berechnet. Abbildung 8.5 zeigt ein Dummy-Modell in einer FEM-Umgebung; zur Berechnung wurden zwei Programme gekoppelt. Eine Programmkopplung vereint die Vorteile beider Programme, erfordert allerdings die jeweilige Lizenzierung und ausreichende Kenntnisse beider Programme. Wird das Programm auf Clustern genutzt, ergeben sich oft starke Einschränkungen für die effektive Nutzung der Hardware aufgrund einer eventuell ungenügend abgestimmten Parallelisierung beider Programme.



**Abb. 8.5** Kopplung von MADYMO und LS-DYNA zur Untersuchung von Testszenarien eines Kinderrückhaltesystems im Seitenaufprall (aus [19])

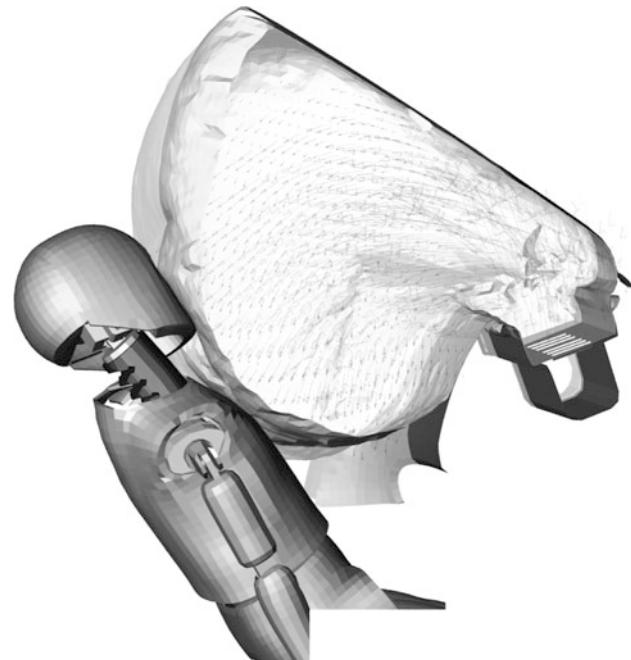
Die simultane Kopplung von unterschiedlichen numerischen Verfahren in einem Programmsystem hat dagegen weniger Nachteile. Die Abb. 8.6 und 8.7 zeigen Anwendungen von simultanen Kopplungen von unterschiedlichen Verfahren wie CFD oder ALE mit Expliziten Finiten Elementen in einem Programm.

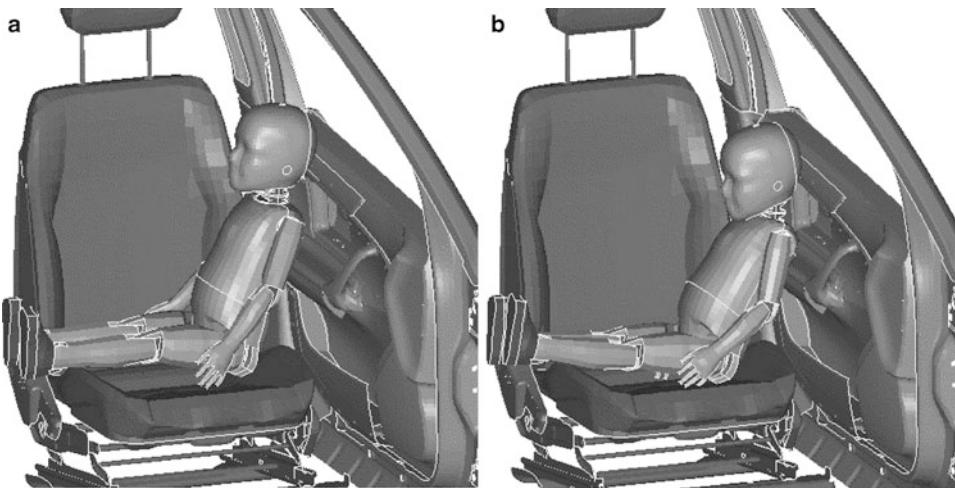
Bei einer sequentiellen Kopplung werden Ergebnisse aus einem Verfahren als Eingabedatensatz für ein anderes Berechnungsverfahren verwendet. So können beispielsweise implizite mit expliziten Verfahren gekoppelt werden. Mit einer impliziten FEM-Berechnung lässt sich in hervorragender Weise die Positionierung und Anfangsdeformation eines Dummies bestimmen, da das implizite Verfahren den Vorteil nutzt, dass das Einsitzen ein langsamer Vorgang mit einem nur geringen nichtlinearen Anteil ist. Abbildung 8.8 zeigt ein implizit positioniertes Dummy-Modell. Im Anschluss kann dann das hochgradig nichtlineare Problem der Airbag-Entfaltung und der Interaktion mit dem Dummy explizit berechnet werden. Weitere Beispiele für nacheinander geschaltete Rechnungen finden Anwendung, wenn beispielsweise Einflüsse des Fertigungsprozesses auf einzelne Bauteile in einer Crash-Simulation berücksichtigt oder die elastische Rückfederung der Bauteile nach einem Crash bestimmt werden sollen.



**Abb. 8.6** Kopplung der Finite-Elemente-Methode mit der ALE-Methode in einem Programmsystem (aus [20])

**Abb. 8.7** OoP-Simulation mit Strömungs- und FEM-Berechnung in einem Programm [21]





**Abb. 8.8** Sequenzielle Kopplung verschiedener Berechnungsverfahren, **a** Dummy nach Positionierung durch einen Pre-Prozessor, **b** Dummy in statischer Ruhelage nach impliziter Berechnung (aus [22])

### 8.2.6 Hardware-Architekturen

Während in den 1980er und 1990er Jahren die Berechnungen auf großen Vektorrechnern durchgeführt wurden, nutzt man heute in der Regel Clustersysteme. Diese Cluster nutzen Bauteile wie CPU, Speicher oder Grafikchips, die auch bei handelsüblichen PCs (Personal Computer) verwendet werden. Die FEM-Programme zerlegen dazu ein Problem in mehrere Teilprobleme, die dann getrennt auf den einzelnen Rechenkernen (Cores) im Cluster gelöst werden. Während der Rechnung erfolgt der Informationsaustausch zwischen den einzelnen Prozessoren über das Netzwerk oder das Motherboard. Mit der Cluster-Technologie ist es möglich, sehr hohe Rechenleistung zu einem erschwinglichen Preis zu erhalten. Ein weiterer signifikanter Leistungsschub wird für die nächsten Jahre durch den Einsatz der GPUs (Graphics Processing Unit) erwartet. Als Betriebssystem der Cluster wird hauptsächlich Linux verwendet, während auf Arbeitsplatzrechnern neben Linux auch Windows zum Einsatz kommt.

### 8.2.7 Kommerzielle Programmsysteme

Die oben beschriebenen Verfahren sind in einigen Programmsystemen implementiert: Der am weitesten verbreitete Vertreter des MKS-Verfahrens für den Insassenschutz ist MADYMO [23]. Als MKS-Programm für die Unfallrekonstruktion wird in Europa neben PC-CRASH [24] das Programm CARAT (Computer Aided Reconstruction of Accidents in Traffic) [25] am häufigsten eingesetzt. Für die Auslegung mit expliziten FEM-Programmen

sind LS-DYNA [26], PAM-CRASH [27] und RADIOSS [28] weit verbreitet. Das Programm ABAQUS [29] erlaubt seit einigen Jahren ebenfalls aufwändige explizite Berechnungen zur Insassen-Simulation. Alle oben genannten Programme wurden in den letzten Jahren stark erweitert, um auch die angrenzenden Berechnungsmethoden abdecken zu können. So wurde beispielsweise MADYMO um einen FEM-Programmteil ergänzt oder LS-DYNA durch einen integrierten impliziten Programmteil erweitert.

---

## 8.3 Berechnungsmodelle

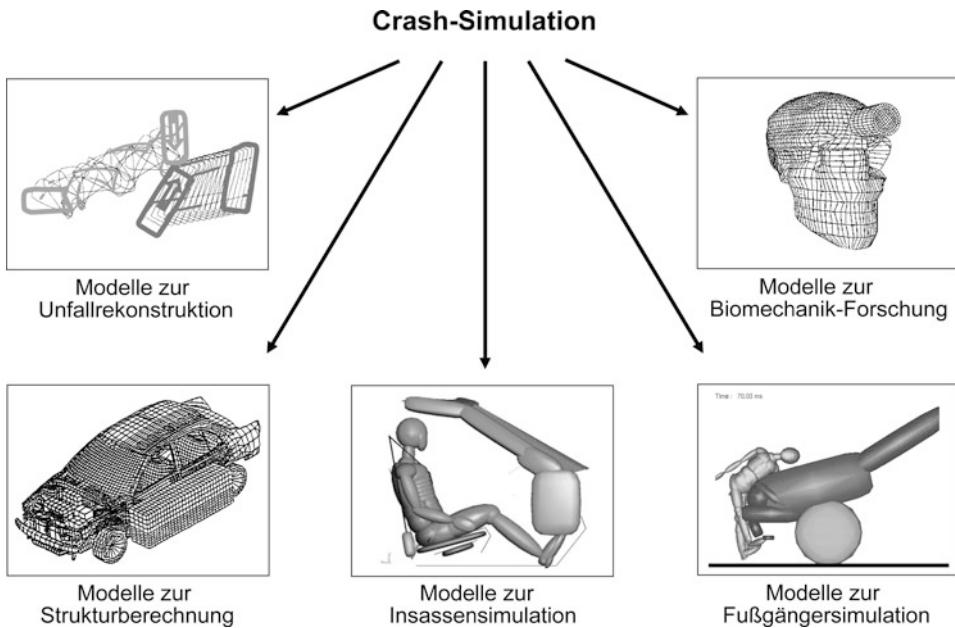
Die Zielsetzungen der rechnerischen Simulation im Rahmen der passiven Sicherheit liegen in Forschung und Entwicklung bei

- der Rekonstruktion realer Fahrzeug/Fahrzeug- und Fahrzeug/Hindernis-Kollisionen (Kontaktstellen und Bewegungsgrößen),
- der Auslegung von Deformations- und Kontaktstrukturen sowie von Insassenschutz-Systemen am bzw. im Fahrzeug (Steifigkeiten und Energieaufnahmevermögen),
- der Belastung der Körperregionen von Insassen und äußeren Verkehrsteilnehmern und ihrer Bewertung hinsichtlich der körperteilspezifischen Schutzkriterien sowie
- der Analyse von Verletzungsmechanismen an Simulationsmodellen menschlicher Körperteile (Kopf, Halswirbelsäule, Brustkorb, Becken und Abdominalbereich sowie Extremitäten).

Die dabei angewandten Programmsysteme verwenden Modelle mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad. Diese sind als Übersicht in Abb. 8.9 dargestellt und sollen nachfolgend beschrieben werden:

### 8.3.1 Unfallrekonstruktion

Bei den heute am häufigsten angewandten Rechenprogrammen zur Vorwärtsrechnung gibt es zwei Möglichkeiten für die Berechnung der Kollision (InCrash-Phase): Entweder werden die Stoßgleichungen in einer anderen Form als bei der Rückwärtsrechnung verwendet oder es erfolgt eine kontinuierliche Berechnung über die angenäherte Stoßdauer (Kraftrechnung). Bei der Kraftrechnung werden zur Berechnung der Kontaktkräfte steifigkeitsbasierte Modelle in Form von Kontakt-Ellipsoiden [30] oder von dynamischen Netzen [31] verwendet. Für die Analyse der Auslaufbewegungen (PostCrash-Phase) werden in den aktuellen Programmen mathematische Modelle für die Fahrzeuge verwendet. Der Eingabe-Datensatz für die InCrash- und die PostCrash-Phase setzt sich zusammen aus der Fahrzeuggeometrie (Länge, Breite, Schwerpunktslage, Radstand und Spurweite), den Kinetik-Parametern (Masse und Massenträgheitsmoment, Radumfangskräfte, Reib- und Rollwiderstandkoeffizienten, translatorische und rotatorische Geschwindigkeiten)

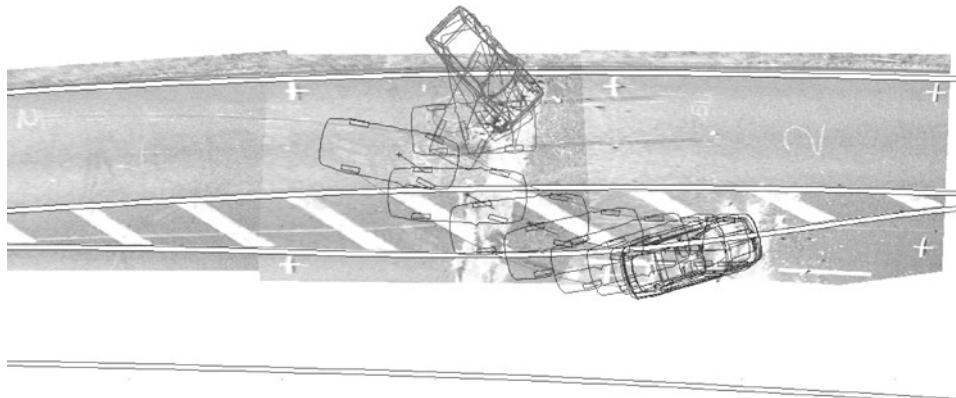


**Abb. 8.9** Modellarten und Einsatzgebiete in der Crash-Simulation

und den Struktursteifigkeiten. Die Programm-Ausgabe besteht aus dem geometrischen Bewegungsablauf der beteiligten Fahrzeuge (Abb. 8.10) ohne oder mit berechneten Beschädigungen an den Kontaktstellen, der Bewegung der Radaufstands- und der Schwerpunkte als Ortskurven sowie aus Diagrammen mit den Bewegungsgrößen in Abhängigkeit von der Zeit. Die Ermittlung der Eindringtiefen erfolgt entweder bei den Stoßmodellen durch die Auswertung von Fotos der beschädigten Fahrzeuge oder bei der Kraftrechnung mit Hilfe des jeweiligen Kontaktmodells in mehr oder weniger guter Annäherung. Anhand der Größe der Eindringung und der vorgegebenen Steifigkeiten werden die Verformungs Kräfte ermittelt. Die Darstellung in Abb. 8.10 zeigt als Beispiel die Kollisionsstellung bei Erstkontakt und die Auslaufbewegungen entlang der gesicherten Spuren bei einer PKW/PKW-Kollision mit einer Geschwindigkeit von 70 km/h für den von links nach rechts fahrenden PKW (Skoda) und mit 50 km/h für den sich von rechts annähernden PKW (VW Golf). Berechnet wurde das Beispiel mit dem Programm CARAT [25, 32].

### 8.3.2 Strukturberechnung

In der Strukturberechnung wird vornehmlich mit der Methode der Finiten Elemente gearbeitet, und zwar werden beispielsweise Untersuchungen der statischen Eigenschaften von Karosserien oder die Analyse von Schwingungen und Geräuschen durchgeführt. Ab Mit-



**Abb. 8.10** Ergebnis des Rekonstruktionsprogramms CARAT einschließlich der Ortskurven für die Radaufstandspunkte bei einer PKW/PKW-Gegenverkehrskollision mit 70 bzw. 50 km/h

te der 1980er Jahre wurde die Berechnung auf das Verhalten von Karosseriestrukturen bei Unfallsituationen ausgedehnt, dabei bezogen sich die ersten Untersuchungen auf die Berechnung von vernetzten Baugruppen wie Längsträger unterschiedlichen Querschnitts und Materials.

**Abb. 8.11** FEM-Modell zur Berechnung der Frontstruktur eines VW-Polo bestehend aus 5.555 Schalen-, 106 Balken-elementen und 5.100 Knoten (aus [33])

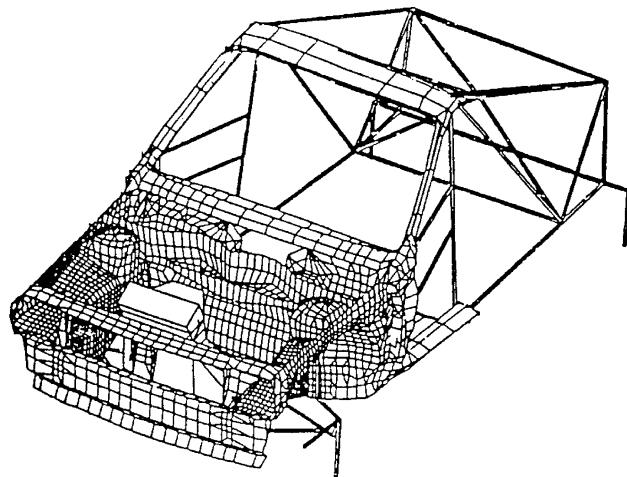
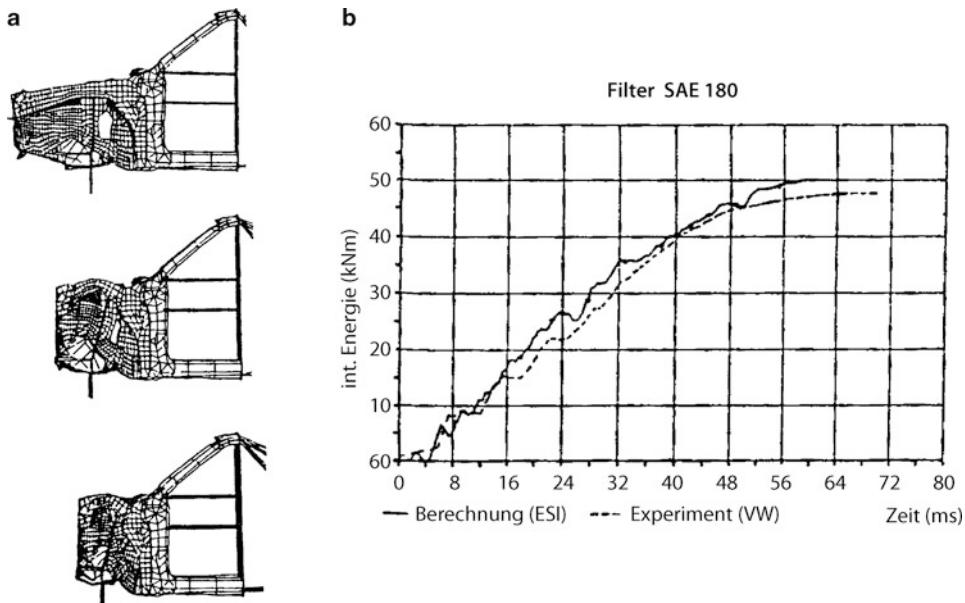


Abbildung 8.11 zeigt die aus ca. 6.000 Schalen- und Balkenelementen bestehende Struktur eines VW Polo (1986) mit insgesamt 5.100 Knoten [33]. Trotz des aus Gründen der Rechnerkapazität vereinfachten Modells zeigten die Verformungen eine Übereinstimmung mit den versuchstechnisch ermittelten Ergebnissen (Abb. 8.12), zudem konnte erstmals eine rechnerisch erstellte Bilanz der Verformungsenergie im Vorderwagenbereich dargestellt werden, die zur damaligen Zeit experimentell nur mit einem unverhältnismäßig hohen

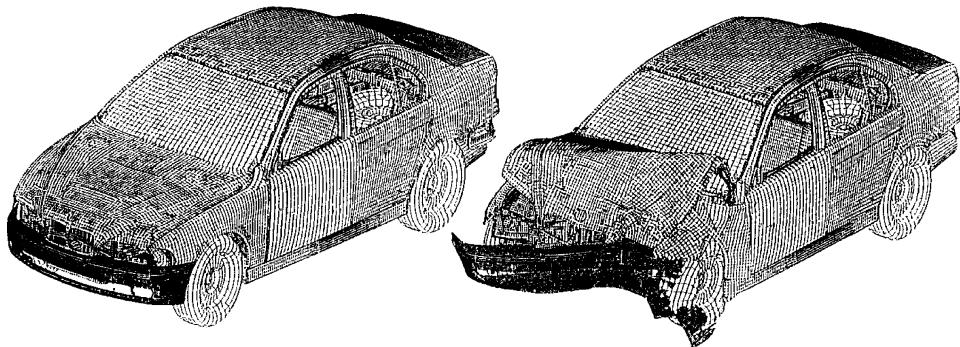
Aufwand möglich gewesen wäre. Danach verteilt sich die Deformationsenergie zu ca. 70 % auf Längsträger und Bodengruppe und der restliche Anteil von 30 % auf die inneren Kotflügel, das Frontend, die Spritzwand und das Kompartiment mit der Heckstruktur; Türen und Klappen sowie die äußereren Kotflügel waren nicht modelliert.



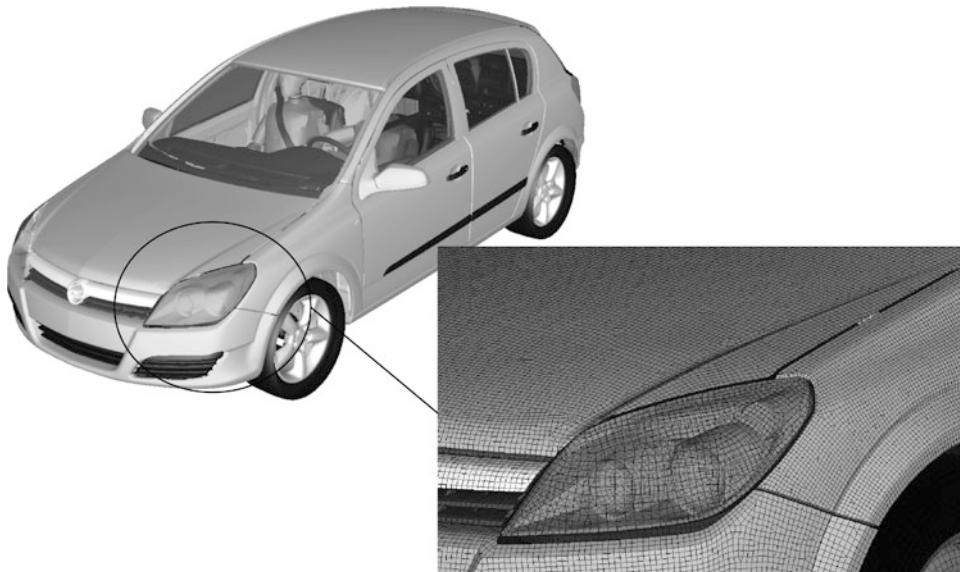
**Abb. 8.12** Rechnerisch simuliertes Deformationsverhalten der Frontstruktur bei 0, 30 und 40 ms (a) und Vergleich der Deformationsenergie zwischen Berechnung und Experiment (b) (aus [33, 34])

Mit Zunahme der Rechnerkapazität und der CPU-Leistung wuchs auch der Detaillierungsgrad der FEM-Modelle bei der Strukturberechnung des Gesamtfahrzeugs.

Das 1987 eingesetzte Modell für den VW Golf bestand aus ca. 20.000 Elementen, das Modell des VW-Passat (1990) nur drei Jahre später bereits aus 30.000 und das Benchmark-Modell von BMW (1995) zur Berechnung eines 40 %-Off-set-Crashes sogar aus ca. 61.000 Elementen [35, 36]. Im Jahr 2000 wiesen Modelle häufig noch einen Detaillierungsgrad von unter 500.000 Elementen auf. Die Darstellungen in Abb. 8.13 zeigen ein FEM-Modell eines älteren BMW, das zur Strukturberechnung bei einem 40 %-Off-set-Crash mit 64 km/h etwa 250.000 Elemente umfasst. Abbildung 8.14 aus dem Jahr 2005 zeigt ein Modell des Opel Astra, das etwa 2,5 Millionen Elemente aufweist. Im Jahr 2012 haben Fahrzeugmodelle eine Größe von 3-8 Millionen Elementen. Für besondere Untersuchungen werden von einigen Firmen auch noch deutlich feinere Modelle verwendet. Die Entwicklung zu immer feineren Modellen ist durch die hohe Anforderungen an die Vorhersagegüte und Verlässlichkeit der Berechnungen nötig. Im Vergleich zu früheren Jahren enthalten heutige Simulationen wesentlich detailliertere Modelle für das Materialverhalten und das



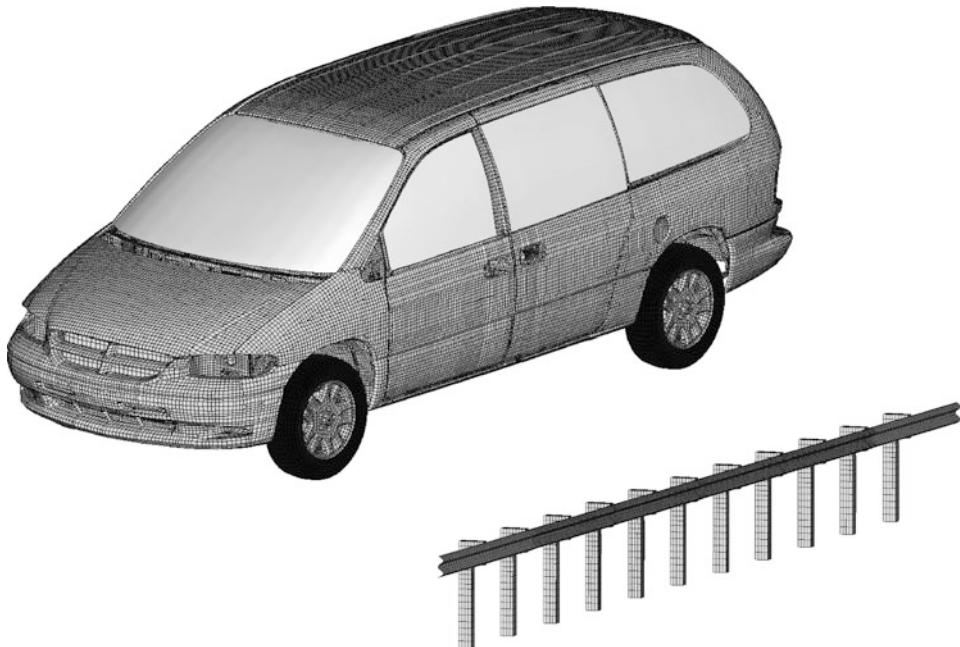
**Abb. 8.13** FEM-Modell zur Berechnung der Strukturdeformation eines BMW (5er Reihe), bestehend aus ca. 250.000 Elementen [37]



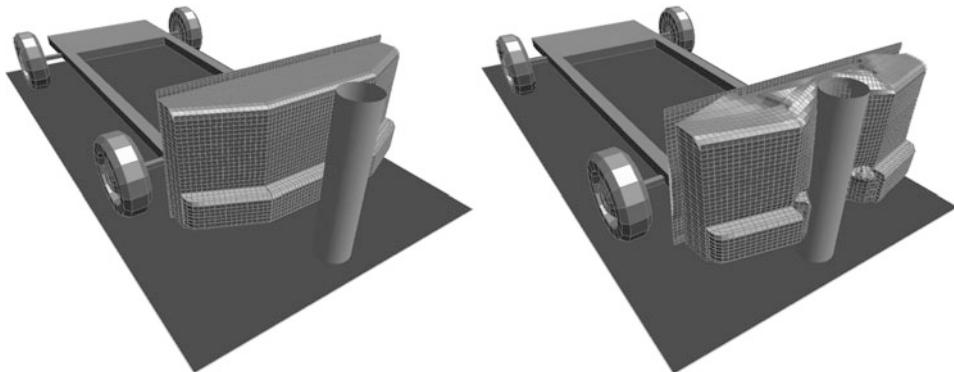
**Abb. 8.14** FEM-Modell zur Berechnung der Crash-Sicherheit eines Opel Astra, bestehend aus ca. 2,5 Millionen Elementen [38]

Materialversagens oder für die Verbindungstechnik wie Schweißpunkte oder Klebungen. Diese aufwändigen Materialmodelle benötigen eine hinreichend feine Vernetzung. Außerdem wird für viele Lastfälle heute die Insassensimulation und die Struktursimulation mit einem Modell simultan durchgeführt und es befindet sich neben dem Modell des Fahrzeugs und der Barriere auch ein detailliertes Modell des Fahrzeuginnenraums, der Sitze, des Rückhaltesystems und eventuell mehrere Dummy-Modelle in einer Berechnung.

Abhängig vom Bauteil sind die Anforderungen zur Beschreibung des Materialverhaltens sehr hoch, sodass für eine realistische Beschreibung des Materials eine umfangreiche Anzahl von Parametern erforderlich ist. Man unterscheidet grob zwischen elastisch-plastischem (Stahlbleche), visko-elastischem (Kunststoffe, reversible Schäume) und hyper-elastischem (Gummi) Verhalten. Sollen die Parameter bestimmt werden, werden nicht nur statische, sondern auch dynamische Kennwerte benötigt. Für einige Materialien (z. B. Glas der Windschutzscheibe, Schweißpunkte, Bleche) ist es zudem sinnvoll, auch das Materialversagen nachzubilden, wozu allerdings noch umfangreiche Material- und eventuell auch Komponententests durchgeführt werden müssen. Heute existieren nur wenige frei oder kommerziell verfügbare Materialdatenbanken für die Anwendung in der Crash-Berechnung. Das Wissen darüber, wie die jeweils auftretenden Phänomene in dem jeweiligen Crash-Programm zu modellieren sind, wurde in den einzelnen Firmen über viele Jahre erarbeitet und wird nur selten an Dritte weitergegeben. Für Strukturen, die bei Crash-Tests wiederholt verwendet werden, wie z. B. Barrieren, gibt es validierte Modelle, auf die im Bedarfsfall zugegriffen werden kann; nur einige wenige Modelle jedoch sind frei verfügbar. Die zurzeit umfangreichste Bibliothek ist an der George-Washington-Universität abgelegt und kann aus dem Internet [39] heruntergeladen werden. Abbildung 8.15 zeigt ein Fahrzeugmodell und ein Modell einer Leitplanke, beide Modelle sind im Internet verfügbar. Die Deformation eines kommerziellen Barriere-Modells ist für einen Lastfall zur Validierung in Abb. 8.16 gezeigt [40].



**Abb. 8.15** Frei verfügbares FEM-Modell eines Fahrzeugs und einer Straßenberandung [39]

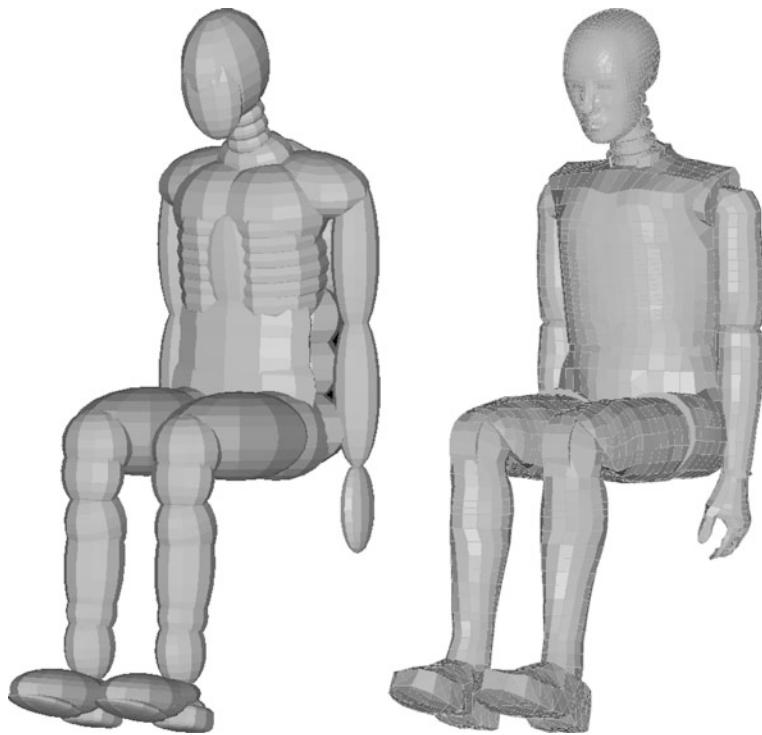


**Abb. 8.16** Finite-Elemente-Modell der IIHS-Barriere für einen Validierungsfall [40]

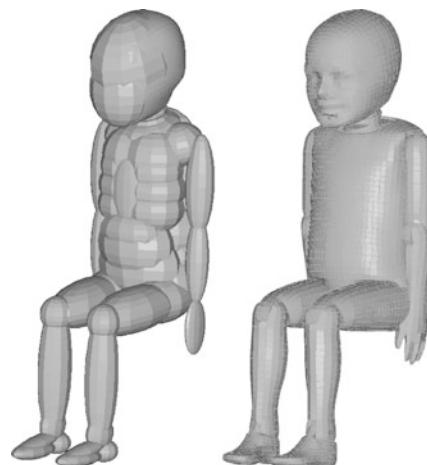
### 8.3.3 Insassensimulation mit Dummy-Modellen

Die am häufigsten untersuchten Lastfälle sind Nachbildungen des Insassen bei Frontal- und Seitenkollisionen. Die dabei untersuchten Szenarien beziehen sich im Wesentlichen auf Lastfälle, die vom Gesetzgeber für die Zulassung gefordert sind (z. B. nach ECE und FMVSS), die für den Fahrzeugvergleich durch die Verbraucherschutzverbände entwickelt wurden (z. B. Euro NCAP), und die von den Versicherungsgesellschaften für die Versicherungseinstufung verwendet werden (z. B. IIHS: Insurance Institute for Highway Safety). Zusätzlich werden häufig noch herstellerinterne Lastfälle untersucht. Entsprechend vielfältig sind die Zielsetzung und damit die Anzahl der unterschiedlichen Berechnungen.

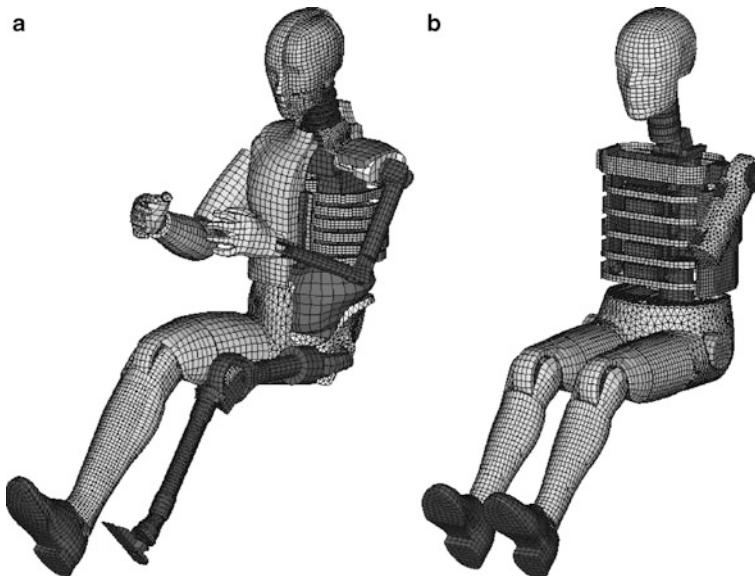
Auf dem Markt stehen Modelle unterschiedlicher Dummies und Barrieren zur Verfügung, die von den Software-Herstellern oder von Dummy-Herstellern entwickelt wurden und sich mit den fahrzeugspezifischen Bauteilen verknüpfen lassen. Für die Validierung der Dummy-Modelle betreiben die Hersteller einen hohen Aufwand, die dazu dynamische und statische Versuche zur Beschreibung der Materialdaten sowie zum Verhalten von Dummy-Komponenten und des kompletten Dummy-Modells in einer vereinfachten Fahrzeugumgebung durchführen. Damit wird sichergestellt, dass das verwendete Dummy-Modell mit den am realen Test-Dummy ermittelten Messwerten übereinstimmende Ergebnisse liefert. Da die Entwicklung der Modelle sehr aufwändig ist, wird in Deutschland bei der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. (FAT) und des Partnership for Dummy Technology and Biomechanics (PDB) seit vielen Jahren eine herstellerübergreifende Entwicklung der Modelle durch entsprechende Arbeitskreise gefördert. In diesen Arbeitskreisen arbeiten Vertreter der Automobilhersteller und vieler Zulieferer zusammen, um eine Modell-Entwicklung nach ihren Vorstellungen zu gewährleisten; Details zur Entwicklung sind in [41] zusammenfassend dargestellt. Darüber hinaus wird die Entwicklung von Modellen in europäischen oder international geförderten Projekten vorangetrieben; eine Auswahl von Dummy-Modellen zeigen die Abb. 8.17 bis 8.20.



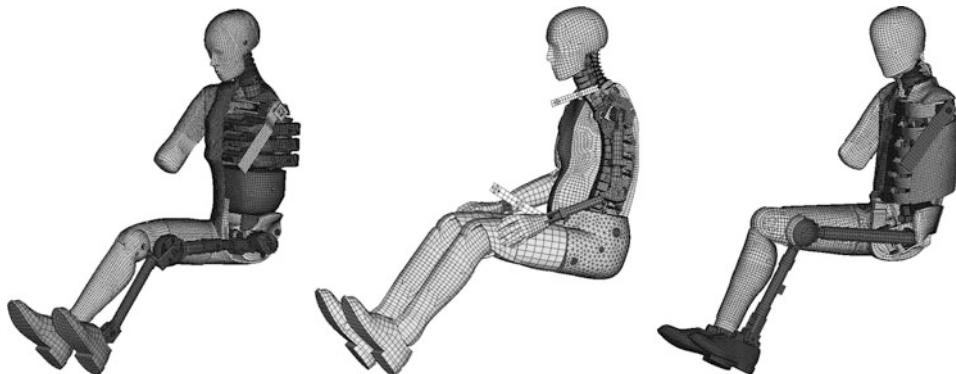
**Abb. 8.17** Facettiertes MKS- und FEM-Modell des HYBRID III 50 %-Dummy [21]



**Abb. 8.18** MKS- und FEM-Modell des 3 Jahre HYBRID III-Dummy [21]



**Abb. 8.19** FEM-Modelle des Dummy HYBRID III 50th (a) und des Side Impact Dummy SID II (b) (von Humanetics Inc. [14])



**Abb. 8.20** FEM-Modelle des Dummy ES-2, BioRID-2 und des WorldSID 50 % (Materialien teilweise ausgebündet) (von DYNAmore GmbH [42])

Die Dummy-Modelle werden entweder in Gesamtfahrzeug-Modellen oder in Submodellen eingesetzt; bei den letzteren handelt es sich um Teilmodelle, deren Ränder entsprechend geführt werden. Da bei Frontalkollisionen die Bewegung des Insassen einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Fahrzeugdeformation hat, lässt sich hier sehr gut die Submodell-Technik anwenden: Die Ergebnisse einer Fahrzeuggberechnung werden verwendet, um sie als Randbedingung im Submodell aufzuprägen. Das Submodell besteht

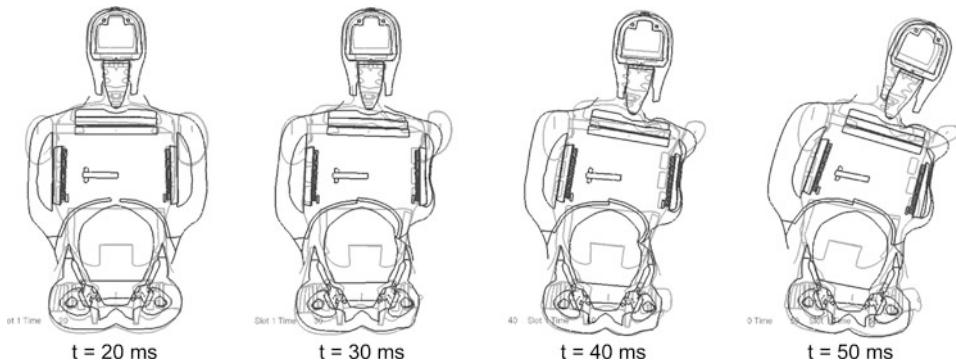
beispielsweise aus dem Dummy, dem Sitz, dem Lenkrad, der Lenksäule, der I-Tafel, dem Rückhaltesystem und allen weiten Teilen, mit denen der Dummy in Berührung kommen kann. Die Informationen über die Bewegung der Sitzschiene, der I-Tafel, der Gurtanbindungspunkte werden von einer vorangegangenen Komplett-Berechnung übernommen. Im Submodell kann nun zum Beispiel der Einfluss von Airbag-Varianten oder der unterschiedlichen Zündzeitpunkte des Airbag, des Gurtstraffers, des Retraktors mit stark reduziertem Rechenaufwand untersucht werden. Der Detailierungsgrad derartiger Submodelle wird den jeweiligen Anforderungen angepasst und kann demzufolge erheblich variieren. Bei Untersuchungen mit Submodellen kommen auch MKS-Modelle und MKS-Solver zum Einsatz, da dann mit noch viel geringerem Rechenaufwand eine sehr hohe Anzahl von Varianten untersucht werden können.

Ein in letzter Zeit häufig vorkommendes Untersuchungsthema ist die Distorsionen der Halswirbelsäule (HWS) bei Heck-Kollisionen. Hier werden ebenfalls Submodelle verwendet: Die Dummy-Belastungen entstehen durch Interaktion zwischen dem Dummy und dem Sitzsystem, an dessen Befestigungspunkten die Fahrzeugbeschleunigung, d. h. der Crash-Puls, einwirkt. Der Einfluss der Eigenbewegung des Dummies auf den Crash-Puls am Sitzfuß ist von nur untergeordneter Bedeutung und kann daher vernachlässigt bleiben. Somit kann der Crash-Puls, der im Wesentlichen vom Deformationsverhalten der Heck-Struktur geprägt wird, einmalig mit der Strukturberechnung am Fahrzeug beim Heck-Anprall ermittelt werden und findet dann als Input Eingang in das Submodell, mit dem nun isoliert die Auswirkungen von Änderungen an der Sitzkonstruktion auf die Dummy-Belastung untersucht werden. Diese Vorgehensweise bietet sich beispielsweise auch für Untersuchungen von Out-of-Position-(OoP-)Situationen an, bei denen die Auswirkung des sich entfaltenden Airbags auf den Dummy analysiert wird. In den Abb. 8.6, 8.7 und 8.8 sind Kinder-Dummies in derartigen, typischen OoP-Sitzhaltungen dargestellt.

Mit Hilfe der Submodell-Methode lassen sich nicht alle Aspekte des Insassenschutzes untersuchen. So werden beispielsweise Deformationen an der Tür beim Seitenanprall auch vom Insassen beeinflusst, und es gestaltet sich äußerst schwierig, dafür ein geeignetes Submodell zu bestimmen. Abbildung 8.21 zeigt im Schnitt die Deformationen des Dummy-Modells des US-SID im Vergleich zum Modell des ES 2re, eine Weiterentwicklung des europäischen EuroSID-Dummies, zu bestimmten Zeiten bei der Simulation einer Seitenkollision.

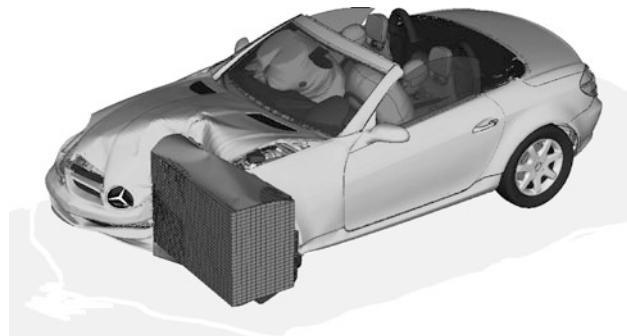
Der wesentliche Nachteil von Submodellen ist der unter Umständen erhebliche Aufwand zur Aktualisierung bei Konstruktionsänderungen, die sowohl in das Hauptmodell als auch die Submodelle eingepflegt werden müssten. Betrachtet man das Fahrzeug mit Insassenschutz-System und Dummy in einem kompletten Modell, so spricht man von „integrierter Simulation“; ein Beispiel dazu zeigt Abb. 8.22.

In der Strukturberechnung werden immer wieder Fragen zur Modellierung des richtigen Ausgangszustandes wie z. B. die Vorschädigung von Bauteilen gestellt; diese Diskussionen gibt es selbstverständlich auch bei der Verwendung von Dummies, die beispielsweise Vorspannungen aufweisen [22]. Die Ursachen von Vorspannungen sind vielfältig und entstehen durch Fertigungs- und Fügeprozesse und durch die Positionierung verschiede-



**Abb. 8.21** Analyse von Dummy-Modellen bei Seitenkollision: Schnitt durch US-SID (*dunkel*) und ES 2re (*hell*) [43]

**Abb. 8.22** Integrierte Simulation bei der Daimler AG [44]



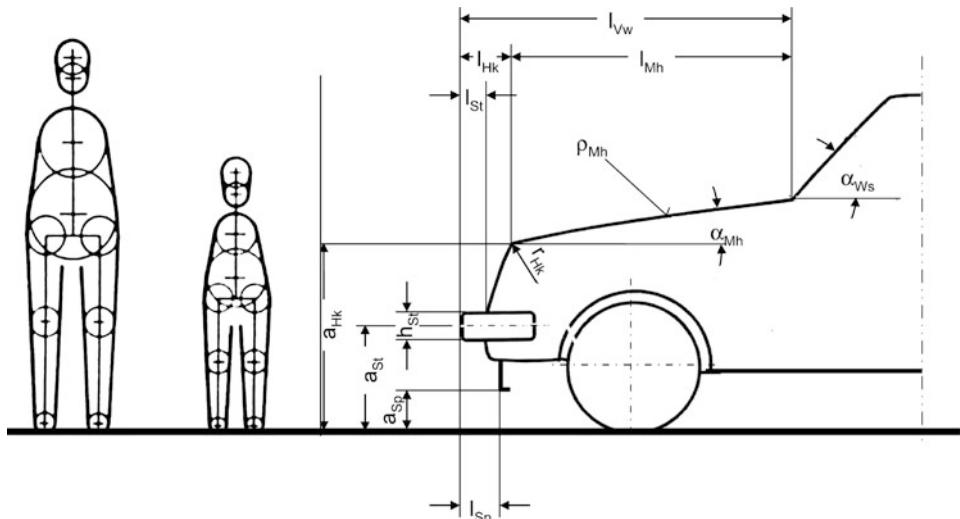
ner Komponenten zueinander. Während sich im Versuch diese Spannungen von selbst einstellen, wird in der Berechnung zu Beginn in der Regel von einem spannungsfreien Zustand aller Bauteile ausgegangen. Bei Bedarf kann aber die Vorspannung durch eine Vor-Simulation berechnet werden, und die Ergebnisse werden zum Start der eigentlichen Crash-Berechnung auf das Modell übertragen. So hat beispielsweise bei einem Heck-Crash die Vorspannung im Sitz und in der Dummy-Wirbelsäule einen erheblichen Einfluss auf die Dummy-Belastungswerte des BioRID-II-Dummies und können nicht vernachlässigt werden.

### 8.3.4 Simulation von Fußgänger- und Zweirad-Kollisionen

Mit Hilfe von Fußgänger- und Zweiradmodellen werden Kollisionen zwischen PKW und Fußgängern bzw. Zweirädern (mit so genannten Aufsassen) beschrieben. Die Aufgabe derartiger Simulationen besteht darin, mechanische Belastungswerte des modellierten Verkehrsteilnehmers zu ermitteln und mit den Schutzkriterien zu vergleichen. So können Hinweise auf die Verbesserungen der passiven Sicherheit durch kinematisch günstigere Bewe-

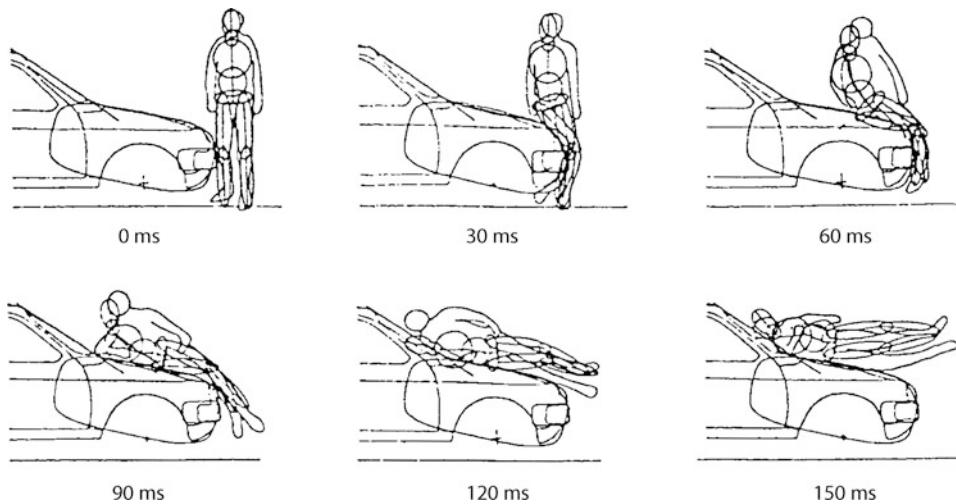
gungsabläufe und/oder mit Hilfe geeigneter Maßnahmen wie Energieaufnahmevermögen der Kontaktstrukturen, Schutzsysteme u. a., erhalten werden. Durch die Variation geometrischer Gegebenheiten und kinematischer Eingabedaten lässt sich der Einfluss bestimmter äußerer Unfallparameter, der Fahrzeugkontur und der Struktureigenschaften auf die Belastung des Menschen während des Unfalls ermitteln. Ferner lässt sich die Simulation dazu verwenden, ein Sensor-System am Fahrzeug, beispielsweise zur Aktivierung eines instationären Fußgängerschutz-Systems (fälschlicherweise auch „aktives“ Schutzsystem genannt), auszulegen und zu optimieren.

Modelle zur Simulation von Fußgängerunfällen sind Mehrkörper-Systeme, die zunächst zwei-, in den letzten Jahren jedoch vermehrt dreidimensional angelegt wurden, mit bis zu 15 Körperelementen und 32 Freiheitsgraden. In Abb. 8.23 ist aus den Anfängen der Fußgänger-Simulation ein zweidimensionales Simulationsmodell zur Ermittlung des Einflusses von formgebenden Parametern der Fahrzeugfront dargestellt [45]. Die Validierung der Fußgängermodelle erfolgt auf der Basis von Versuchen sowohl mit Dummys als auch mit Leichen. So zeigen beispielsweise die Bewegungsabläufe in Abb. 8.24 eine gute Übereinstimmung zwischen einem zweidimensionalen MKS-Fußgängermodell und einer männlichen Leiche gleicher Körpergröße und -masse [46]. Seit einiger Zeit sind FEM-Modelle auch für die Fußgängersimulation verfügbar. Abbildung 8.25 zeigt einen Aufprall eines MKS-Fußgängermodells mit einem FEM-Modell nur für den Fahrzeugvorbau.

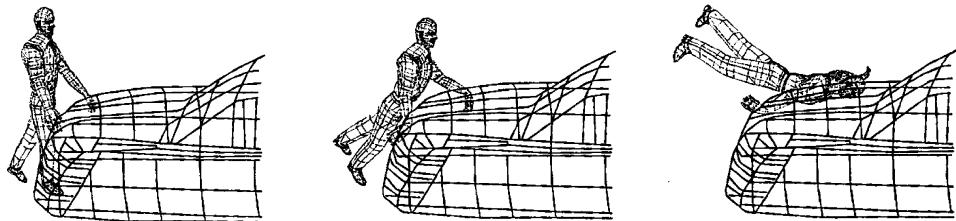


**Abb. 8.23** Zweidimensionale Fußgänger-Modelle und Variationsparameter zur Beschreibung der PKW-Außenform (nach [45])

Die Hauptzielrichtung ist darin zu sehen, die Kinematik von Fußgängern in Abhängigkeit von äußerer Unfallparametern (Kollisionsgeschwindigkeit, Kontur des PKW-Frontbereichs) zu analysieren und die Kontaktstellen oder -regionen sowie die Anprallge-



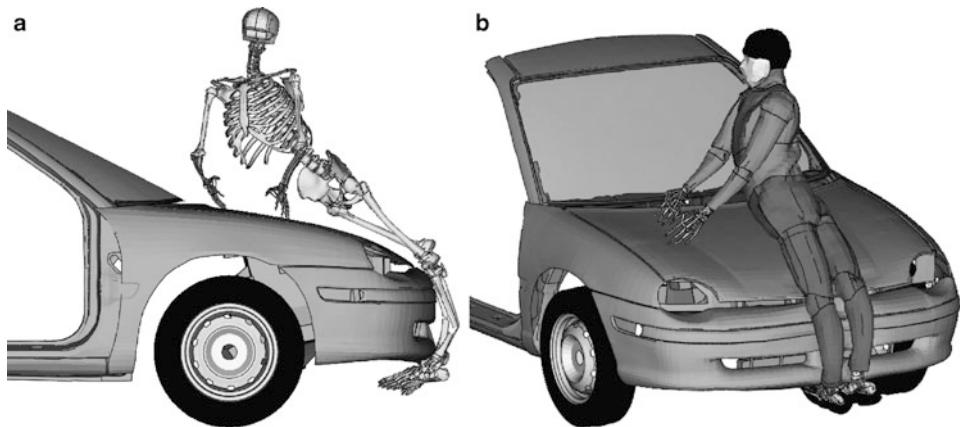
**Abb. 8.24** Vergleich des Bewegungsablaufs einer Fußgänger-Simulation mit dem eines Leichen-Versuchs (aus [46])



**Abb. 8.25** Bewegungsablauf eines dreidimensionalen MKS-Fußgängermodells beim Anprall auf die FEM-Struktur eines PKW-Vorbaus (aus [48])

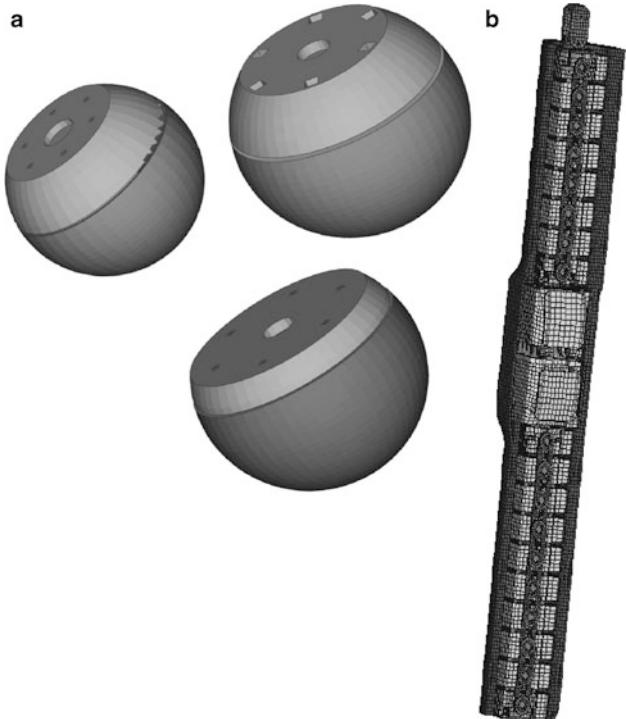
schwindigkeit verschiedener Körperteile (Unterschenkel, Becken, Schulterregion, Kopf) bei Kontakt mit den entsprechenden Fahrzeugstrukturen zu ermitteln. Für derartige Parameterstudien werden Fußgängermodelle sowohl für Erwachsene als auch für Kinder eingesetzt (Abb. 8.23). Anschließend können kritische Kontaktstellen am Fahrzeug durch Formgebung, Steifigkeitsanpassung und Verbesserung der Energieabsorption gezielt entschärft werden. In Abb. 8.25 sind drei Phasen einer PKW/Fußgänger-Kollision mit einem dreidimensionalen MKS-Modell zur frühzeitigen Konzeptionierung eines fußgängerrechten Fahrzeugvorbaus, der als FEM-Modell ausgebildet ist, dargestellt. Abbildung 8.26 zeigt das FEM-Fußgängermodell THUMS (Total Human Model for Safety, [47]).

Für die rechnerische Simulation von Fußgängerschutz-Versuchen mit Hilfe von Kopf-, Hüft- und Bein-Komponenten entsprechend den einschlägigen Vorschriften (EU-Richtlinie 2003/102/EC und Euro NCAP) existieren selbstverständlich auch validierte Modelle für die verwendeten Impaktoren. In Abb. 8.27 sind dazu die Modelle von unterschiedlichen Software-Herstellern gezeigt.



**Abb. 8.26** Bewegungsablauf des FEM-Fußgängermodells THUMS [47] beim Aufprall auf einen PKW-Vorbau (b); nur das Fußgänger-Skelett (a) (aus [49])

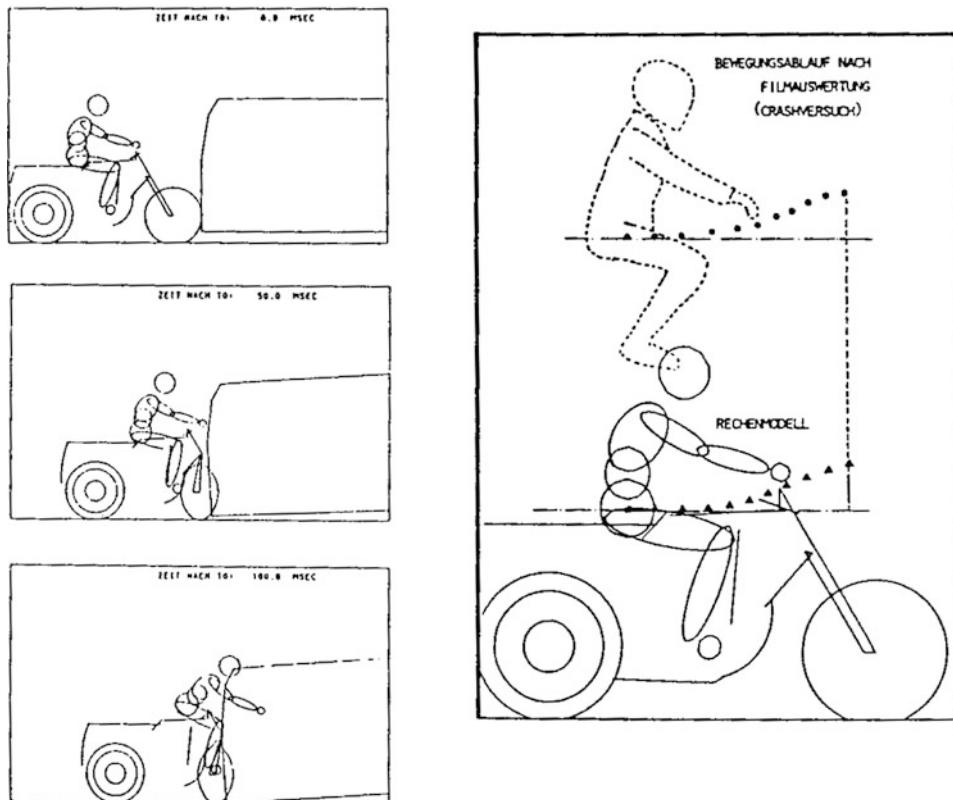
**Abb. 8.27** FEM-Modelle für Fußgängerschutz; **a** drei Kopfmodelle nach ECE [50], **b** FlexPLI-GTR-Beinmodell [14]



Die Simulation von Motorrad-Kollisionen gegen PKW ist ungleich komplexer als die von Fußgängern, da zum einen der Bewegungsablauf komplizierter ist und zum anderen die Interaktion des Motorradfahrers nicht nur mit der PKW-Struktur stattfindet, sondern zusätzlich Kontakt mit dem Motorrad selbst erfolgt. Modelle von Motorradfahrern

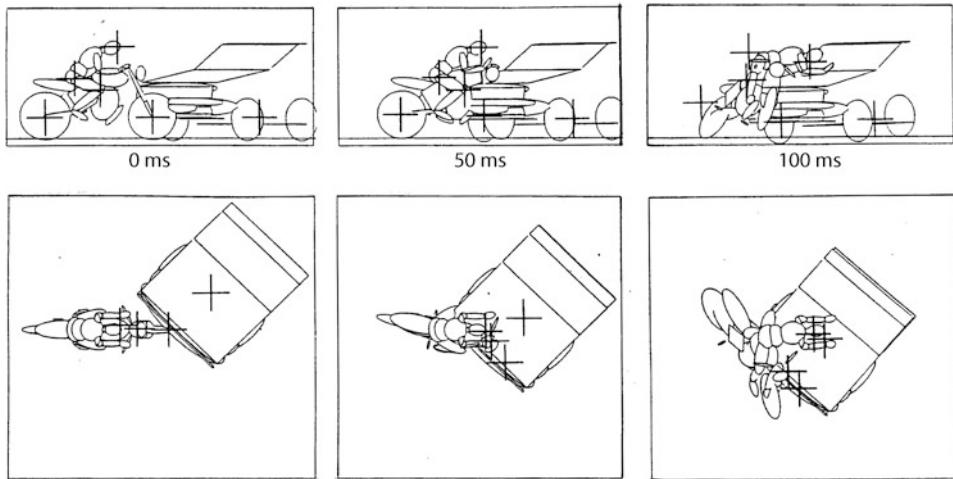
sind üblicherweise Mehrkörpersysteme, die sich aus 15 und mehr Körperelementen zusammensetzen. Das Motorrad wird bei zweidimensionalen Modellen vereinfacht als starre Scheibe und bei dreidimensionalen Modellen meist als Gliederkette, bestehend aus insgesamt sechs Elementen (Hauptrahmen, Gabel, Vorderrad und Aufhängung, Hinterrad und Aufhängung), beschrieben. Erste Untersuchungen mit Simulationsmodellen hatten zum Ziel, die Kinematik des modellierten Fahrers mit tatsächlichen Unfällen und mit nachgefahrenen Versuchen zu vergleichen [52]. Weitere Analysen wurden beispielsweise mit der Zielsetzung durchgeführt, den Bewegungsablauf beim Trennen zwischen Fahrer und Motorrad durch Abstützmaßnahmen am Motorrad zu verbessern. Daneben wurden aus Gründen des Energiemanagements das Deformationsverhalten der vorderen Motorradstruktur, Motorrad-Airbags [53, 54] sowie das Energieaufnahmevermögen insbesondere der seitlichen Kontaktstrukturen am PKW (A-, B- und C-Säulen sowie des Dachrahmens) untersucht.

Abbildung 8.28 zeigt den Bewegungsablauf zu bestimmten Zeitpunkten bei einem simulierten, zweidimensionalen Motorradanprall gegen die Seite eines stehenden PKW so-



**Abb. 8.28** Bewegungsablauf eines zweidimensionalen Modells zur Simulation einer PKW/Motorrad-Kollision und Vergleich der Becken-Ortskurve aus Versuch und Berechnung (aus [52])

wie die Ortskurve des Beckenschwerpunktes im Vergleich zwischen Experiment und Berechnung. Bei einer schrägwinkligen Kollision dagegen reicht ein zweidimensionales Modell zur realistischen Simulation nicht aus. Die Komplexität des Bewegungsablaufs sowohl des Motorrads als auch des Fahrers lässt sich anhand der in Abb. 8.29 dargestellten rechnerischen Simulation einer 45°-Kollision gegen eine PKW-Front nachvollziehen.



**Abb. 8.29** Bewegungsablauf bei Anwendung eines dreidimensionalen Modells zur Simulation einer 45°-PKW/Motorrad-Kollision (von vorn und von oben dargestellt); jeweils  $v = 32 \text{ km/h}$  (aus [53])

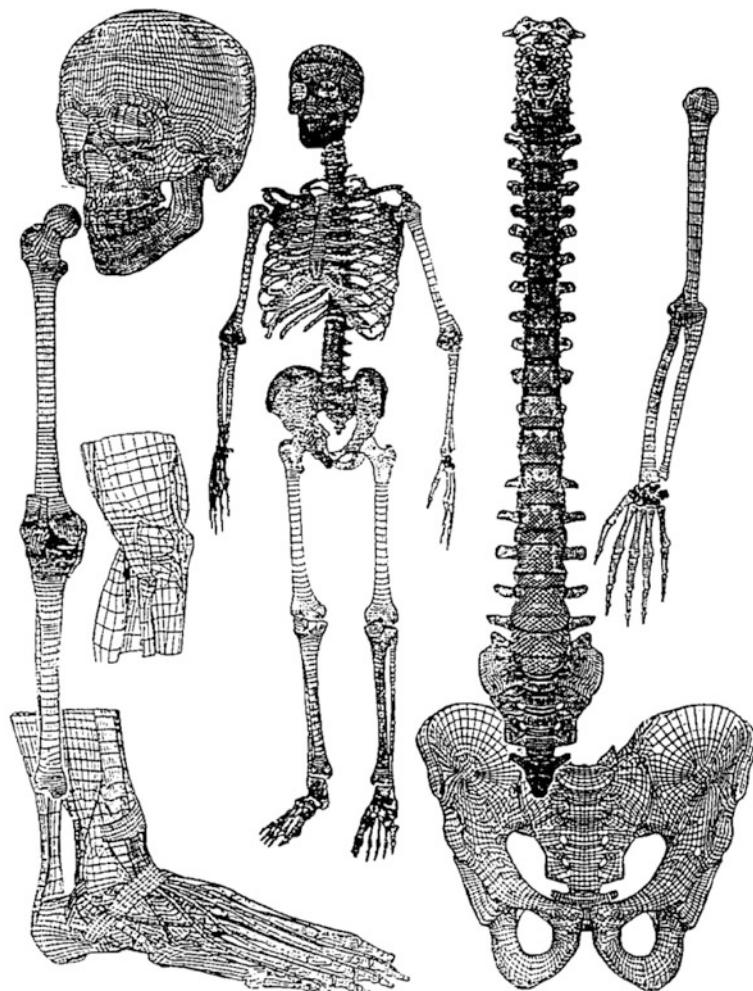
### 8.3.5 Simulationen mit Modellen des menschlichen Körpers

In Abb. 8.26 wurde die Simulation eines Menschen bei der Kollision mit einem Fahrzeug mit Hilfe eines FEM-Modells dargestellt. Für derartige Berechnungen sind die Daten zur Beschreibung des menschlichen Körpers wesentlich komplizierter und zudem sehr viel aufwändiger zu beschaffen als in den oben genannten Beispielen gezeigt.

Das Unterfangen, FEM-Modelle für menschliche Körperteile, Gliedmaßen und letztendlich für den gesamten Körper unter Berücksichtigung der Größe, der Massenverteilung, des Geschlechts und der Konstitution einschließlich des Alters zu erarbeiten und anzuwenden, mutet möglicherweise utopisch an, doch sind bereits viele Entwicklungsschritte in diese Richtung getan worden, und es werden große Investitionen getätigt, dieses Ziel zu erreichen. Dabei werden verschiedene Ziele verfolgt: Verletzungsmechanismen und Schutzkriterien aufzufinden, die Entwicklung von Dummym zu unterstützen und, als Alternative zur gängigen Experimentierpraxis, ein menschenähnliches FEM-Modell für Insassen und äußere Verkehrsteilnehmer (Fußgänger, Fahrrad- und Motorradfahrer) bereitzustellen, mit dessen Hilfe Sicherheitsmaßnahmen rechnerisch entwickelt, überprüft und für den Verkehr zugelassen werden können.

Die dazu erforderlichen Techniken zur mathematischen Modellierung und zur numerischen Behandlung, die notwendigen Informationen über verletzungsmechanische Zusammenhänge aus Biomechanik-Versuchen und Unfallberichten sowie die Bereitstellung von „Material“-Daten sind, zumindest ansatzweise, vorhanden. Zur umfänglichen Realisierung und professionellen Anwendung jedoch sind noch weitere Anstrengungen erforderlich; sie beziehen sich nach Haug [55] auf die Erarbeitung und Bereitstellung von

- geometrischen Daten für biomechanische Mensch-Modelle (so genannte Bio-Modelle) für das Skelett, die Bänder, die Muskeln und die Sehnen (als Beispiel siehe die Darstellungen in Abb. 8.30),



**Abb. 8.30** Diskretisierte Oberflächen von menschlichen Körperteilen zur Anwendung von biomechanischen FEM-Modellen (aus [55])

- FEM-Modellen, insbesondere die Diskretisierung der Oberflächen und die Generierung von Schalen- oder Körperelementen, sowie
- mechanischen Eigenschaften menschlicher Gewebe und Strukturen, wie Steifigkeiten bei unterschiedlichen Belastungsrichtungen, Geschwindigkeiten und anderen Einflussfaktoren bis zu Rissbildungen und Rupturen.

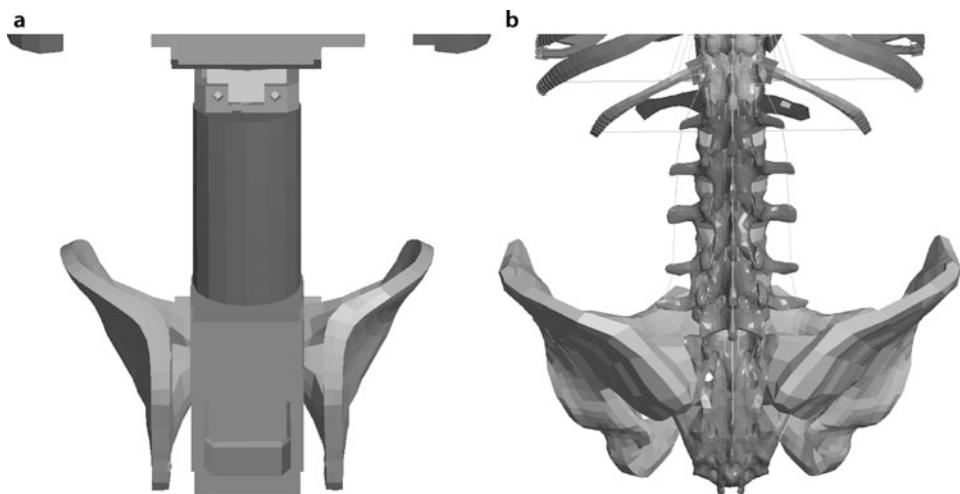
Die verfügbaren Modelle stammen aus einem Brite/Euram-Projekt, HUMOS (Human Model for Safety) genannt, oder sind Entwicklungen in Zusammenarbeit mit den Toyota Central R&D Labs Inc. (Abb. 8.31).

**Abb. 8.31** Modell THUMS  
zur rechnerischen Simu-  
lation des menschlichen  
Körpers [47]; Materialien teil-  
weise ausgeblendet [49]



Angesichts des vielfältigen, bisher noch nicht restlos geklärten Verhaltens höchst unterschiedlicher Gewebe und Strukturen des menschlichen Körpers scheint der Einsatz gesicherter und anwendbarer Mensch-Modelle auf breiter Basis noch in weiter Ferne zu liegen. Doch zeichnen sich bereits heute vielversprechende Simulationsergebnisse beim Vergleich mit Ergebnissen aus Leichenversuchen unter Unfallbedingungen ab, nachdem die Materialeigenschaften experimentell ermittelt und als Datensatz im FEM-Modell verwendet wurden. Hier ergibt sich ein weites Feld für Parameterstudien und Sensitivitätsanalysen, um verwertbare Informationen für unterschiedliche Individuen und unfallrelevante Anprall-

bedingungen zu erhalten; ein Beispiel für eine Anwendung ist in [57] vorgestellt. Mit dem Einsatz von Mensch-Modellen kann die Simulation einen Beitrag zur Fahrzeugentwicklung liefern, die man versuchstechnisch nicht beisteuern kann. Denn ein Mensch-Modell würde die wesentlich genauere Analyse von Verletzungen und ihrer Entstehung ermöglichen. Abbildung 8.32 zeigt das Becken und die untere Wirbelsäule eines ES 2-Dummies und eines Mensch-Modells. Die Zeit, die erforderlich ist, um mit Hilfe menschlicher Insassenmodelle eine zuverlässige Verletzungsvorhersage zu ermöglichen, wird von der weiteren zielorientierten Zusammenarbeit internationaler öffentlicher und privater Institutionen und deren finanzieller Ausstattung abhängen.



**Abb. 8.32** Becken und untere Wirbelsäule beim FEM-Modell des ES 2-Dummies (a) und beim FEM-Mensch-Modell (b) (aus [56])

## 8.4 Aspekte der Crash-Simulation

Die Anwendung der vorgestellten Verfahren und Modelle im Fahrzeugentwicklungsprozess ermöglicht das schnelle Finden von Lösungen bei einem stark reduzierten Aufwand für Versuche. Es ergibt sich ein signifikanter Zeit- und Kostenvorteil. Im Folgenden werden Fragestellungen und Lösungen beschrieben, die beim Einsatz der FEM im industriellen Umfeld auftreten.

### 8.4.1 Berechnungsbewertung

Die physikalischen Vorgänge während eines Unfalls sind sehr komplex und vielfältig. Auch wenn die kommerziellen Simulationsprogramme durch ihre realitätsnahe Visualisierung

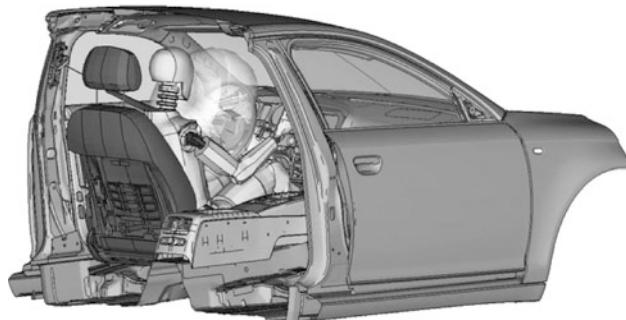
den Eindruck nahe legen, man könne einen Unfall exakt nachbilden, sollte man immer in Erinnerung behalten, dass man an vielen Stellen Vereinfachungen vornehmen musste, um die Berechnung in einem akzeptablen Zeitrahmen durchführen zu können. Ferner sind immer noch viele Detailprobleme Gegenstand der Forschung und man behilft sich mit noch recht grober Modellierung. Nach jeder Rechnung sollte man das Ergebnis auf Plausibilität prüfen. Eine wichtige Prüfung ist die Begutachtung der Energiebilanz, so sollte die Gesamtenergie nicht unnatürlich anwachsen, und die Umwandlung von kinetischer in Verformungs- und innere Energie plausibel sein. Besonderes Augenmerk ist auf die auftretenden Kontaktenergien und die Hourglass-Energie zu legen, die im Verhältnis zu den Gesamtenergien klein sein sollten. Ist die Energiebilanz zufriedenstellend, empfehlen sich weitere einfache Prüfungen auf Konsistenz des Ergebnisses, wie z. B. der sich einstellende Airbag-Druck oder der Gurtkraft-Verlauf in Abhängigkeit von der Zeit. Für die Ergebnisdeutung sollte man sich vergegenwärtigen, wie genau und umfassend die Eingabedaten ermittelt wurden. Die Berechnungsgenauigkeit hängt natürlich von einer exakten Beschreibung des Anfangszustandes und des Materialverhaltens ab. Vernetzt man grob oder arbeitet mit Materialmodellen, die das Materialverhalten nur vereinfacht widerspiegeln, ergeben sich natürlich nur bedingt verlässliche Ergebnisse.

### 8.4.2 Rechnerische Optimierung im Bereich der passiven Sicherheit

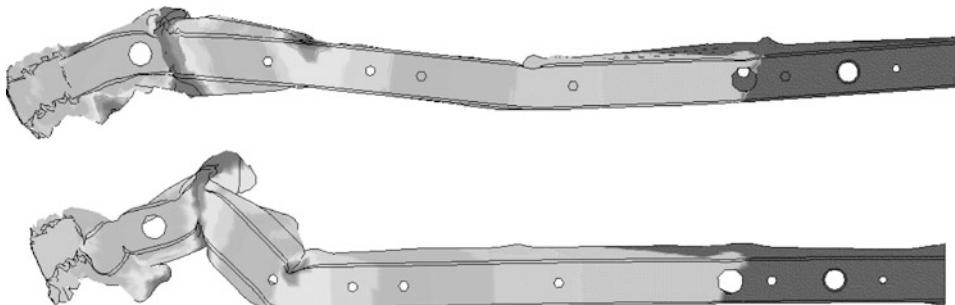
Stehen zur rechnerischen Simulation geeignete Rechenmodelle zur Verfügung, kann man mit sehr geringem Aufwand Varianten untersuchen. Eine zielorientierte Parametervariation erlaubt dem Ingenieur, die Struktur genau zu analysieren und relativ schnell zu verbessern. Dies kann beispielsweise bedeuten, dass das zu untersuchende Bauteil leichter wird, dass es im Crash-Fall eine höhere Deformationsenergie aufnimmt oder dass es sich kostengünstiger fertigen lässt. Neben einer Verbesserung der Lösung durch ausgewählte Simulationen besteht auch die Möglichkeit, den Optimierungsvorgang zu automatisieren. Dazu sind die zu variierenden Größen, die Entwurfsvariablen und die Quantifizierung des Ziels mit Hilfe einer Zielfunktion und etwaiger Nebenbedingungen (Restriktionen) festzulegen. Bei dem in Abschn. 8.2.3 behandelten Beispiel des Kopfanpralls könnten die Entwurfsvariablen die Blechdicke und der Biegeradius sein. Das Ziel der Berechnung könnte darin bestehen, ein möglichst leichtes Bauteil zu erarbeiten mit den Nebenbedingungen einer Kopfbeschleunigung, deren Maximum zu keinem Zeitpunkt überschritten werden darf, und einer Mindest-Biege- und -Torsionssteifigkeit des Stahlprofils, die nicht unterschritten werden darf. Mittels eines Optimierungsprogramms lassen sich nun die Entwurfsvariablen so bestimmen, dass die Zielfunktion minimiert wird und die Restriktionen erfüllt werden. Die Bestimmung erfolgt durch einen iterativen Prozess, bei dem das Optimierungsprogramm die Variablen und die Geometrie in geeigneter Weise verändert und an das Berechnungsprogramm übergibt. Die Ergebnisse werden anschließend mit der Absicht ausgewertet, die Entwurfsvariablen erneut an die Zielsetzung anzupassen. Eine Schwierigkeit für viele Aufgabenstellungen im Rahmen der Crash-Berechnung ergibt sich durch das

nichtlineare Verhalten der Strukturen. Das bedeutet, dass die Abhängigkeit des Verhaltens von geänderten Parametern nur schwer abgeschätzt werden kann. Aus diesem Grund kommen für die Optimierung im Bereich der Crash-Sicherheit Verfahren zum Einsatz, die deutlich mehr Rechenläufe erfordern als Verfahren für lineare Probleme dies tun. Da eine einzelne Crash-Rechnung auf einem modernen Cluster bereits einige Stunden dauert und man für eine Optimierung evtl. mehrere hundert Varianten rechnen muss, erfordert eine Optimierung auf der Basis von FEM-Lösungen umfangreiche Rechnerressourcen. Für grundlegende Optimierungen mit vielen Parametern wird deshalb auch mit MKS-Lösungen gearbeitet. In [58] sind dazu mehrere Optimierungsbeispiele mit MKS- und FEM-Modellen beschrieben. Abbildung 8.33 zeigt eine Pilotstudie der Audi AG zur Optimierung des Rückhaltesystems für mehrere Lastfälle bei Frontalkollisionen.

**Abb. 8.33** Submodell zur Untersuchung des Rückhaltesystems bei Frontalkollision (aus [59])



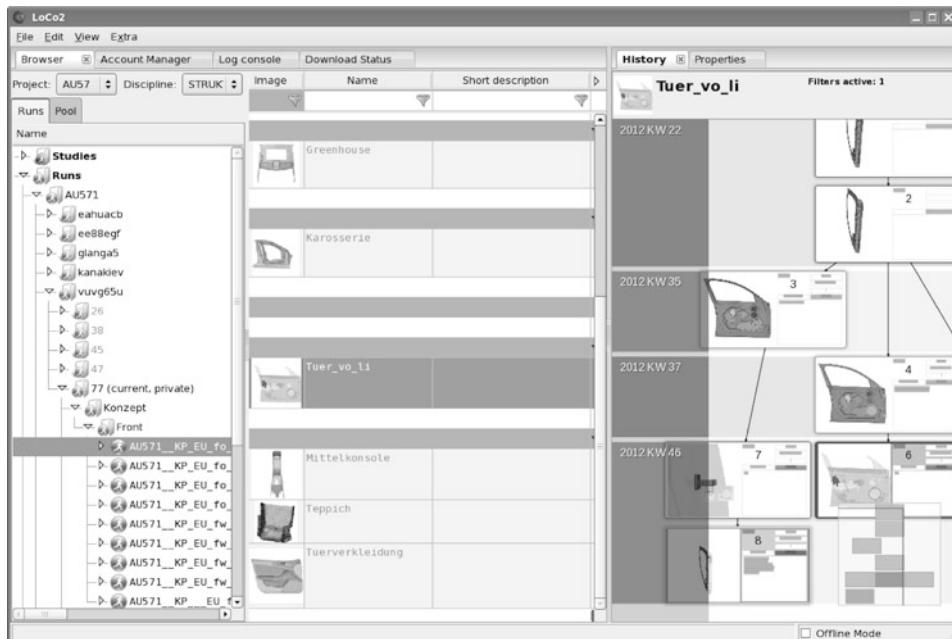
Neben einer Optimierung des Modells bieten viele kommerzielle Programme auch die Möglichkeit, die Robustheit einer Strukturvariante zu bewerten. Bei einer Robustheitsanalyse wird die Systemantwort in Abhängigkeit von kleinen Streuungen der Eingangsparameter untersucht. Abbildung 8.34 zeigt eine Robustheitsuntersuchung an einem Längsträger. Da alle Strukturparameter fertigungs- und eventuell auch alterungsbedingt streuen und in der Crash-Simulation hochgradig nichtlineare Probleme untersucht werden, sind Robustheitsuntersuchungen eine wichtige Komponente einer seriösen rechnerischen Simulation.



**Abb. 8.34** Stochastische Untersuchung an einem Längsträger; die Höhe der Varianz der Verschiebungen ist farblich gekennzeichnet [60]

### 8.4.3 Simulationsdaten-Management

Für die Entwicklung von Fahrzeugen mit einem hohen Maß an passiver Sicherheit sind viele Lastfälle zu untersuchen; jeder dieser Lastfälle benötigt detaillierte Modelle. In den vorhergehenden Kapiteln wurden einige der benötigten Daten dargestellt. Eine weitere Komplexität entsteht dadurch, dass unterschiedliche Personen an den einzelnen Lastfällen oder der Entwicklung der Input-Daten arbeiten. Es gestaltet sich daher äußerst schwierig, Änderungen zu einem bestimmten Zeitpunkt in alle Modelle eines Fahrzeugs einzupflegen. Das folgende Beispiel soll die Komplexität erläutern: Es werde angenommen, dass an einem Blechteil ein Material geändert werden soll, damit es besser gefertigt werden kann. Dann sind für dieses Material Materialkarten nötig, die das elastische und plastische Verhalten und das Versagen beschreiben. Wird das geänderte Bauteil gefügt, sind ebenfalls Materialkarten nötig, die das Verhalten des Schweißpunktes und der Wärmeeinflusszone in Abhängigkeit der Fügepartner beschreibt. Wenn das betrachtete Blechteil in mehreren Fahrzeugen verwendet wird, muss eine Aktualisierung für alle Berechnungsmodelle und für alle Fahrzeuge erfolgen. Die Absicherung eines solchen Prozesses ist sehr aufwändig; erschwerend kommt hinzu, dass zeitgleich an vielen Stellen Änderungen durchgeführt werden. Aus diesem Grund arbeitet man in zunehmendem Umfang mit Simulationsdatenmanagement-Systemen (SDM), die ein simultanes Arbeiten an den Modellen erlauben. Solche Systeme



**Abb. 8.35** SDM-System Loco2 bei der Audi AG

sind mit Hilfe einer Datenbank in der Lage, den Aufbau der Modelle zu automatisieren und Berechnungen zu den unterschiedlichen Lastfällen anzustoßen. Die Auswertung und Visualisierung der Berechnung erfolgt ebenfalls automatisch. Abbildung 8.35 zeigt das bei Audi verwendete SDM-System Loco2. Ein weiterer Schritt ist in der automatischen Verknüpfung der Berechnungsergebnisse mit den Versuchsdaten zu den jeweiligen definierten „Meilensteinen“ des Entwicklungsprozesses zu sehen.

Es existiert zur Zeit noch keine geschlossene Lösung, die alle Entwicklungsbereiche abdeckt, jedoch gibt es für viele Teilbereiche bereits Lösungen, die in zunehmendem Maße miteinander verknüpft werden. Mit einem SDM-System ist es dann möglich, Rechen-Cluster mit über 15.0000 Rechenkernen (Cores) auszulasten [61]. Für die sicherheitstechnische Auslegung der Struktur des aktuellen A3 wurden beispielsweise 10.000 Crash-Berechnungen durchgeführt [61].

---

## Literatur

1. Kramer, F.: Insassen-Crashmechanik-Rechenmodell für Frontalkollisionen – Programmbeschreibung, Verifikation und Validierung. Forschungsbericht Nr. 324/88. Institut für Fahrzeugtechnik, Technische Universität Berlin (1988).
2. Kramer, F.: Schutzkriterien für den Fahrzeug-Insassen im Falle sagittaler Belastung. Dissertation an der Technischen Universität Berlin. Fortschritt-Berichte, VDI-Reihe 12. Bd 137. (1989).
3. Kramer, F.: Unfallrekonstruktion. Vorlesungsskript zur gleichnamigen Lehrveranstaltung an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden (2010/11).
4. Burg, H., Moser, A.: Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion – Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation, 2. Aufl. Vieweg + Teubner|GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden (2009).
5. Nagel, U.: Entwicklung eines Programms zur Rekonstruktion von Fahrzeugunfällen. Studienarbeit. Technische Universität Berlin (1989).
6. Nagel, U.: Rechnergestützte Unfallrekonstruktion – Programmsystem auf der Basis der Stoß- und der Kraftrechnung. Diplomarbeit. Technische Universität Berlin (1991).
7. Brenner, S.C., Scott, L.R.: The Mathematical Theory of Finite Element Methods. Springer Verlag, New York (2002).
8. Johnson, C.: Numerical Solution of Partial Differential Equations by the Finite Element Method. Cambridge University Press (1995).
9. Bathe, K.J.: Finite Element Procedures. Prentice Hall, Englewood Cliffs (1996).
10. Crisfield, M.A.: Non-Linear Finite Element Analysis V2 Chrisfield. John Wiley & Sons Ltd. (1996).
11. Beytschko, T., Liu, W.K., Moran, B.: Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures. John Wiley & Sons Ltd. (2000).
12. Hughes, T.J.R.: The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis. Dover Publications, Mineola, NY (2000).
13. Schwarz, H.R.: Methode der Finiten Elemente. Teubner Verlag, Wiesbaden (1991).
14. Humanetics Innovative Solutions Inc., Huron, (OH) (USA), <http://www.humaneticsatd.com>.

15. Wang, J.T., Nefske, D.J.: A New CALSD Airbag Inflation Model. SAE Technical Paper Series 880654. International Congress and Exposition. Detroit (MI), USA (1988).
16. Volkswagen AG, Wolfsburg, <http://www.volkswagen.de>.
17. Olovsson, L.: On the Arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite Element Method. Division of Solid Mechanics, Department of Mechanical Engineering, Linköpings universitet. Linköping (Schweden) (2000).
18. Olovsson, L.: Corpuscular Method for Airbag Deployment Simulations in LS-DYNA, Report R32S-1 IMPETUSafea AB, ISBN 978-82-997587-0-3 (2007).
19. Schuster, P., Franz, U., König, C.: Simulation von Kinderrückhaltesystemen im Seitencrash. Update-Tag Dummy-Modelle. Stuttgart (2004).
20. Haufe, A., Franz, U.: On the Simulation of Out-of Position Load Cases with the ALE-Method. Airbag 2004, 7th International Symposium and Exhibition on Sophisticated Safety Systems. Karlsruhe (2004).
21. TNO Automotive Germany GmbH, Stuttgart, Deutschland, <http://www.tno-automotive.de>.
22. Franz, U., Schuster, P., Stahlschmidt, S.: Influence of Pre-stressed Parts in Dummy Modeling – Simple Considerations, 8. International LS-DYNA Konferenz. Detroit (MI), USA (2004). [http://www.dynalook.com/documents/8th\\_International\\_ls-dyna/05-4.pdf](http://www.dynalook.com/documents/8th_International_ls-dyna/05-4.pdf).
23. MADYMO: TNO, Eindhoven (NL), <http://www.automotive.tno.nl>, <http://www.tass-safe.de>.
24. PC-CRASH: DSD GmbH, Linz (A), <http://www.dsdat>.
25. Fittanto, D.A., Ruhl, R.A., Southcombe, E.J., Burg, H., Burg, J.: Overview of CARAT-4, a Multi-body Simulation an Collision Modelling Program. SAE Technical Paper Series 2002-01-1566. International Congress and Exposition. Detroit (MI), USA (2002).
26. LS-DYNA: LSTC Inc., Livermore (CA), (USA), <http://www.lstc.com>, <http://www.dynamore.de>.
27. PAM-CRASH: ESI-Group, Paris (F), <http://www.esi-group.com>.
28. RADIOSS: Altair Engineering Inc., Michigan, Troy, USA, <http://www.altair.com>.
29. ABAQUS: Dassault Systems, Suresnes (F), <http://www.3ds.com>.
30. Day, T.D., York, A.R. II: Validation of DyMesh for vehicle vs Barrier Collisions. SAE Technical Paper Series 2000-01-0844. International Congress and Exposition. Detroit (MI), USA (2000).
31. Handbuch PC-Crash. DSD, Dr. Steffan Datentechnik.
32. Handbücher Carat-3 und Carat-4, IbB Engineering Dr. Burg.
33. Haug, E., Scharnhorst, T., Dubois, P.: FEM-Crash-Berechnung eines Fahrzeugfrontalaufpralls. VDI-Tagung „Berechnung im Automobilbau“. VDI-Berichte. Bd. 613. VDI, Würzburg (1986).
34. Appel, H., Kramer, F.: Biomechanik und Kraftfahrzeugsicherheit. Umdruck zur gleichnamigen Vorlesung am Institut für Fahrzeugtechnik an der technischen Universität Berlin (1987).
35. Schettler-Köhler, R.: Numerische Simulation von Crashvorgängen in der Fahrzeugentwicklung in Rechenmethoden in der Fahrzeugentwicklung. In: Dirschnid, W. (Hrsg.): Fortschritte in der Fahrzeugtechnik. Bd 12. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig, Wiesbaden (1992).
36. Lonsdale, G. et al.: Experience with Industrial Crashworthiness Simulation Using the Portable, Message-passing PAM-CRASH Code. PAM'95 Fifth European Workshop on Advanced Finite Element Simulation Techniques. Bad Soden (1995).

37. Finsterhölzl, H.: Strukturberechnung am 5er BMW (E 39) bei einem 40 %-igen Off-set-Crash mit 64 km/h unter Verwendung einer deformierbaren Barriere (IIHS-Test). Verwendung der Bilder und Erläuterungen mit freundlicher Genehmigung der Fa. BMW, Abteilung Karosserieberechnung. (1998).
38. Frik, S., Gosolits, B., Böttcher, C.-S.: 20 Years of Crash Simulation at Opel – Experiences for Future Challenge. 4. LS-DYNA-Forum, 2005. <http://www.dynamore.de/download/af05/papers/A-I-79.pdf>.
39. FHWA/NHTSA National Crash Analysis Center, The George Washington University, (USA), <http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html>.
40. Arup Ltd., Solihull (UK), <http://www.arup.com/dyna>.
41. Franz, U., Stahlschmidt, S., Schelkle, E., Frank, T.: „15 Years of Finite Element Dummy Model Development Within the German Association for Research on Automobile Technology (FAT)“, JRI Japanese LS-DYNA Conference, Nagoya, (JP) (2008).
42. DYNAmore GmbH, Stuttgart, (D), <http://www.dynamore.de>.
43. Schuster, P., Franz, U., Stahlschmidt, S., Pleschberger, M., Eichberger, A.: Comparison of ES 2re with ES 2 and USSID Dummy – Considerations for ES 2re model in FMVSS Tests. 3. LS-DYNA Forum. Bamberg (2004).
44. Daimler AG, Stuttgart, (D). <http://www.daimler.com>.
45. Glöckner, H.: Fußgängerschutz am PKW – Ergebnisse mathematischer Simulation. Dissertation an der Technischen Universität Berlin (1982).
46. Gibson, T.J., Hinrichs, R.W., McLean, A.J.: Pedestrian Head Impacts: Development and Validation of a Mathematical Model. International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impacts. Zürich, (CH) (1986).
47. Recent advances in THUMS: Development of Individual Internal Organs, Brain, Small Female and Pedestrian Model. [http://www.dynalook.com/documents/4th\\_European\\_ls-dyna/LS-DYNA\\_ULM\\_C-I-01.pdf](http://www.dynalook.com/documents/4th_European_ls-dyna/LS-DYNA_ULM_C-I-01.pdf).
48. Peter, W.: Anteil der Berechnung am Entwicklungsprozess eines Automobils. VDI-Tagung „Berechnung im Automobilbau“. VDI-Berichte. Bd 613. VDI, Würzburg (1986).
49. Keding, B., Franz, U., Stahlschmidt, S.: Seminarunterlagen Insassensicherheit. DYNAmore GmbH, Stuttgart (2005).
50. Frank, T., Kurz, A., Pitzer, M., Söllner, M.: Development and Validation of Numerical Pedestrian Impactor Models. [http://www.dynalook.com/documents/4th\\_European\\_ls-dyna/LS-DYNA\\_ULM\\_C-II-01.pdf](http://www.dynalook.com/documents/4th_European_ls-dyna/LS-DYNA_ULM_C-II-01.pdf).
51. Dutton, T.: Finite Element Models for European Testing: Side Impact Barrier to WG13 and Pedestrian Impactors WG17. [http://www.dynalook.com/documents/4th\\_European\\_ls-dyna/LS-DYNA\\_ULM\\_C-II-29.pdf](http://www.dynalook.com/documents/4th_European_ls-dyna/LS-DYNA_ULM_C-II-29.pdf).
52. Sporner, A.: Experimentelle und mathematische Simulation von Motorradkollisionen im Vergleich zum realen Unfallgeschehen. Dissertation an der Technischen Universität München (1982).
53. Wismans, J., Goudswaard, A.P., Nieboer, J.J.: Motorcycle Airbag Systems. International AKZO Symposium „Bag & Belt“ on Occupant Restraint Systems. Köln (1992).
54. Kramer, F., Höning, M., Leithold, L.: Airbag für Motorräder. Berichte und Informationen der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden **15**(2) (2007).

55. Haug, E.: Biomechanical Models in Vehicle Accident Simulation. PAM'95 Fifth European Workshop on Advanced Finite Element Simulation Techniques. Bad Soden (1995).
56. Pyttel, T., Floss, A., Thibaud, C.: Realitätsnahe Simulationsmodelle für Airbag und Mensch – neue Möglichkeiten und Grenzen der FE Simulation. VDI Fahrzeug und Verkehrstechnik, Internationaler Kongress. Berlin (2005).
57. Meister, M.: Finite Element Simulation of Human and Dummy Kinematics in Side Crash Scenarios. Europam Conference, Mainz (2003).
58. Schumacher, A.: Optimierung mechanischer Strukturen – Grundlagen und industrielle Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin (2004).
59. van den Hove, M., Mlekusch, B., Müllerschön, H., FE-Simulation Based Optimization of an Adaptive Restraint System Considering Multiple Front-Crash Load Cases using LS-OPT. 5. LS-DYNA Forum. Bamberg, 2005. <http://www.dynamore.de/download/af05/papers/A-I-79.pdf>.
60. Müllerschön, H., Günther, F.C., Roux, W.: Robustness Study of a Front Impact Crash Model Regarding Uncertainties in Material Properties and Sheet Thicknesses. Crashworthiness of Light-Weight Automotive Structures, NTNU, Trondheim, (NOR) (2004).
61. Mlekusch, B., Danzel, M.: Erst Rechnen, dann Crashen. Audi Magazin (01/2012).

# Passive Sicherheit im Fahrzeugentwicklungsprozess

Der Fahrzeugentwicklungsprozess hat sich aufgrund äußerer Einflüsse, des Wettbewerbsdrucks und der zeit- und kundennahen Produktplatzierung in den vergangenen Jahrzehnten zunehmend verändert. Entwickelte man früher Fahrzeuge noch in einem Zeitraum von sieben bis neun Jahren, so wird heute die Entwicklungszeit auf drei bis vier Jahre reduziert. Dieses kennzeichnet einen Trend, der sich noch weiter fortsetzen wird, um markt- und kundenspezifischen Anforderungen noch besser gerecht werden zu können (Abb. 9.1).

		<b>Entwicklungs faktoren</b>	
<b>gestern</b>			<b>heute</b>
Geringer Wettbewerb im Premiumsegment	<b>Marktentwicklung</b>	Großer Wettbewerb im Premium-Segment	
Wenige Modellvarianten und Sonderausstattungen	<b>Komplexität</b>	Viele Modell- und Ländervarianten, Nischen und Sonderausstattungen	
Bewährte Technologie	<b>Technologie</b>	Kurze Innovationszyklen	
Sieben Jahre und mehr	<b>Entwicklungszeit</b>	Vier Jahre und weniger	
Geringe Vernetzung, überschaubar	<b>Arbeitsweise</b>	Hohe Vernetzung, viele Beteiligte	
Geringer Anspannungsgrad	<b>Kosten</b>	Hoher Anspannungsgrad	

**Abb. 9.1** Fahrzeugentwicklung gestern und heute am Beispiel des Premium-Segments

Die Vorgehensweise früherer Entwicklungsabteilungen wurde von der sequenziellen Abarbeitung, sowie einer noch überschaubaren Produktpalette und Fahrzeugkomplexität geprägt. Heute sind Fahrzeuge und die integrierten Systeme komplexer und vernetzter, die Anzahl der Varianten höher, die erhältlichen Serien- und Sonderausstattungen zahlreicher und die verfügbare Entwicklungszeit kürzer. Fakten also, die eine parallele Arbeitsweise unter Zuhilfenahme computergestützter Entwicklungswerzeuge und effizienter Prozesse notwendig machen.

Die schnelle und qualitativ hochwertige Produktentwicklung ist demnach nicht nur von der Kompetenz der beteiligten Fahrzeugentwickler und Lieferanten abhängig, sondern wird vor allem durch effiziente und beherrschte Prozesse gesichert sein. Alle beteiligten Stellen müssen im Produktentstehungsprozess vernetzt und mit den Entwicklungingenieuren mit klaren Zwischenzielen arbeiten. Im Folgenden soll hierzu beispielhaft ein Produktentstehungsprozess dargestellt und dabei im Besonderen die Umfänge der passiven Sicherheit beleuchtet werden.

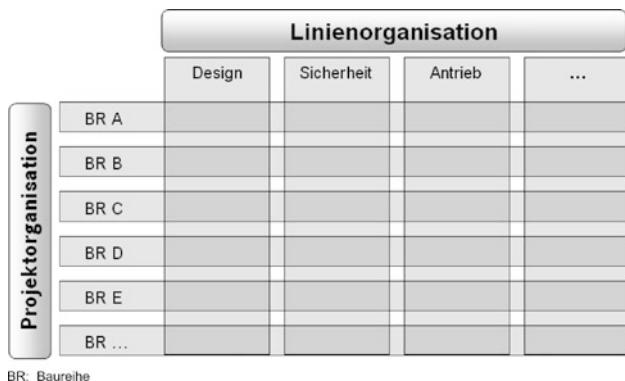
## 9.1 Prozessziele und Entwicklungsorganisation

Die Prozessgestaltung in der Fahrzeugentwicklung hat folgende Ziele:

- Beschreibung und Optimierung des Produktentstehungsprozesses,
- Synchronisierung der Arbeitsabläufe durch festgelegte Schnittstellen,
- Transparenz der Parallelprozesse zum Erkennen der Auswirkungen bei Verschiebungen,
- klare Darstellung der Zwischenziele zur Überprüfung der Zielerreichung und der Qualität und schließlich
- Definition von Aufgaben, Kompetenzen und Verantwortungen

Bei den meisten Fahrzeugherstellern ist die Entwicklungsorganisation hierzu in einer Matrix-Struktur aufgestellt (Abb. 9.2). Die Projektorganisation definiert, organisiert, steu-

**Abb. 9.2** Aufbauorganisation eines Fahrzeugherstellers (Matrix-Struktur)

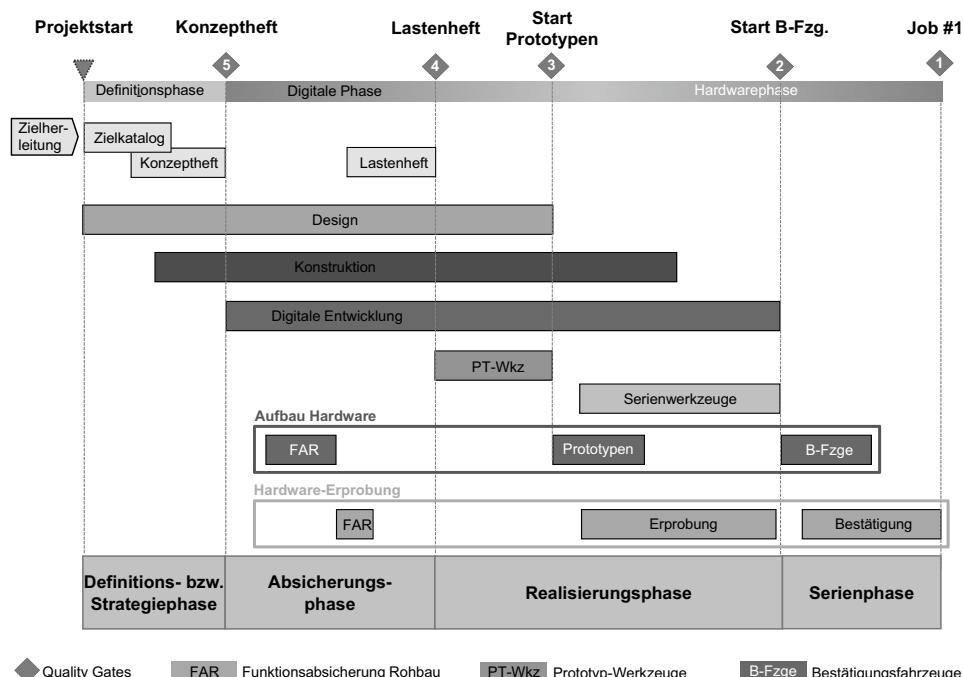


ert und vertritt die entsprechenden Fahrzeugprojekte. Zudem stimmt sie die Inhalte mit dem Einkauf, der Produktion und dem Vertrieb ab. Die Linienorganisation hingegen entwickelt, realisiert und qualifiziert die Fahrzeuginhalte und erforscht sowie integriert neue Fahrzeugeigenschaften, hier beispielsweise die Produkteigenschaften zur Zielerreichung der passiven Sicherheit.

## 9.2 Entwicklungsprozess und Entwicklungsphasen

Der typische Entwicklungsprozess eines Fahrzeugs gliedert sich bei nahezu allen Herstellern in verschiedene Phasen. Abbildung 9.3 zeigt eine stark schematisierte, generische Darstellung eines Fahrzeugentwicklungsprozesses mit dem Fokus auf die für die passive Sicherheit relevanten Inhalte [1].

Der Prozess lässt sich in eine Definitions- bzw. Strategiephase, eine Absicherungsphase, eine Realisierungsphase und eine Serienphase unterteilen. Die verschiedenen Entwicklungsphasen werden durch Meilensteine unterteilt mit dem Ziel, parallele Arbeitsprozesse, wie beispielsweise den Designprozess, die Konstruktion, die digitale Entwicklung, den Hardware-Aufbau und die Erprobung zu synchronisieren.



**Abb. 9.3** Schematischer Fahrzeugentwicklungsprozess Fahrzeugsicherheit

Der Übergang von einer in die andere Phase ist gekennzeichnet durch die Überprüfung des Entwicklungsfortschritts mit Hilfe von Qualitätskriterien im Rahmen von so genannten „Quality Gates“. Die Anwendung dieses Qualitätsprinzips, im Übrigen auch bei internen Kunden/Lieferanten-Beziehungen, ist der Garant für die Produktqualität. Abbildung 9.4 zeigt die prinzipiellen Inhalte der Entwicklungsphasen. Die einzelnen Arbeitsprozesse sind wiederum innerhalb dieser Phasen beschrieben, um eine verzahnte Arbeitsweise zu gewährleisten.

Definitions- bzw. Strategiephase	Absicherungsphase	Realisierungsphase	Serienphase
<p>Definition der Fahrzeugeigenschaften und -planierung</p> <p>Eingangsgrößen:  <input checked="" type="radio"/> Marktrecherche  <input checked="" type="radio"/> Unternehmensstrategie  <input checked="" type="radio"/> Kundenbefragung  <input checked="" type="radio"/> Vorgängermodell</p> <p>⇒ <b>Konzeptheft</b></p>	<p>Entscheidung über Fahrzeugvarianten und -komponenten</p> <p>Machbarkeitsnachweis</p> <p>⇒ <b>Lastenheft</b></p>	<p><b>Serienentwicklung</b> der Komponenten und der Varianten</p> <p>Absicherung der Funktion und Haltbarkeit</p>	<p><b>Fahrzeug- und System-Freigabe</b></p> <p>Vorbereitung der Produktion</p> <p>Fertigung der Serienfahrzeuge</p> <p><b>Produktionsanlauf</b></p>

**Abb. 9.4** Inhalt und Abfolge der Entwicklungsphasen

In jeder Entwicklungsphase hat die passive Sicherheit vielfältige Wechselwirkungen hinsichtlich der Bauteile und -gruppen aber auch deren Eigenschaften im Fahrzeug. Dabei ist die Kenntnis dieser Interaktionen von größter Bedeutung, damit Zielkonflikte und Einflussparameter rechtzeitig erkannt und in die Fahrzeugauslegung einbezogen werden können. Die passive Sicherheit muss in der frühen Entwicklungsphase bei der Markenstrategie, bei der Positionierung des Fahrzeugs bezüglich des Wettbewerbs und bei den Vertriebsanforderungen (Märkte, Service, Kundenanforderungen) berücksichtigt werden. Bereits zu diesem Zeitpunkt werden sowohl die externen Gesetzes- und Verbraucherschutzanforderungen als auch die internen Sicherheitsanforderungen für das zu entwickelnde Fahrzeug in Form von Test-Grenzwerten festgelegt.

### 9.3 Anforderungen an die passive Fahrzeugsicherheit

In einer sehr frühen Fahrzeug-Entwicklungsphase gilt es zunächst, alle Zielsetzungen, die sich aus den Erfahrungen des Vorgängermodells aus dem realen Unfallgeschehen ableiten lassen und alle Anforderungen der Gesetzgeber und der Verbraucherschutzorganisationen zusammenzustellen (Abb. 9.5).

Diese Zusammenstellung dient den ersten grundsätzlichen Vorauslegungen von Fahrzeugsstruktur und Fahrzeugausstattung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Anforderungen zu Beginn der Markteinführung, aber auch während des gesamten Lebenszyklus einer Baureihe erfüllt bzw. eingehalten werden müssen. Im Allgemeinen wird hierfür ein



**Abb. 9.5** Berücksichtigung aller Produktanforderungen

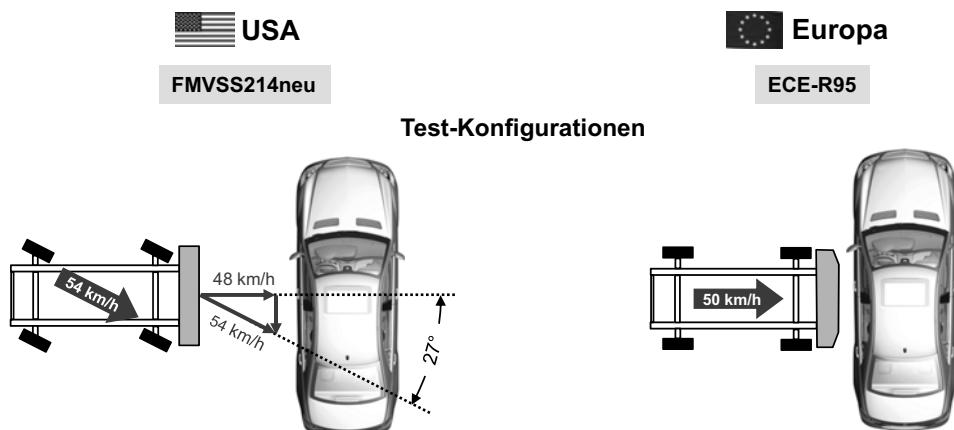
Zeitraum von etwa 10 Jahren zugrunde gelegt, der deutlich größer ist als das momentane durchschnittliche Lebensalter von PKW, nämlich 8,3 Jahre in 2011 [2]. Dieser lange Betrachtungszeitraum beinhaltet aber, unter Berücksichtigung einer kontinuierlichen Zunahme an weltweit verschiedenen Anforderungen, erhebliche Risiken.

### 9.3.1 Gesetzliche Anforderungen

Aufgrund der permanenten Weiterentwicklung nationaler Sicherheitsstandards muss heute, das zeigen Beispiele aus der Vergangenheit, davon ausgegangen werden, dass kurzfristig neue gesetzliche Regelungen verabschiedet bzw. bestehende geändert werden. Diese Neuerungen müssen dann – teilweise mit einem nicht unerheblichen Aufwand – nachträglich in ein bereits angelaufenes Fahrzeug-Entwicklungsprogramm aufgenommen bzw. in ein bestehendes Fahrzeugkonzept eingearbeitet werden. Durch die Zunahme dieser Vorschriften verschärft sich zusätzlich der bereits vorhandene Zielkonflikt zwischen den unterschiedlichen Vorschriften einzelner Länder.

Den Bemühungen eines Automobilherstellers, ein Fahrzeug einzuführen, das die Anforderungen aller Märkte erfüllt, also ein „Weltfahrzeug“ zu bauen, werden damit immer engere Grenzen auferlegt. Ihm bleibt demnach nur die individuelle Entscheidung, gewisse Märkte nicht zu bedienen oder aufwendige Ländervarianten zu produzieren. Harmonisierungsbemühungen existieren zwar, doch schreiten diese nur sehr langsam voran (vgl. Abschn. 6.2.4).

Ein Beispiel für die Divergenz der Anforderungen sind die Versuchskonstellationen zur Seitenkollision [3]: Zweifellos verfolgen sowohl das EU- als auch das US-Gesetz die Zielsetzung, den Insassenschutz beim Seitenauftreffen zu verbessern, allerdings sind Methodik und Kriterien sehr unterschiedlich (Abb. 9.6). Das Ziel des Fahrzeugherstellers besteht aber darin, den „Menschen“ zu schützen, dem überall auf der Welt die gleichen biomechanischen, jedoch mit Streuung behafteten Gesetzmäßigkeiten zugrunde liegen, und nicht den jeweiligen Dummy-Typ. Ein weiterer Nachteil, der allerdings alle derartige Prüfverfahren betrifft, ist in der Modellbildung zu sehen. Denn der Dummy ist ein mechanisches – wenn auch hochkomplexes – Ersatzmodell, das nur näherungsweise einen „Durchschnittsmenschen“ abbilden kann. Die Biomechanik-Forschung und die Entwicklung realistischer Dummies dienen folgerichtig dem Ziel, diese offensichtliche Diskrepanz zwischen Modell und Mensch zu verringern bzw. die Biofidelität, d. h. die Übereinstimmung mit dem lebenden Menschen, zu verbessern (vgl. Abschn. 6.2.4). Es existieren sogar Bestrebungen, verschiedene Altersgruppen abzubilden. Die Automobilhersteller fühlen sich daher aufgefordert, einen immer größeren Umfang an komplexen Anforderungen mit verschiedenen Zielsetzungen in einem Fahrzeug in Übereinstimmung zu bringen.



### Dummy-Typ und Kriterien (Schutzkriterien)

#### Fahrer (ES-2re Dummy):

- $HIC_{36} < 1.000$
- Deflektion obere Rippe  $< 44 \text{ mm}$
- Deflektion mittlere Rippe  $< 44 \text{ mm}$
- Deflektion untere Rippe  $< 44 \text{ mm}$
- Summe Abdominalkraft  $< 2.500 \text{ N}$
- Pubic Kraft  $< 6.000 \text{ N}$

#### Fahrer (ES-2 Dummy):

- $HPC < 1.000$
- Deflektion obere Rippe  $< 42 \text{ mm}$
- Deflektion mittlere Rippe  $< 42 \text{ mm}$
- Deflektion untere Rippe  $< 42 \text{ mm}$
- $VC < 1,0 \text{ m/sec}$
- Pubic Kraft  $< 6.000 \text{ N}$
- Summe Abdominalkraft  $< 2.500 \text{ N}$

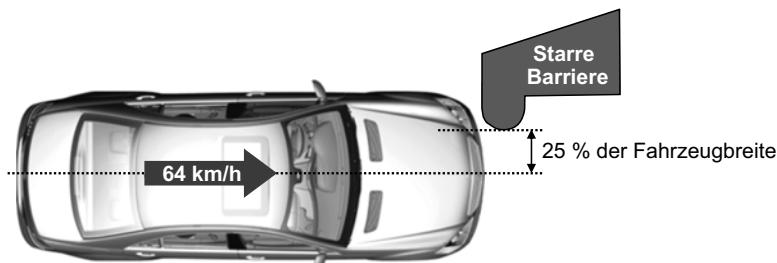
#### Fahrerseitig 2. Sitzreihe (SID-ls Dummy):

- $HIC_{36} < 1.000$
- Beschleunigung untere Wirbelsäule, T12  $< 82 \text{ g}$
- Summe Accetabulum und Iliac-Kräfte (Becken)  $< 5.525 \text{ N}$

**Abb. 9.6** Gesetzliche Anforderungen in den USA und in Europa am Beispiel Seitenauftreffen

### 9.3.2 Rating-Anforderungen

Analog zu den gesetzlichen Vorschriften kann seit 1997 eine deutliche Zunahme unterschiedlicher Rating-Anforderungen beobachtet werden [4, 5]. Diese Verfahren dienen dem Ziel, zwischen der fahrzeugspezifischen Sicherheit der unterschiedlichen Marken und Modelle zu differenzieren; mit ihnen werden aber auch die gesetzlichen Kriterien weiter verfeinert bzw. verschärft. Der Anspannungsgrad bei der Umsetzung einer einheitlichen Sicherheitsphilosophie wird dadurch deutlich erhöht. Zur Etablierung dieser Anforderungen kommt erschwerend hinzu, dass zusätzliche Ergänzungen und Modifikationen innerhalb einer kurzen Zeit von beispielsweise nur zwölf Monaten einfließen können, während die gesetzlichen Regelungen üblicherweise mit einem Vorlauf von drei bis vier Jahren eingeführt, zumindest aber als Übergangsfristen zugelassen werden. Im fahrzeugspezifischen Umsetzungsprozess fehlt damit eine für die Entwicklung wichtige und erforderliche Vorlaufzeit. Abbildung 9.7 zeigt die Konfiguration des IIHS Small Overlap Frontalaufpralls, der im Jahr 2012 erstmals eingeführt wurde.



**Abb. 9.7** Konfiguration des Frontalaufpralls nach IIHS SOB (Small Overlap Barrier)

### 9.3.3 Produkthaftungsanforderungen

Die Sicherheitseigenschaften eines Personenkraftwagens besitzen hohe Relevanz hinsichtlich der Produkthaftung. Sollten in einem Fahrzeug Kunden beim Unfall zu Schaden kommen, muss der Herstellers jederzeit nachweisen können, dass das Produkt dem neuesten Stand von Wissenschaft und Technik entspricht. Zudem muss er den Beweis antreten können, dass es den zu erwartenden Belastungen standhält und die vom Hersteller möglicherweise geweckte Kundenerwartungen erfüllt. Bei der Auswahl des Prüfspektrums und der Prüfkriterien gilt es, das spezifische Nutzerverhalten, also Einsatzart des Fahrzeuges und die jeweiligen Umweltbedingungen, zu berücksichtigen. Und schließlich muss im Rahmen der Entwicklung die Erprobung, die rechnerische Optimierung und später die Einhaltung von Qualitätsstandards detailliert dokumentiert werden. Produkthaftung spielt aus diesen Gründen über den gesamten Entwicklungsprozess, von der Definitions- bis zur Serienphase, eine äußerst wichtige Rolle.

### 9.3.4 Herstellerspezifische Anforderungen

Neben den vielschichtigen, nicht durch den Hersteller beeinflussbaren Anforderungen ist es üblich, dass eigene Anforderungen an die Sicherheitseigenschaften eines Fahrzeuges gestellt werden. Die Motivation kann dafür sehr unterschiedlich sein: So dienen häufig eigene Anforderungen der Unterstreichung und dem Ausbau eines spezifischen Markenprofils, das sich beispielsweise in einer Image-Bewertung „baut sichere Fahrzeuge“ ausdrückt [6]. Herstellerspezifische Anforderungen können sich beispielsweise in der Schwerpunktsbildung im Innovationsbereich niederschlagen. Sie können sich aber auch darin zeigen, dass ein Fahrzeughersteller Sicherheits-Features serienmäßig und nicht als Sonderausstattung anbietet. Zudem ist es möglich, den Schwerpunkt mit besonders hohen Anforderungen bei der Erfüllung von Rating-Tests zu dokumentieren. Je nach Markenprofil kann sich hingegen ein Hersteller auch zum Ziel setzen, sich nur auf zwingend geforderte Anforderungen zu konzentrieren.

---

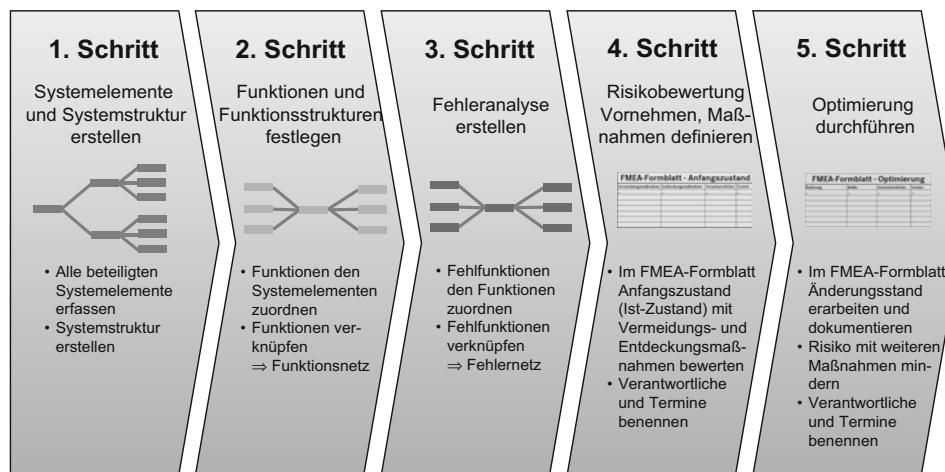
## 9.4 Entwicklungsqualität und deren Absicherung

Der Anspruch an eine hohe Produktqualität, die gleichzeitig verbunden wird mit geringen Gewährleistungs- und Kulanzkosten, beeinflusst in entscheidender Weise die Methoden und die Kriterien zur Absicherung und Bestätigung der Qualität in der Fahrzeugentwicklung. Für den Bereich der passiven Sicherheit, in welchem die Sicherheitsbauteile dokumentationspflichtig sind, werden aufgrund sich weltweit verschärfender Randbedingungen im Bereich der Produkthaftung höchste Anforderungen an eine lückenlose und durchgängige Dokumentation der Konstruktions- und Versuchsergebnisse gestellt.

Ausgangspunkt zur Qualitätssicherung jeder Entwicklung ist das Fahrzeuglastenheft, in dem die unmittelbaren Anforderungen und Erwartungen an ein geplantes Fahrzeug formuliert sind. Dies sind beispielsweise gesetzliche und herstellerspezifische Anforderungen an die Sicherheit des Gesamtfahrzeugs bei verschiedenen Unfallkonstellationen sowie an das Verhalten von Bauteilen des Fahrzeugs während eines Unfalls, d. h. die Unfallsituationen werden zu „Lastfällen“ festgeschrieben. Die Inhalte eines Lastenheftes sind dabei konfliktfrei, vollständig und eindeutig zu beschreiben. Da sich das Gesamtfahrzeug aus unterschiedlichen Komponenten zusammensetzen lässt, werden demzufolge aus dem Fahrzeug-Lastenheft einzelne Komponenten-Lastenhefte abgeleitet.

Entscheidend für den Erfolg eines neuen Produkts ist dabei die Berücksichtigung der Erfahrungen aus der Entwicklung der Vorgängermodelle, sowohl positiver als auch negativer Art. Eine Möglichkeit, diese Erfahrungen systematisch zu erfassen, wird als „Lessons Learned“ bezeichnet. Dabei handelt es sich um eine Methode, bei der nach Abschluss eines Fahrzeugprojekts die Erfahrungen aller Projektteilnehmer eingefordert und reflektiert werden. Die Abfragen zur Erhebung der Erfahrungen erfolgen üblicherweise in Workshops mit Hilfe von Fragebogen oder in mündlichen Interviews. Um die Qualität des Nachfolgeprojektes nachhaltig zu verbessern, ist es zudem wichtig, diese Erfahrungen richtig zu adres-

sieren, damit sie in vollem Umfang zum Projektstart in der Definitionsphase berücksichtigt werden können. Die Entscheidung über ein Produkt oder auch nur über ein Konzept kann nämlich konsequenterweise erst dann getroffen werden, wenn der Machbarkeitsnachweis unter Berücksichtigung der systematisch aufbereiteten Erfahrungen durchgeführt worden ist. Die Entscheidung, ob ein Konzept für den geplanten Einsatzbereich geeignet ist und in ausreichender Stückzahl, zu akzeptablen Kosten und annehmbarer Qualität termingerecht entwickelt und produziert werden kann, wird in einer interdisziplinären Arbeitsgruppe getroffen, die mit Personen aus den Bereichen Konstruktion, Versuch, Produktion, Einkauf, Vertrieb und Qualität besetzt ist. Unerlässlich für eine tragfähige Entscheidungsfindung ist eine durchzuführende Risikoanalyse zu den genannten Kriterien. Ist die Entscheidung für ein Produkt getroffen, beginnt die Phase der Entwicklung (Konstruktion) und der funktionalen Absicherung (Berechnung und Versuch).



**Abb. 9.8** Prinzipieller Ablauf der Qualitätsabsicherung mittels FMEA

Ein zentrales und in der Automobilbranche anerkanntes konstruktionsbegleitendes Qualitäts-Management-Werkzeug ist die **Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)**, Abb. 9.8. Mit Hilfe dieser Analysetechnik sollen auftretende Fehler in einer möglichst frühen Phase erkannt und durch geeignete Maßnahmen vermieden werden. Die mit der FMEA erzielbare Steigerung des Produktreifegrades und der Qualität reduziert die Gefahr von Produktfehlern in einer späteren Phase der Entwicklung, die dann teure und zeitkritische Änderungen erforderlich machen oder schlimmstenfalls beim Kunden auftreten würden. Zusätzlich bietet die FMEA-Anwendung weitere Vorteile, die in der Bündelung der fachübergreifenden Kompetenz, in der strukturierten, vollständigen Dokumentation der Fehlermöglichkeiten und den Maßnahmen zu deren Vermeidung sowie in der Steigerung des Qualitätsbewusstseins der Mitarbeiter zu sehen sind.

Üblicherweise wird zwischen drei Arten, der System-, der Konstruktions- und der Prozess-FMEA, unterschieden, die aufeinander aufbauen, jedoch bezüglich ihres Betrach-

tungsumfangs völlig unterschiedlich sind. Die jeweilige Bearbeitung erfolgt grundsätzlich in interdisziplinären Arbeitsgruppen: Die **System-FMEA** in der passiven Sicherheit betrachtet das Zusammenwirken der Komponenten, die in unterschiedlichen Unfallkonstellationen Einfluss auf das Schutzzpotential haben können. Das Ziel der System-FMEA besteht also darin, die optimale Auslegung des Gesamtsystems auf der Basis der Lastenheft-Vorgabe durch Fehlervermeidung und Überprüfung der Sicherheit und Funktionsfähigkeit zu gewährleisten. Mit Hilfe der **Konstruktions-FMEA** sollen mögliche Fehler an einzelnen Komponenten des Systems, z. B. am Airbag oder am Sicherheitsgurt, erkannt und durch konstruktive oder fertigungstechnische Maßnahmen vermieden werden. Damit lässt sich die Wirksamkeit aller konstruktiven Maßnahmen noch vor Beauftragung der Serienwerkzeuge in der Prototypen-Erprobung bestätigen. Verantwortlich für die Konstruktions-FMEA ist der als „Treiber“ benannte bauteilverantwortliche Konstrukteur. Die **Prozess-FMEA** basiert auf den Ergebnissen der Konstruktions-FMEA und deckt potentielle Fehler in den einzelnen Prozess- und Arbeitsschritten innerhalb der Fertigung und der Montage auf, und zwar wird die Prozessplanung vor der Bestellung von Fertigungseinrichtungen bewertet. Die Leitung der Prozess-FMEA wird von einem Mitarbeiter aus dem Bereich der Fertigungsplanung wahrgenommen. Nachdem auf Bauteil-Ebene der Nachweis der Serientauglichkeit anhand umfangreicher Tests erbracht worden ist, kann mit der System- und Fahrzeugfreigabe auf Gesamtfahrzeug-Ebene gestartet werden.

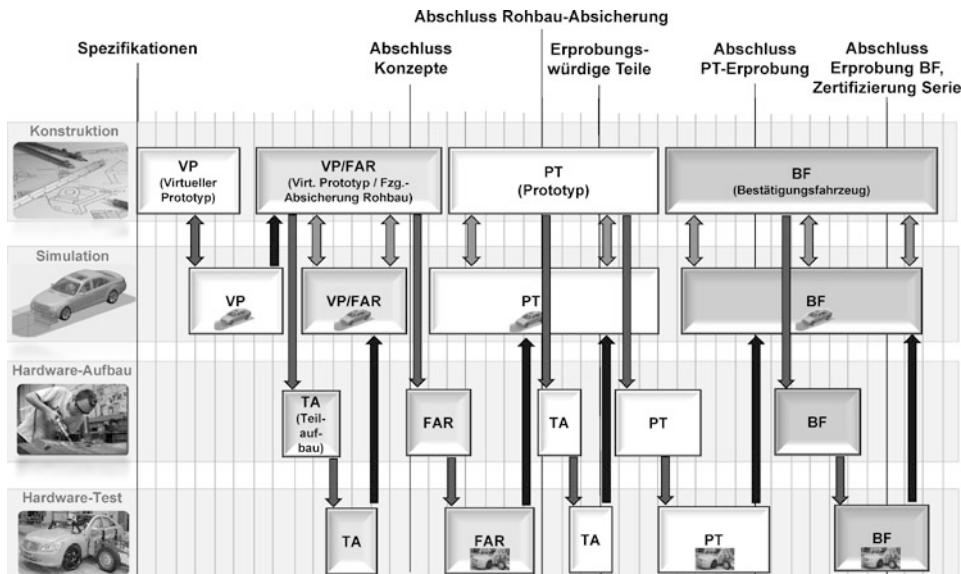
Die **Freigabe** dient dem Nachweis der in den Lastenheften definierten funktionalen und gesetzlichen Bestimmungen. Sie wird den länderspezifischen Anforderungen entsprechend in Form einer Selbst-Zertifizierung, in Anwesenheit eines für die Fahrzeug-Zertifizierung zugelassenen Technischen Dienstes oder unter Aufsicht von staatlichen Vertretern des betreffenden Landes durchgeführt. Erst nach erfolgreicher Zertifizierung, der so genannten Typgenehmigung, kann mit der Auslieferung der Fahrzeuge begonnen werden. Der Hersteller ist dafür verantwortlich, dass in der Fertigung geeignete Vorkehrungen getroffen und Prüfverfahren festgelegt werden, um sicherzustellen, dass alle produzierten Fahrzeuge dem Stand dieser Freigabe entsprechen. Im Bereich der passiven Sicherheit werden hierfür beim Lieferanten auf Komponenten-Ebene und beim Fahrzeughersteller auf Gesamtfahrzeug-Ebene serienbegleitende Konformitätsprüfungen (CoP: Conformity of Production) durchgeführt.

---

## 9.5 Rechnerische Simulation und experimentelle Absicherung im Entwicklungsablauf

Für eine effiziente Entwicklung von Maßnahmen im Bereich der passiven Sicherheit wird durch ein geeignetes Prozessmodell eine optimale Vernetzung und Verzahnung der Konstruktion, der Berechnung, des Prototypen-Baus und des Versuchs sichergestellt (Abb. 9.9). Der erste Prozessschritt bei der Entwicklung eines Fahrzeugs beginnt mit der CAD-Konstruktion (CAD: Computer Aided Design) und der Erstellung eines virtuellen

Prototyps (VP), der über die Berechnung abgesichert wird. Ist dies erfolgt, kann ein zweiter virtueller Prototyp mit Optimierungsmaßnahmen aus dem Vorgängerprojekt konstruiert und berechnet werden. Bei ausreichend hohem Reifegrad wird parallel ein Teilaufbau bzw. ein Fahrzeug zur Absicherung des Rohbaus aufgebaut. Diese frühen virtuellen Entwicklungsmaßnahmen stellen sicher, dass die erforderlichen Langläufer-Werkzeuge für Rohbau- und Interieurteile zeitgerecht beauftragt werden können. In gleicher Weise werden, falls erforderlich, mit entsprechenden Änderungsschleifen die Prototypen (PT) entwickelt.



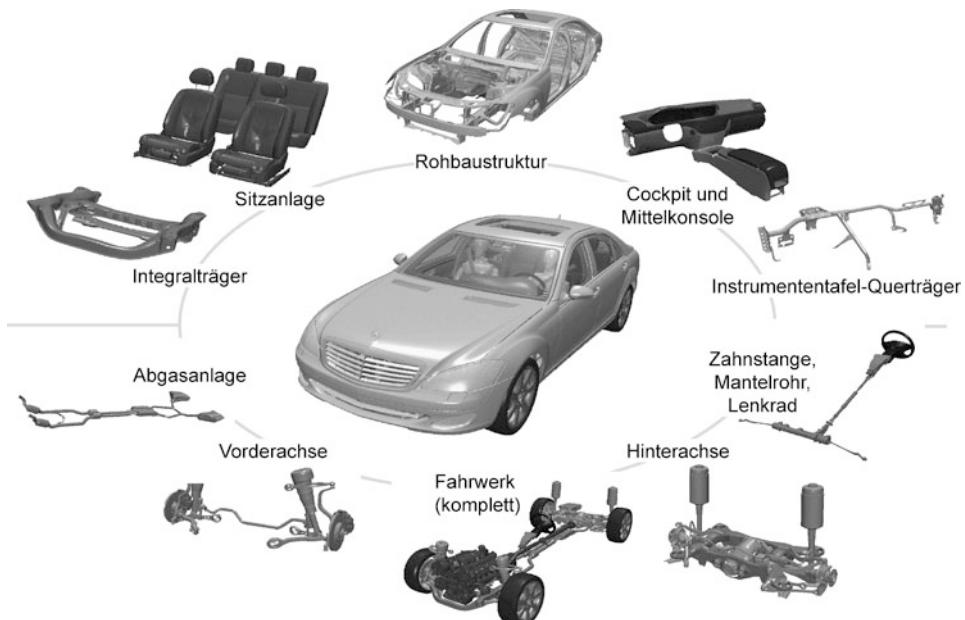
**Abb. 9.9** Zusammenarbeitsmodell zwischen Konstruktion, Simulation und Erprobung

Das Prozessmodell ist so aufgebaut, dass eine simultane Entwicklung (SE: Simultaneous Engineering) ermöglicht wird, d. h. alle Rückmeldungen aus Berechnung und Versuch fließen rechtzeitig in die Konstruktion für die nächste Entwicklungsphase ein. Dieser Prozess muss mit einer Vielzahl von Entwicklungsschritten, die Teilaufgaben der passiven Sicherheit wie z. B. Insassenschutz, Fußgängerschutz oder Kompatibilität umsetzen, sowie mit anderen Aufgaben, beispielsweise zur Realisierung der Betriebsfestigkeit oder der Fahrzeugakustik, abgestimmt sein. Deren Einflüsse, Änderungen und Optimierungen können zum Teil zu widersprüchlichen Ergebnissen führen. Am Ende des Entwicklungsablaufes werden Prototypen, so genannte Bestätigungsfahrzeuge (BF), durch Versuche abgesichert. Die Summe der Ergebnisse und deren positive Bewertung führen letztendlich zur Freigabe einschließlich der Zertifizierung. In Abb. 9.9 ist auszugsweise ein prinzipielles Prozessmodell für die Entwicklung der passiven Sicherheit mit den erforderlichen Interaktionen in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt.

### 9.5.1 Einsatz der Entwicklungswerkzeuge

Im Rahmen des Entwicklungsprozesses werden die einzelnen Fahrzeugstände funktional abgesichert. Dies erfolgt entweder rein über Versuche oder mit Hilfe der rechnerischen Simulation und der sich daran anschließenden Versuchsabsicherung. Bei der Simulation werden hierzu in aller Regel kommerzielle Programme verwendet, die auf der Methode der finiten Elemente und einem expliziten Zeitintegrationsverfahren basieren (vgl. Abschn. 8.2).

Der Rohbau wird mit einem sehr hohen Detaillierungsgrad modelliert, um möglichst alle Effekte und Interaktionen richtig erfassen zu können. Ebenso werden die verschiedenen Aggregateile sowie Komponenten und deren Bauraumbedarf, das so genannte Package, in den **Berechnungsmodellen** abgebildet (Abb. 9.10). Für die unterschiedlichen Werkstoffe werden moderne Materialbeschreibungen verwendet, die die Festigkeit, das Energieabsorptionsvermögen, die Elastizität und die Viskosität der Materialien, d. h. das geschwindigkeitsabhängige Verformungsverhalten, in ausreichendem Maße berücksichtigen. Eine besondere Herausforderung stellt zusätzlich die Erfassung der Verbindungen, der Fügetechniken und der Kunststoffe dar [7, 8]. Neben der Strukturberechnung wird bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt im Entwicklungsprozess das Insassenschutz-System mit Hilfe der rechnerischen Simulation ausgelegt [9, 10, 11]; einige Beispiele dazu zeigt



**Abb. 9.10** Beispiel für den Detaillierungsgrad eines Berechnungsmodells

Abb. 9.11. Erst das aufeinander abgestimmte, optimale Zusammenwirken von Struktur und Insassenschutzsystem-Komponenten, wie Gurtsystem und Airbag, erfüllt den Anspruch an ein hohes Maß an passiver Fahrzeugsicherheit.



**Abb. 9.11** Beispiele aus der Struktur- und Insassen-Crashsimulation

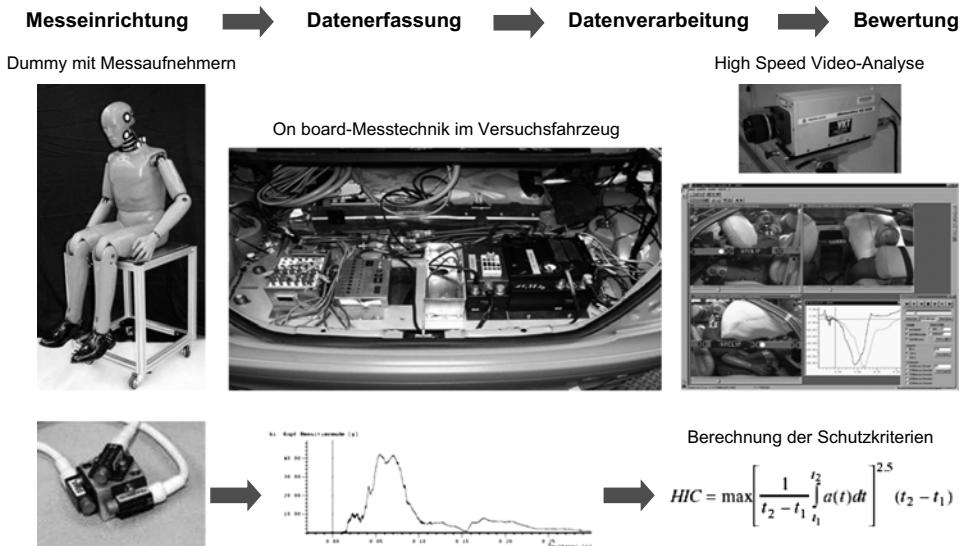
Der **Versuch** und die Zertifizierung bedienen sich einer ganzen Reihe von unterschiedlichen Prüfeinrichtungen: Die Erprobung beginnt zunächst mit Komponentenprüfungen für strukturrelevante Bauteile und geht dann erst über zu System-Prüfeinrichtungen, z. B. der Schlittenanlage zur Auslegung der Insassenschutzsysteme. Sind diese Ergebnisse erfolgversprechend, so werden zahlreiche Konfigurationen zur Überprüfung des Gesamtfahrzeugs auf der Crashanlage experimentell überprüft (Abb. 9.12), um den messtechnischen Nachweis für die zu Beginn der Entwicklung formulierten Anforderungen erbringen zu können.

Bei all den durchzuführenden Prüfungen wird eine sehr aufwendige **Messtechnik** eingesetzt, von anthropometrischen Testpuppen (Dummys) beginnend, über eine Vielzahl von Standard- bis zu Sondermessstellen für Beschleunigungs-, Kraft- und Wegmessungen. Den Messdaten kommt eine sehr hohe Bedeutung zu, weil die daraus ermittelten Belastungsgrößen die Entscheidungsgrundlage für Änderungen im Laufe des Entwicklungsprozesses und für die Fahrzeugoptimierung von ausschlaggebender Bedeutung sein können. Die einzelnen Prüfeinrichtungen und die dazu erforderliche Ausrüstung sind im Kap. 7 detailliert beschrieben und in Abb. 9.13 übersichtsartig dargestellt.

Die Vorgehensweise zur funktionalen Freigabe, entsprechend den definierten Anforderungen, erfolgt in der Regel über Entwicklungsschleifen mit den **Konstruktionsabteilungen**. Die prinzipielle Vorgehensweise ist aus dem Ablauf-Diagramm, dargestellt in Abb. 9.14, ersichtlich.



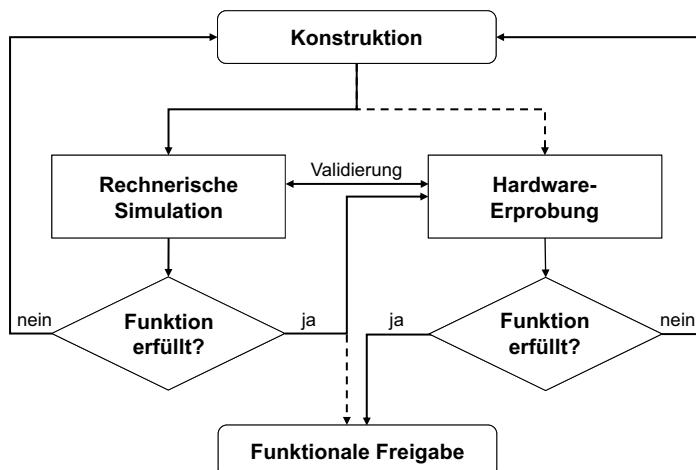
**Abb. 9.12** Auswahl verschiedener Konfigurationen für Crash-Versuche mit dem Gesamtfahrzeug



**Abb. 9.13** Crash-Messtechnik und Auswertung der Messdaten

Der Entwicklungsablauf startet mit einem ersten Konstruktionsstand innerhalb des Prozesses. Dieser Stand wird in Zusammenarbeit zwischen Berechnung und Versuch zur funktionalen Freigabe des entsprechenden Meilensteins geführt. Die erste Phase, der virtuelle Prototyp, ist bis auf parallel durchzuführende Komponentenversuche hardwarefrei, d. h. die Entwicklung erfolgt digital. Demzufolge ist auch die funktionale Freigabe digital. In dieser Phase wird, nach Eingang der Konstruktionsdaten in der Berechnung, das Berechnungsmodell aufgebaut. Auf der Basis der ermittelten Berechnungsergebnisse hinsichtlich der Funktionen Crash-Sicherheit, Steifigkeit, Betriebsfestigkeit, Schwingungen, Akustik u. a. erfolgt bei Erfüllung der Funktionskriterien die funktionale Freigabe,

und der erzielte Konstruktionsstand wird unverändert in die nächste Entwicklungsphase übernommen. Im Falle der Nichterfüllung wird zusammen mit Versuch und Konstruktion ein modifizierter Stand erarbeitet. Diese dazu erforderlichen Modifikationen können sich auf einfache Werkstoff- und Blechdickenvariation, auf Verstärkungen oder auch auf vollständig andere Konstruktionskonzepte erstrecken. Der sodann erzielte Konstruktionsstand wird nun wieder berechnet und zusammen mit den Versuchsingenieuren bewertet. Diese Schleife wiederholt sich nun so lange, bis die definierten Kriterien bezüglich aller Anforderungen erfüllt sind.

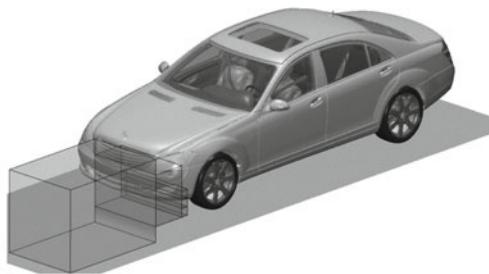


**Abb. 9.14** Entwicklungsschleifen zur Erzielung der funktionalen Freigabe

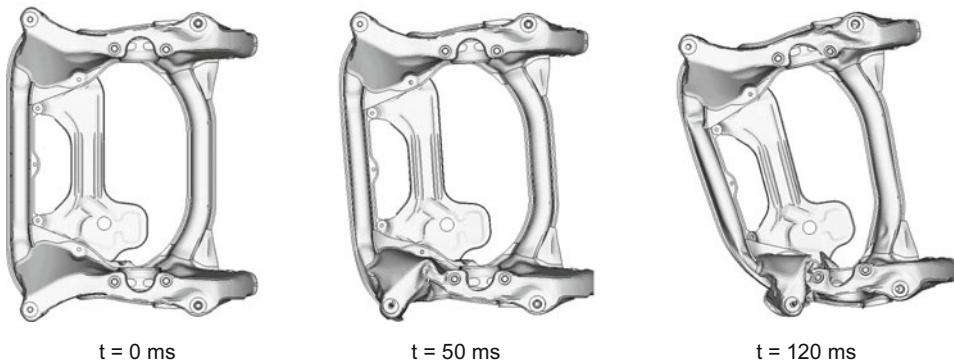
Während des Durchlaufs der Entwicklungsschleife sind erneut auftretende Zielkonflikte zwischen der passiven Sicherheit und anderen Funktionen oftmals nicht zu vermeiden. Dies soll anhand eines Beispiels am Integralträger exemplarisch erläutert werden, der aus Gründen der Steifigkeit, der Betriebsfestigkeit und der Schwingung so steif wie möglich ausgelegt werden muss. Andererseits aber dient er, entsprechend der Anforderung zur Crash-Sicherheit, als Deformationselement und muss daher ein gezieltes Verformungsverhalten in Fahrzeug-Längsrichtung aufweisen. Diese sich widersprechenden Zielsetzungen erfordern eine detaillierte Optimierung unter Berücksichtigung aller Funktionen. Die Deformation eines rechnerisch optimal ausgelegten Integralträgers ist in Abb. 9.15 dargestellt. Hierbei wurde ein Frontalaufprall nach Euro NCAP betrachtet, bei dem ein Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 64 km/h und einer Überdeckung von 40 % bezogen auf die Fahrzeugsbreite auf eine deformierbare Barriere aufprallt.

In einigen Fällen müssen zur rechnerischen Prognosefähigkeit zusätzliche **Komponentenversuche** durchgeführt werden. Dies ist insbesondere dann erforderlich, wenn neue Werkstoffe oder Fügekonzepte eingeführt und abgesichert werden sollen. Diese Komponentenversuche werden dann rechnerisch abgebildet und die Berechnungsergebnisse mit den versuchstechnisch ermittelten abgeglichen. Dieser Vorgang wird als **Validie-**

## Konfiguration des Frontalaufpralls



## Deformationsverhalten des Integralträgers

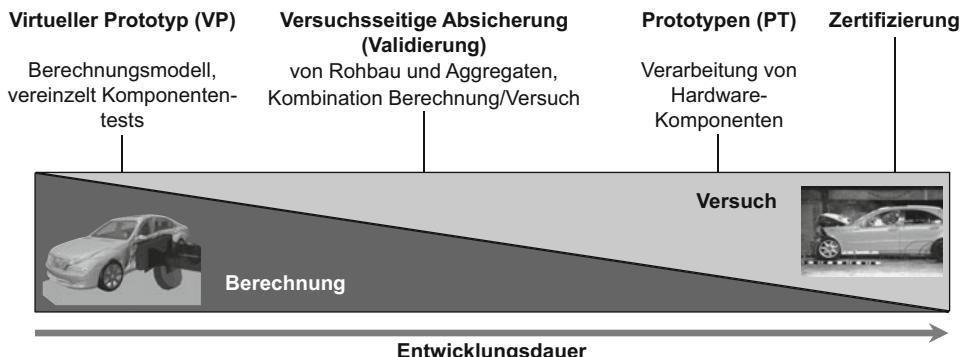


**Abb. 9.15** Deformationsverhalten eines Integralträgers während eines rechnerisch simulierten Frontalaufpralls

**rung** bezeichnet. Weitere Berechnungen erfolgen dann nur noch mit den so validierten Modellen.

Während in der frühen, rein virtuellen Entwicklungsphase die berechnungsseitige Freigabe erfolgt und sich die erforderlichen Versuchsproben (Hardware-Teile) lediglich auf Strukturkomponenten beschränken, nimmt der Entwicklungsumfang des Versuchs ab der mittleren Phase im Entwicklungsablauf deutlich zu. Hier werden Fahrzeuge zur Absicherung von Rohbau und Aggregaten nicht mehr ausschließlich virtuell, sondern auch real in Form von Einzelteilen aufgebaut. Je nach Lastfall kann nun eine rechnerische oder eine hardware-orientierte Absicherung aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll sein. In aller Regel aber wird eine Kombination aus rechnerischer und experimenteller Überprüfung als vorteilhaft erachtet.

Mit weiterem Fortschreiten der Entwicklung werden nun die Fahrzeugkomponenten in zunehmendem Maße als **Prototypen** gefertigt und dem Versuch zur Verfügung gestellt; daher wird dieser Prozessabschnitt „Prototypen-Phase“ genannt. Bis zur Zertifizierung und der Serienfreigabe nehmen die Berechnungsumfänge in der Entwicklungsschleife stetig ab, während die Versuchsaktivitäten zunehmen (Abb. 9.16).



**Abb. 9.16** Einsatz der Entwicklungswerzeuge Berechnung und Versuch im Verlauf des Entwicklungsprozesses

Die **Zertifizierung** erfolgt derzeit auf der Basis ausschließlich experimenteller Überprüfungen. Eine Zertifizierung aufgrund von Berechnungsergebnissen ist aber Gegenstand aktueller Diskussionen. So sind erste Beispiele für eine digitale Zertifizierung im Zusammenhang mit Stoßfänger-Lastfällen, aber auch bei Kasko-Einstufungen zu sehen.

Zur Erhöhung der Prognose-Sicherheit werden die Berechnungsergebnisse stets mit den Versuchsergebnissen abgeglichen. Diese kontinuierliche Validierung mit Ergebnissen aus Gesamtfahrzeug-Versuchen liefert für nachfolgende Entwicklungsprojekte wertvolle Erkenntnisse.

## 9.5.2 Absicherung neuer Technologien und Werkstoffe

Werden innerhalb des Entwicklungsprozesses neue Technologien oder neue Materialien eingesetzt, ist eine frühzeitige versuchstechnische Absicherung für die Validierung der rechnerischen Simulation erforderlich (Abb. 9.17). Die Bewertung neuer Materialien erfolgt üblicherweise zunächst über Zugversuche, und je nach Einsatzgebiet werden weitere Belastungsrichtungen wie Druck, Schub oder Biegung betrachtet. Derartige Versuche werden bei verschiedenen Belastungsgeschwindigkeiten bis zum Materialversagen durchgeführt, da nahezu alle Werkstoffe eine gewisse Viskosität und ein spezifisches, von der Dehnrate abhängiges Bruchverhalten aufweisen. Nachdem das Materialverhalten experimentell ermittelt wurde, werden die Versuche rechnerisch abgebildet, um die Materialgesetze unter Modellbedingungen zu validieren. Mit diesen so generierten Materialbeschreibungen werden erforderlichenfalls Bauteil-Versuche zur Validierung verwendet. Bei der vorgesehenen Verwendung neuer Technologien wird in gleicher Weise verfahren. Erst wenn die Validierungsphase erfolgreich abgeschlossen ist und eine ausreichend hohe Prognosefähigkeit als gesichert angesehen werden kann, erfolgt der Einsatz im Gesamtfahrzeugmodell und wird demzufolge in die Entwicklung eingebunden.

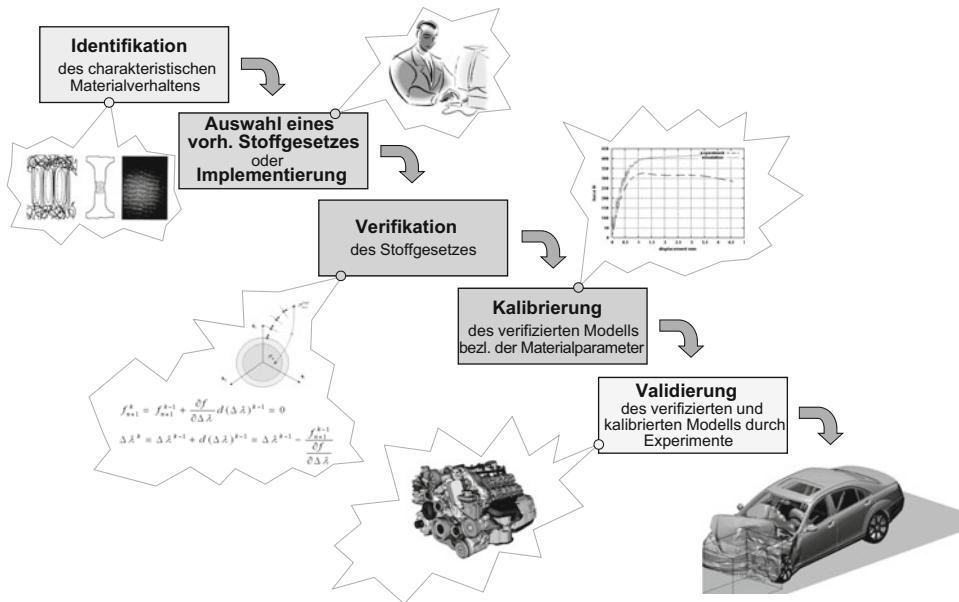


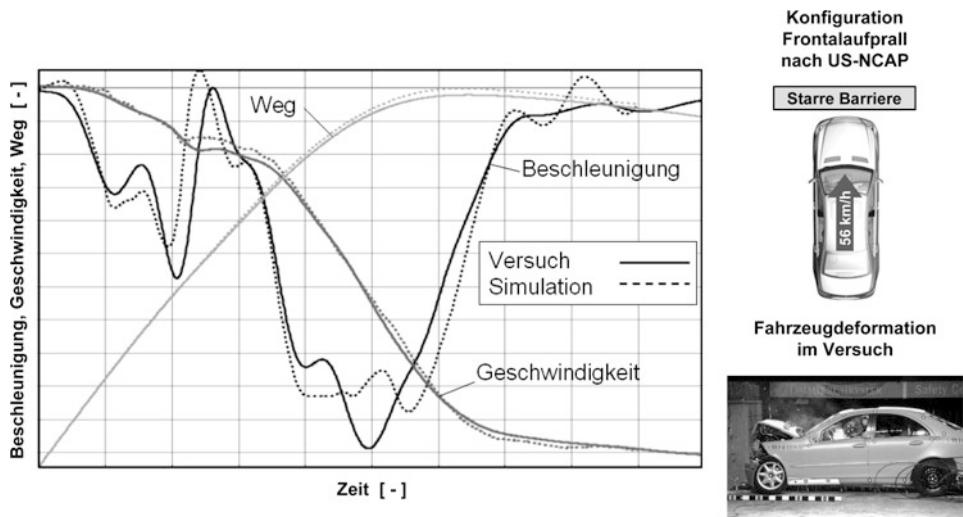
Abb. 9.17 Beispiel eines Validierungsprozesses

### 9.5.3 Möglichkeiten und Grenzen

Der hohe Detaillierungsgrad heutiger Simulationsmodelle ermöglicht sehr genaue Prognosen hinsichtlich des Strukturverhaltens von Rohbau- und Montageteilen. Anhand des in Abb. 9.18 gezeigten a/v/s-Diagramms, benannt nach den zeitabhängig dargestellten Bewegungsgrößen Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg, soll die **Prognosefähigkeit** der rechnerischen Simulation im Vergleich zu Versuchsergebnissen verdeutlicht werden. Die abgebildeten Größen resultieren aus einem Frontalaufprall-Versuch nach US-NCAP-Vorgaben, bei dem ein Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 56 km/h und einer Überdeckung von 100 % auf eine starre Barriere prallt.

Eine vollständige Übereinstimmung zwischen Versuch und Berechnung lässt sich jedoch aufgrund der Berechnungsmethode der Finiten Elemente, die per Definition eine Näherungsmethode ist, aufgrund des komplexen Deformationsverhaltens, der Streuung von Material-Kennwerten und fertigungsbedingter Toleranzen nicht erreichen. Jedoch treten auch bei Messergebnissen identischer Versuche derartige Abweichungen auf.

Ein wesentlicher Vorteil der numerischen Simulation ist, dass sie detaillierte Einblicke in die Konstruktion während des simulierten Belastungsvorgangs liefert. Ein Modell bildet aber nur genau das ab, was bei der Modellbildung berücksichtigt wurde. Daher begrenzen



**Abb. 9.18** Vergleich zwischen Versuch und Berechnung anhand der Fahrzeug-Bewegungsgrößen

Idealisierungen und Diskretisierungen die Aussagefähigkeit. Besonders deutlich ist dies insbesondere bei spezifischen Anwendungen der Crash-Simulation, beispielsweise bei

- Materialmodellen für Verbundwerkstoffe,
- der Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen,
- Modellen zur zuverlässigen Prognose des Bauteilversagens (z. B. bei Rissentstehung),
- Modellen zur Beschreibung des Rissfortschritts und
- der Modellierung von Fügetechnik (Klebungen, Schweißpunkte, etc.) einschließlich der Versagensprognose.

Zu den genannten Problemfeldern sind allerdings geeignete Ansätze entwickelt worden, die näherungsweise eine Prognose erlauben und für eine Erstauslegung verwendet werden können. Darüber hinaus existieren eben nicht nur bei der virtuellen Absicherung derzeit noch unvermeidbare Grenzen, auch die versuchstechnische Absicherung ist mit gewissen Unsicherheiten behaftet, als da wären

- Idealisierungen in frühen Fahrzeug-Entwicklungsphasen,
- Prototypen-spezifische Bauteile und Fügetechniken,
- Stand der Steuergeräte und der Software,
- Streuungen bei Prototypen, am Versuchsaufbau und beim Versuchsablauf und schließlich
- reproduzierbares Einsetzen von Dummym.

Eine zielorientierte Entwicklung der passiven Sicherheit lässt sich heute, unter Berücksichtigung aller Einflussfaktoren hinsichtlich Funktionen und Systemen, nur dann optimal und effizient betreiben, wenn Möglichkeiten, aber auch Grenzen aller zur Verfügung stehenden Werkzeuge der rechnerischen und der experimentellen Simulation bekannt sind und optimal aufeinander abgestimmt eingesetzt werden.

In Zukunft wird sich der Einsatz der numerischen Simulation erheblich ausweiten, um die kostenintensive Herstellung von Versuchsmustern und deren Erprobung zu reduzieren. Die letztendlich immer noch verbleibenden Bestätigungsversuche jedoch werden komplexer, da von den Ergebnissen aus den Versuchen mit einer reduzierten Anzahl an Prototypen und Bestigungsfahrzeugen möglichst umfassende Aussagen zum Gesamtfahrzeug erwartet werden. Zudem wird künftig die Erprobung noch weiter auf das Unfallgeschehen abzielen, um Erkenntnisse aus der Interaktion zwischen aktiver und passiver Sicherheit oder der Kompatibilitätsphänomene [12, 13] zu generieren.

Die Entwicklung der passiven Sicherheit einschließlich der Zertifizierung völlig ohne reelle Prototypen und Bestigungsfahrzeugen ist heute noch nicht vorstellbar, da zu diesem Zweck die Gesamtfunktionalität eines Fahrzeugs, wie Crash-Sensorik, Aufreißverhalten der Airbag-Klappen, Steuergeräte, Türöffnungskräfte, Kraftstoffsystem-Dichtigkeit, CAN-Bus u. a. in der Berechnung funktionell abgebildet werden müsste. Aus heutiger Sicht aber ist die Erstellung eines virtuellen Gesamtfahrzeugs mit all seinen Funktionalitäten zu komplex und somit zu kosten- und zeitaufwendig.

Die Aufgabe des Entwicklungsingenieurs wird weiterhin darin bestehen, die erarbeiteten Berechnungs- und Erprobungsergebnisse kritisch zu betrachten und seine Aussagefähigkeit permanent zu überprüfen, damit durch entsprechende Maßnahmen das Produkt möglichst frühzeitig einen hohen Reifegrad erreicht und ein rundum sicheres Fahrzeug zur Marktreife gelangt.

---

## 9.6 Herausforderungen innerhalb der Projektarbeit

Die Vernetzung der passiven Sicherheit mit anderen Disziplinen im Fahrzeugentwicklungsprozess wird am Beispiel der Rohbauentwicklung deutlich: Der Rohbau ist als wesentliche Komponente der passiven Sicherheit der integrale Bestandteil des Fahrzeugs. Er besitzt zu allen übrigen Komponenten des Fahrzeugs Schnittstellen (z. B. Insassenschutz-Systeme, Türen, Innenverkleidungen, Stoßfänger, Cockpit, Sitze, Achsen, Elektrik) und er muss eine Vielzahl an weiteren kundenrelevanten Eigenschaften erfüllen (z. B. Korrosionsschutz, Betriebsfestigkeit, Steifigkeit, Schwingungskomfort). Diese Anforderungen können teilweise im Konflikt zueinander stehen und verlangen ihrerseits optimale Lösungen bezüglich Kosten, Gewicht, Qualität und Zeit.

Ein weiteres Beispiel für die Interaktion der Disziplinen ist die zunehmende Vernetzung zwischen Systemkomponenten der aktiven und der passiven Sicherheit. Heutige Versuche zur Entwicklung und Bewertung der Crash-Sicherheit werden standardisiert im Labor durchgeführt. Hierbei werden aus Gründen der Reproduzierbarkeit der Versuchser-

gebnisse und zur Bewertung des Entwicklungsfortschritts immer gleiche Versuchskonstellationen, wie Geschwindigkeiten, Fahrzeugüberdeckungen, Sitzpositionen, Insassengewichte und -größen, festgelegt und eingehalten. Anhand der Ergebnisse werden Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Unfallsicherheit bewertet und zielorientiert entwickelt. Dabei geben die festgeschriebenen Grenz- bzw. Zielwerte die Entwicklungsrichtung vor, wobei der Erreichungsgrad der in den standardisierten Versuchen ermittelten Messwerte regelmäßig nachgewiesen wird und als Maß für den Entwicklungsfortschritt dient.

Doch wie verhält sich dazu die Fahrzeugsicherheit im wirklichen Unfallgeschehen? Bekanntermaßen sind z. B. für die Unfallschwere Fahrzeuggeschwindigkeit und Aufprallkonfiguration (Aufprallart, Winkel, Überdeckung, etc.) wesentliche Parameter. So werden beispielsweise Systeme zur Unfallschwereminderung oder zur Unfallvermeidung entwickelt, wie z. B. Antiblockiersysteme (ABS), elektronische Stabilitätsprogramme (ESP), Bremsassistenten oder umfelderkennende Systeme, die einen erheblichen Einfluss und ein großes Potential zur Erhöhung der Gesamtsicherheit aufweisen. Mercedes-Benz hat bereits im Jahr 2002 mit der Einführung von PRE-SAFE® [14, 15] eine neue Verknüpfungsmöglichkeit gefunden, um eine verbesserte Anpassung der Fahrzeugsicherheit an das Unfallgeschehen mit Systemen der aktiven Sicherheit, wie z. B. mit Assistenzsystemen, vorzunehmen. Diese Interaktion der Systeme hinsichtlich Anforderung und Funktionalität verlangt jedoch völlig neue vernetzte Arbeitsstrukturen und flexible Prozesse in der Entwicklung. Bisher nicht verbundene Entwicklungsabteilungen müssen ihre Inhalte und Entwicklungsprogramme nun völlig neu organisieren und die davon ableitbaren Teilprozesse neu gestalten. So werden in zunehmendem Maße elektrische Komfortsysteme, wie Sitzverstellungen, Schiebedächer, Fensterheber aber auch Fondsitzanlagen und reversible Gurtsysteme, in den präventiven Insassenschutz integriert. Dies wiederum stellt höhere Anforderungen an die Ausfall- und Signalsicherheit der Bus-Systeme und erhöht gleichzeitig die Ansprüche an die Dauerhaltbarkeit und Verfügbarkeit der Aktoren. Für die so genannte Elektrik/Elektronik-Topologie bedeutet dies eine weitere Erhöhung der Systemvernetzung zur Berücksichtigung der Aktoren-Ansteuerung (vgl. Abschn. 5.3). Infolge dessen müssen neue Anforderungen, wie beispielsweise Mindestgeschwindigkeiten in der Signalübertragung, gewährleistet sein und festgeschrieben werden. Weitere Herausforderungen ergeben sich aus Fragen zur Standardisierung der Komponenten sowie der Übertragungswege und -signale, da Systeme verschiedener Zulieferer in das Fahrzeug integriert werden und dort zuverlässig zusammenwirken müssen. Die Aufgabe der Fahrzeughsteller besteht nun darin, übergreifend Möglichkeiten der Vereinfachung und zur Standardisierung zu schaffen.

Die Anzahl der beteiligten Personen und Abteilungen zur Entwicklung derart komplexer Systeme ist in den letzten Jahren sprunghaft angestiegen. Die zur Bewältigung der umfangreichen Systemaufgabe erforderlichen Prozesse müssen daher einerseits eindeutig beschrieben sein und von den Beteiligten beherrscht werden, andererseits aber genügend Flexibilität und Offenheit zur Einführung von Innovationen bieten, um sowohl mit den Kundenwünschen als auch mit den technologischen Veränderungen Schritt halten zu können.

## 9.7 Sicherheitsinnovationen im Entwicklungsprozess

Grundsätzlich können neue Lösungen und Konzepte den Entwicklungsprozess maßgeblich beeinflussen. Je nach Neuheitsgrad und Tragweite einer Lösung oder eines Konzeptes stellen Innovationen im Entwicklungsprozess einen Risikofaktor dar. Im Verlauf der Entwicklung fehlen Erfahrungswerte, und es kann immer zu unbekannten, unerwarteten Problemen kommen. Der Entwicklungsprozess muss also so viel Flexibilität aufweisen, dass er trotz Schwierigkeiten und Hindernissen zu einem ausgereiften Produkt führt. Selbstverständlich gilt es gerade bei innovativen Lösungen und Konzepten eine sorgfältige Vorentwicklung zu gewährleisten. Das Ziel eines Herstellers, eine Innovation als erster auf den Markt zu bringen, schränkt allerdings meist den Zeithorizont stark ein. Lässt sich nämlich ein Hersteller bei der Entwicklung zu viel Zeit, läuft er Gefahr, nur zweiter am Markt zu sein.

Zielführend ist also nur das sorgfältige Abwägen der Entwicklungsrisiken und das Einbringen einer Innovation zum richtigen Zeitpunkt in einen geeigneten, flexiblen Gesamtentwicklungsprozess. Die Flexibilität des Prozesses kann bedeuten, dass Optimierungsschleifen vorgesehen und mehr Kapazitäten eingesetzt werden müssen oder aber, dass im schlimmsten Fall so genannte Rückfalllösungen vorzuhalten sind. Damit wird deutlich, dass je nach Art und Komplexität von Innovationen die Entwicklungsprozesse unterschiedlich ausgestaltet werden müssen. Für eher evolutionäre Standardprodukte sind dem entsprechend kürzere Abläufe möglich als für komplexe, revolutionäre, innovative Produkte.

In welchem Maß Innovationen den Prozess beeinflussen und in welchem Stadium der Gesamtentwicklung sie eingeschleust werden müssen, hängt von der Konzeptrelevanz einer Lösung ab. Dabei unterscheidet man die folgenden Kategorien (Abb. 9.19):

- **Fahrzeugkonzept-bestimmende Sicherheitsinnovationen**

Innovationen, die das Design, das Gesamtfahrzeug-Package, die Karosseriestruktur, die Innenraumgestaltung oder die Elektrik/Elektronik-Architektur wesentlich prägen. Diese sind bei Projektstart in der Definitionsphase zu berücksichtigen.

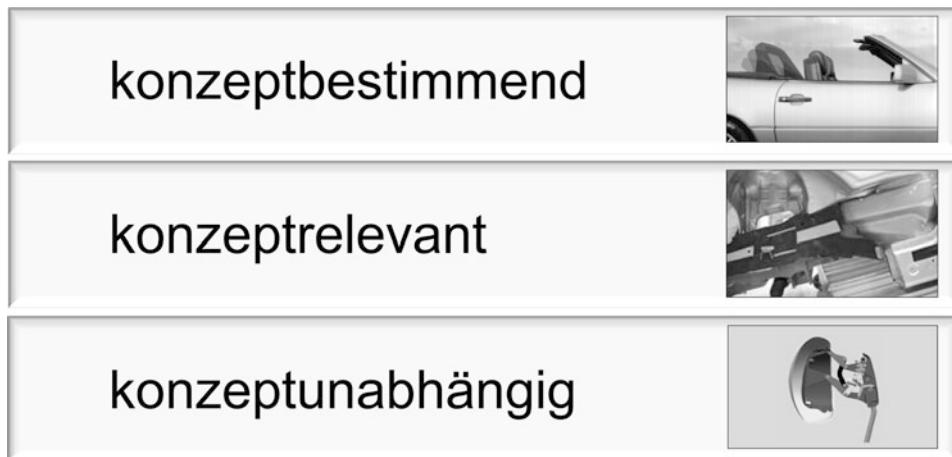
- **Fahrzeugkonzept-relevante Sicherheitsinnovationen**

Innovationen, die maßgebliche Anforderungen an das Design, das Gesamtfahrzeug-Package, die Karosseriestruktur, die Innenraumgestaltung oder die Elektrik/Elektronik-Architektur stellen. Diese sind in das Konzeptheft einzubringen.

- **Fahrzeugkonzept-unabhängige Sicherheitsinnovationen**

Innovationen, die Design, Gesamtfahrzeug-Package, Karosseriestruktur, Innenraumgestaltung oder die Elektrik/Elektronik-Architektur entweder nicht oder nur sehr wenig beeinflussen, die also in bestehende Konzepte leicht integrierbar sind. Diese können ggf. noch bei Lastenheftbeginn berücksichtigt werden.

Fahrzeugkonzeptbestimmende Sicherheitsinnovationen können beispielsweise Maßnahmen zum Fußgängerschutz sein, die erheblichen Einfluss auf das Design und die



**Abb. 9.19** Relevanz von Innovationen für das Fahrzeugkonzept

Silhouette eines Fahrzeuges besitzen. Konzeptrelevante Innovationen sind beispielsweise Strukturmaßnahmen, die Achsgeometrie und Package ganz erheblich beeinflussen. Denkbar sind aber auch Sicherheitssysteme, die ganz bestimmte Anforderungen an eine Elektrik/Elektronik-Architektur stellen und damit diese maßgeblich beeinflussen. Fahrzeugkonzept-unabhängige Innovationen beeinflussen den Entwicklungsprozess nur in geringem Umfang, da sie sich nur auf sehr lokal begrenzte Bereiche konzentrieren. Solche Innovationen sind relativ spät in einen Ablauf integrierbar und bieten sich auch als Modellpflegemaßnahmen an, da sie in ein vorhandenes Serienfahrzeug implementiert werden können.

Wie alle Innovationen müssen auch Sicherheitsinnovationen in ihrer Qualität überprüft werden, d. h. so genannte Quality Gates durchlaufen. Um in einem Konzeptheft für ein neues Fahrzeug berücksichtigt zu werden, muss an Teilaufbauten oder Erprobungsträgern nachgewiesen werden, dass das Prinzip dieser Neuerung funktioniert und die gewünschten Effekte im Sinne des erwarteten Kundennutzens bewirkt. Dieser Nachweis wird **Prinzip-tauglichkeit** genannt.

Zum Konzeptheft ist der Nachweis der **Konzepttauglichkeit** erforderlich. Das bedeutet, dass die Funktion auch in der spezifischen Fahrzeugumgebung sichergestellt ist und darüber hinaus erste Risikoanalysen vorliegen. Außerdem müssen zu diesem Zeitpunkt Nachweise für Herstellung und Sicherstellung künftiger Qualitätsziele vorhanden sein.

Zum Lastenheft ist die entscheidende Hürde in dem allumfassenden Reifegradnachweis der **Serientauglichkeit** zu sehen. Bei der Serientauglichkeit ist die Funktion im Zusammenhang mit weiteren Innovationen der Zielbaureihe nachzuweisen, d. h. die Erreichung von Zielgewicht und Zielkosten ist sichergestellt, 3D-CAD-Daten sind aktualisiert und alle Zielkonflikte sind gelöst.

Zum Ende der Absicherungsphase, also zum Quality Gate „Lastenheft“ (vgl. Abb. 9.3) wechselt die Entwicklungsverantwortung meist von der Forschung/Vorentwicklung in die Serienentwicklung. Diese Übergabe ist traditionell schwierig und ein Stolperstein für viele Innovationen, da in der Vorentwicklung und in der Serienentwicklung vielfach ein unterschiedliches Verständnis von Serientauglichkeit und Reifegrade vorherrscht. Die Praxis zeigt, dass es sinnvoll erscheint, hier einen schleifenden Übergang der Verantwortlichkeiten zu realisieren, indem zuständige Projektleiter mit der Innovation in die Serienentwicklung wechseln oder bereits zeitlich vor der Übergabe ein Serienentwickler im Projekt eingesetzt wird.

---

## 9.8 Integration der Unfallforschung in den Entwicklungsablauf am Beispiel Mercedes-Benz

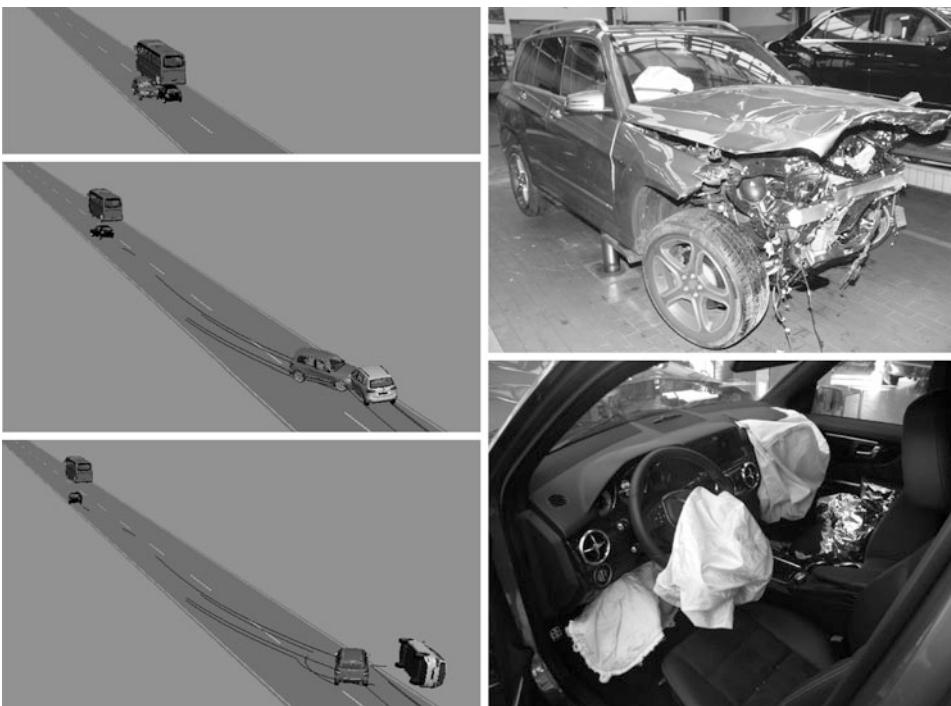
Seit 1969 untersuchen Ingenieure Straßenverkehrsunfälle mit Mercedes-Benz-Personenwagen. Das dabei verfolgte Ziel besteht darin, aus Unfällen zu lernen, um die Fahrzeugsicherheit zu verbessern. Denn wer sichere Fahrzeuge bauen will, muss auch wissen, was im Unfallgeschehen passiert.

Die Arbeit der Mercedes-Benz-Unfallforscher wurde erst durch einen Erlass des Baden-Württembergischen Innenministeriums vom 29. April 1969 möglich. Bis heute untersuchten die Forscher nahezu 4.200 Unfälle mit verletzten Insassen. Eine aus mehreren Ingenieuren bestehende Arbeitsgruppe führt diese Untersuchungen primär im Großraum Stuttgart durch. Bei interessanten Fällen wird das Erhebungsgebiet auch erweitert. Im Wesentlichen wird mit der Polizei, den Abschleppunternehmen und den Autohäusern kooperiert. Ob eine Untersuchung durchgeführt wird, hängt von folgenden Kriterien ab:

- Verletzungen der Insassen,
- Deformationen des Fahrzeugs und
- Auslösung der Insassenschutz-Systeme

In die Bewertung eines Unfalls gehen verschiedene Informationen ein, die sich auf die Untersuchung der Unfallfahrzeuge, die Vermessung der Unfallstelle und die Kenntnisse über die Insassenverletzungen beziehen. Aus den Informationen werden Daten abgeleitet, mit denen anschließend eine detaillierte Rekonstruktion des Unfalls ermöglicht wird. Die Rekonstruktion erfolgt rechnerisch mit Hilfe von PC-Programmen, die eine Animation des Unfallhergangs gestatten. Ein Beispiel dazu ist in Abb. 9.20 dargestellt.

Maßgeblich für das erzielte Ergebnis ist die so genannte Kollisionsanalyse, d. h. die Berechnung der Kräfte und Momente während des Stoßes. Hierbei werden alle Randbedingungen wie das Verhaken oder Abgleiten am Kollisionskontrahenten berücksichtigt [16]. Der EES-Wert (EES: Energy Equivalent Speed – siehe Abschn. 2.2.2) spielt bei dieser



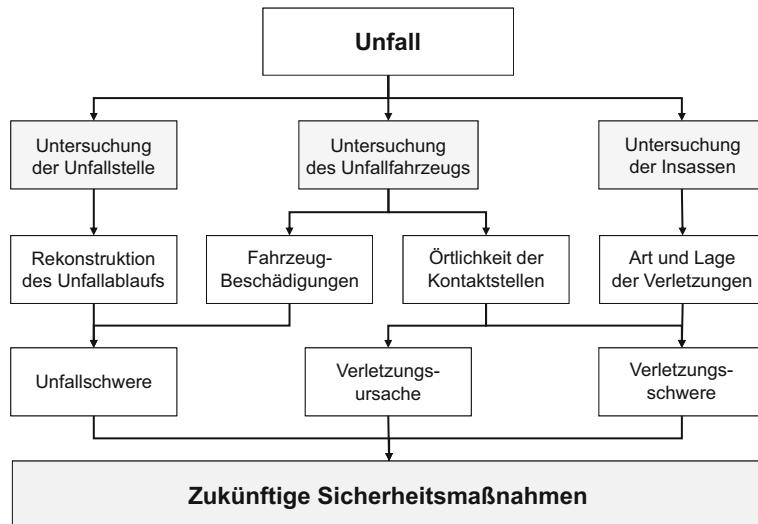
**Abb. 9.20** Beispiel einer Unfallrekonstruktion

Berechnung als Kontrollgröße eine wichtige Rolle. Er ist ein Wert, der die eingebrachte Energie, die in Deformation umgewandelt wird, angegeben als Geschwindigkeit in km/h. Sie wird aus Crashversuchen ermittelt und stellt ein Maß für die Unfallschwere dar [17].

Die Insassenverletzungen werden detailliert aufgenommen und mit Hilfe der AIS-Skala (Abbreviated Injury Scale – siehe Abschn. 3.2.2) eingeteilt und codiert [18]. Dabei wird jede Einzelverletzung des Körpers bewertet. Abschließend erfolgt die Bestimmung des MAIS-Wertes, der dann zusammenfassend die maximal auftretende körperteilspezifische Einzel-Verletzungsschwere des Insassen beschreibt.

Abbildung 9.21 zeigt die wesentlichen Zusammenhänge beim Unfall und die Durchführung einer Bewertung. Mit Hilfe der Daten und Informationen lässt sich ein Gesamtbild über Unfallschwere, Verletzungsursache und Verletzungsschwere formulieren. Aus diesen Erkenntnissen entstehen dann Ideen und konkrete Vorstellungen für künftige Sicherheitsmaßnahmen.

Mit Hilfe der Erkenntnisse aus der Unfallanalyse konnten in der Vergangenheit zahlreiche Verbesserungen am Fahrzeug und neue Prüfverfahren, z. B. in den 1970er Jahren

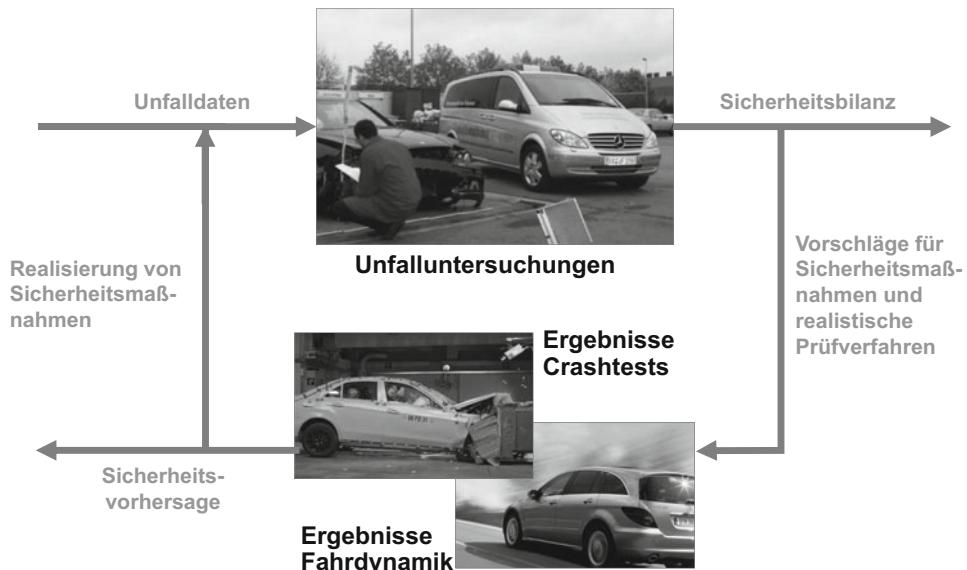


**Abb. 9.21** Kausalitäten beim Unfall und Ableitung von Sicherheitsmaßnahmen

der mit „Offset“ charakterisierte seitlich versetzte Frontalaufprall, abgeleitet werden. Auch das vor dem Unfall wirkende PRE-SAFE®-System resultiert aus Erkenntnissen der Analyse von Straßenverkehrsunfällen [6, 15]. Eine neue Richtung, die sich ebenfalls aus der Unfallforschung ableiten lässt, ist in der Individualisierung der Insassenschutz-Systeme zu sehen. Hierbei werden in Abhängigkeit von Insassenparametern, wie Körpergröße und -gewicht, Geschlecht u. a., zukünftig präzisere Anpassungen der Schutzsysteme mit Hilfe von Sensor-Einrichtungen im Fahrzeug vorgenommen. Erste Entwicklungen zeigen deutliche Potenziale für mögliche Anpassungen der Insassenschutzsysteme auf [19].

Nach der Serieneinführung neuer Technologien lassen sich diese erneut im Unfallgeschehen bewerten. Dieser „Regelkreis der Unfallforschung“, der durch die Unfalldaten als Eingangsgröße gespeist wird, ist in Abb. 9.22 dargestellt. Sinnvolle Testkonfigurationen können abgeleitet werden und am Ende steht eine Sicherheitsvorhersage für die jeweiligen Fahrzeugtypen bzw. eine Bewertung von bereits im Markt befindlichen Systemen zur Verfügung.

Allerdings konzentriert sich die Unfallforschung längst nicht mehr nur auf den Schutz bei Kollisionen selbst, sondern die Fahrzeugsicherheit und damit auch die Unfallforschung muss ganzheitlich betrachtet werden. Jeder Unfall beginnt mit einer kritischen Situation und endet mit der Rettung. Insbesondere die Unfallursachenforschung gewinnt in Zukunft eine immer größere Bedeutung. Die Mercedes-Benz-Unfallforschung ist aus dem heutigen Entwicklungsprozess nicht mehr wegzudenken und Wegbereiter neuer, sich weiterentwickelnder Sicherheitsanforderungen [20, 21].



**Abb. 9.22** Regelkreis der Unfallforschung

## Literatur

1. Schöneburg, R., Baumann, K.-H.: Integrale Fahrzeugsicherheit. Vorlesungsmanuskript Technische Universität Dresden und Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden. Dresden (2012).
2. Kramer, F.: Automobil & Umwelt. Vorlesungsskript zur gleichnamigen Lehrveranstaltung an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden (2011/12).
3. McNeill, A., Haberl, J., Holzner, M., Trautenhahn, U., Schöneburg, R., Strutz, T.: Current Worldwide Side Impact Activities – Divergence versus Harmonisation and the Possible Effect on Future Car Design. 19th ESV-Conference, Paper Number 05-0077-O. Washington D.C. (VA/USA) (2005).
4. Schöneburg, R., Baumann, K.-H.: Passive Safety – the Influence of new Legislation and Rating Systems on Vehicle Development. 1st Sicherheit im Automobil. München (2001).
5. Baumann, K.-H., Schöneburg, R.: Manufacturer's Demand on Crash Test Programs. TÜV Symposium Worldwide Harmonization of Crash Test Programs. Köln (1999).
6. Breitling, T., Mellinghoff, U., Metzler, H.-J., Schöneburg, R.: Das Experimental-Sicherheits-Fahrzeug ESF 2009. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift **111**(07–08), 532–541 (2009).
7. Schöneburg, R., Baumann, K.-H., Timmel, M., Bürkle, H.: Integrale Sicherheit bei Mercedes-Benz: Kunststoffe – Erfahrungen und zukünftige Anforderungen. VDI-K Internationaler Kongress, Kunststoffe im Automobilbau, Düsseldorf (07. April 2011).
8. Haldenwanger, H.-G., Liman, U., Reim, H., Schöneburg, R.: Die Notwendigkeit von Computersimulationen bei der Entwicklung von Kunststoffbauteilen. VDI-K, Kunststoffe im Automobilbau. VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 87–116 (1995).

9. Schöneburg, R.: Einsatz numerischer Simulationsverfahren im Fahrzeugsicherheitsversuch. Bag & Belt, 2nd International Akzo Symposium on Occupant Restraint Systems, S. 21–31. Köln (1992).
10. Schöneburg, R.: Numerische Simulation in der Airbagentwicklung – Stand der Technik, Entwicklungen und Tendenzen. Airbag 2000, Int. Symposium on Sophisticated Car Occupant Safety Systems, S. 8-1-14. Karlsruhe (1992).
11. Schöneburg, R.: CAE in the New Development Process MDS Excellence. 9. EDM CAE Forum, Stuttgart (12./13. Juli 2011).
12. Busch, D., Cakmak, M., Schöneburg, R., Zobel, R.: Evaluation of Crash Compatibility of Vehicles with the Aid of Finite Element Analysis. 15th ESV-Conference, Paper Number 96-S4-W-25. Melbourne (AUS) (1996).
13. Schöneburg, R.: Kompatibilität von Personenwagen, wesentliches Kriterium für sichere Fahrzeuge. VDA Technischer Kongress. Rüsselsheim (2004).
14. Schöneburg, R., Breitling, T.: Enhancement of Active & Passive Safety by Future PRE-SAFE®Systems. 19th ESV-Conference, Paper Number 05-0080-O. Washington D.C. (VA/USA) (2005).
15. Schöneburg, R., Baumann, K.-H., Fehring, M.: The Efficiency of PRE-SAFE Systems in Pre-braked Frontal Collision Situations. 22th ESV-Conference, Paper Number 11-0207-O, Washington D.C. (USA) (2011).
16. Burg, H., Moser, A.: (Hrsg) Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden (2007).
17. Zeidler, F.: Die Bedeutung der Formänderungsenergie für die Unfallforschung und das EES-Unfallrekonstruktionsverfahren. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **1984**(4) (1984). Verlag Information Ambs GmbH, Kippenheim.
18. Association for the Advancement of Automotive Medicine: The Abbreviated Injury Scale – AIS 2005. Association for the Advancement of Automotive Medicine, Des Plaine (IL/USA) (2005).
19. Schöneburg, R.: Individual Safety – Potentiale für die weitere Erhöhung der Insassensicherheit im PKW. 15. automobil-forum. Stuttgart (2004).
20. Schöneburg, R.: Auf dem Weg zur elektronischen Knautschzone. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift **110**, 953 (2008).
21. Schöneburg, R., Baumann, K.-H.: Auf dem Weg zur virtuellen Knautschzone – Möglichkeiten des präventiven Energieabbaus und Auswirkungen auf Fahrzeug und Insassen in der Vorunfallphase. 11. Symposium AAET (Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel), Braunschweig (10./11. Februar 2010).

---

# Sachverzeichnis

## A

AATD-Dummy, 381  
Abbiegeunfall, 30  
Abdomen, 85  
Abdominalbereich, 85, 376  
abgestimmtes Insassenschutz-System, 201  
Absicherungsphase, 456  
Abstandsregel-Tempomat, 286  
ACEA (European Automobile Manufacturer Association), 305  
ADAC-Testverfahren zur passiven Sicherheit von PKW, 337  
Advanced Driver Assist System, 308  
Airbag, 241

- Abdeckung, 213
- Elektronik, 287
- Gehäuse, 213
- Modul, 210
- off-Schalter, 277
- System, 199, 221, 235

AIS (Abbreviated Injury Scale), 107  
AIS-Skalierung, 108  
„aktive“ Kopfstütze, 219  
aktive Sicherheit, 1, 6, 32  
Aktivierung von Fußgängerschutz-Systemen, 282  
alternative Gasgeneratoren, 212  
Anatomie des menschlichen Körpers, 53  
anatomische Ebene, 54  
Änderung der Bewegungsenergie  $\Delta E$ , 22, 165  
angepasstes Insassenschutz-System, 26  
Anprall-Geometrie, 237  
anthropometrische Messpuppe, 120  
Anti-Blockier-System, 283  
Anti-Sliding-Bag, 208  
Antrieb, 371

Antriebsschlupf-Regelung, 283  
Architektur der Deformationsstruktur, 170  
Arm, 96  
Armaturentafel, 221  
Assistenz-System, 24  
Aufbau von Schutzhelmen, 226  
Aufprallart, 40  
Aufpralltyp, 43  
Aufroller-Straffer, 192  
Aufstellen der Haube, 241  
äußere Sicherheit, 159  
außerorts, 30  
Automobilhersteller, 17  
Automobil-Sicherheitsgesetz, 318  
autonomes Fahren, 308  
axiale Belastung, 64  
axiale Kompression, 67

**B**

Bauchspeicheldrüse, 87  
Becken, 89, 376  
Beckendrehwinkel, 147  
Beeinflussung der Kinematik, 230  
Beifahrer-Airbags, 204  
Bein, 97  
Belastung des menschlichen Kopfes, 136  
Belastungsart, 45, 47  
Belastungsgröße, 108, 116, 372, 381  
Belastungskriterien-Level, 116  
Belastungskriterium, 116  
Belastungsrichtung, 373  
Belastungsschwere, 116  
Belastungstyp, 46, 47  
Belastungswert, 116, 372  
Beleuchtungsanlage, 389  
Benutzung von Kindersitzen, 277

- Berechnungsbewertung, 425  
 Berechnungsgenauigkeit, 426  
 Berechnungsmodelle, 407, 444  
 Berechnungsverfahren, 393, 395  
 Beschleunigungsaufnehmer, 273  
 Beschleunigungsmessung, 382  
 Beschleunigungsschlitten, 365  
 beschreibbare Daten, 19  
 Bestäigungsfahrzeug, 443  
 Beurteilung des Fahrzeug-  
     Verzögerungsverlaufs, 176  
 Beweglichkeit der Halswirbelsäule, 62  
 Bewegungsmöglichkeit, 101  
 Bewegungsverhalten, 21  
 Bewegungszustand, 160  
 Bewertung  
     auf der Basis der Unfallstatistik, 333  
     auf der Basis von experimentellen  
         Untersuchungen, 334  
     nach „auto motor und sport“ (ams-Test),  
         337  
 Bewertungsverfahren, 347  
 Biofidelität, 332, 438  
 Biofidelity, 123, 373  
 Biomechanik, 53  
 Biomechanik-Forschung, 114  
 biomechanische Mensch-Modelle, 423  
 BioRID, 380  
 BioRID-Dummy, 332  
 Blutgefäße, 88  
 Brandschutz, 251  
 Brandschutz-Einrichtung, 252  
 Brems-Assistent, 284  
 BRIC-Staaten, 319  
 Brustkorb, 74, 142  
 Bus-fähiger Anzünder, 301  
 Fußgeldbewehrung, 6  
 Bus-System, 299, 305
- C**  
 CAD-Konstruktion, 442  
 charakteristische Phase, 238  
 Crash  
     -Anlage, 371  
     -Berechnung, 426  
     -Dauer, 166  
     -Sensor, 258, 259  
     -Sicherheit, 427  
     -Simulation, 393, 398, 425, 451
- Crash Worthiness Rating System for Cars  
     (CWRSC), 338  
 Crash-Versuch  
     zur Frontalkollision, 320  
     zur Seitenkollision, 320
- D**  
 Darmbein, 90  
 Datenübertragung, 298  
 Deformationsarbeit, 160  
 Deformationsstruktur, 159, 180  
     im Heck, 182  
 Deformationsverhalten, 450  
 Deformationsweg, 159  
 Demodulation, 385  
 Dens-Frakturen, 65  
 Detaillierungsgrad, 410  
 diffuse Verletzung, 58  
 direkte Beanspruchung, 104  
 Distorsion, 141  
 Dokumentation, 440  
 Dokumentationszwecke, 388  
 Drehung zwischen Wirbeln, 65  
 Drive by wire, 308  
 Druckmessung, 383  
 Druck-Sensor, 274  
 Dummy, 121, 373  
 duroplastischer Kunststoff, 227
- E**  
 EBS (Equivalent Barrier Speed), 21  
 ECE-Regelung, 316, 317  
 EES (Energy Equivalent Speed), 21  
 Einbiegen-/Kreuzen-Unfall, 30  
 einfache Beckenring-Fraktur, 93  
 Einführung von Innovationen, 453  
 Eingeweide, 88  
 Einsatz von Airbag-Systemen, 205  
 Einscheiben-Sicherheitsglas, 223  
 Elektrik/Elektronik-Topologie, 453  
 elektromechanischer Crash-Sensor, 259  
 elektromechanisches System, 292  
 elektronischer Sensor, 265  
 elektronisches System, 293  
 energieabsorbierende Frontstruktur, 240  
 energieabsorbierende Rückenlehne, 235  
 Energieaufnahmevermögen, 161  
 Energiebilanz, 426  
 Energiereserve, 289

- Entfaltungsprozess, 401  
Entsorgungszündung, 291  
Entwicklungsphase, 435  
Ereignisdaten-Speicherung, 290  
Erste Hilfe, 248  
Erträglichkeitsgrenze, 173  
ESP-System, 346  
ETS (Equivalent Test Speed), 21  
EU- (bzw. EWG-) Typgenehmigung, 317  
EU- (oder EWG-) Richtlinie, 316  
Euro NCAP, 339, 341  
Evakuierung, 237  
EWG-Richtlinie, 316  
experimentell oder rechnerisch ermittelbare Daten, 20  
experimentelle Simulation, 357  
explizites Verfahren, 398  
Extension, 73  
Extension des Halses, 66, 71  
externer Sensor, 290
- F**  
Fahrdynamik-Regelung, 284  
Fahrer motorisierter Zweiräder, 330  
Fahrer-Airbags, 204  
Fahrerassistenzsystem, 283  
Fahrunfall, 29  
Fahrzeugbrand, 252  
Fahrzeug-Deformationsweg, 174  
Fahrzeugentwicklungsprozess, 214, 433  
Fahrzeugkonzept-bestimmende Sicherheitsinnovation, 454  
Fahrzeugkonzept-relevante Sicherheitsinnovation, 454  
Fahrzeugkonzept-unabhängige Sicherheitsinnovation, 454  
Fahrzeugmasse, 166  
Fahrzeugscheibe, 233  
Fahrzeug-Seitenstruktur, 171  
Fahrzeugversuche, 358  
Fahrzeugverzögerung, 165  
Fatal Accident Reporting System (FARS), 15  
Federal Motor Vehicle Safety Standards, 318  
Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse, 441  
fehlertolerierendes Verkehrssystem, 27  
Festigkeit der Zelle, 179  
Filter, 386  
Filterfrequenz-Klasse, 386  
Finite-Elemente-Methode, 395, 397  
firmenspezifische Prüfvorschrift, 334  
Flexion der Halswirbelsäule, 68  
Flexions-Bewegung, 73  
FOLKSAM-Report, 333  
Fond-Airbags, 208  
Form und Größe des Airbags, 204  
Fraktur, 104  
    der Gelenkpfanne, 94  
    des Gelenkkopfes, 94  
    des Kreuzbeins, 93  
    des Oberschenkelhalses, 95  
    des Oberschenkelschaftes, 95  
    des rückwärtigen Gelenkpfannenrandes, 94  
Freianlage, 371  
Freigabe, 442  
Freiwilligen, 119  
Frequenzgang, 386  
Frequenzmultiplex-Verfahren, 386  
Frontal-Aufprallversuch, 342, 359  
Frontalkollision, 162, 179, 201, 379  
Frontschutzbügel, 242  
Front-Unterfahrschutz, 243  
Funktionalität, 357, 358  
Fußgänger-Komponentenversuch, 342  
Fußgängermodell, 419  
Fußgängerschutz, 238, 246  
Fußgängerschutz-Maßnahme, 26  
Fußgänger-Schutzpotenzial, 345  
Fußgängerschutz-Zone, 180  
Fuß-Kontaktkraft, 149
- G**  
GAMBIT (Generalized Acceleration Model for Brain Injury Threshold), 137  
GAMBIT-Grenzkurve, 139  
GAMBIT-Wert, 122  
Gasgenerator, 210  
Gefahr, 3  
Gefährdung, 3  
Gefahrensituation, 306  
Gehirn, 57  
Gehirnverletzungen, 58  
General Safety Regulation, 318, 332  
Generierung, 384  
geometrische Aggressivität, 164  
geometrische Inkompatibilität, 246  
Gepäckablage, 236  
German In depth Accident Study (GIDAS), 16

- Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV), 16
- Geschwindigkeitsänderung, 161, 162, 164
- Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$ , 22
- Geschwindigkeitsangleich, 172
- Geschwindigkeitsassistent, 346
- Gesetzgebung, 315
- Gewebe- und Gefäßverletzungen, 94
- Giermoment-Regelung, 286
- Gleit- und Stopper-Einrichtungen, 230
- Global NCAP, 339
- Globale Technische Regelungen, 320, 332
- Gurt- und Airbag-System, 222
- Gurtanlegequote, 183, 232, 343
- Gurt-Bag, 199
- Gurtband, 198
- Gurt-Höhenverstellung, 216
- Gurtkraftbegrenzer, 195
- Gurtkraft-Sensor, 279
- Gurtschloss, 197
- Gurtstraffer, 191
- Gurtsystem, 183
- Gurtsystem am Sitz, 216
- Gurttrage-Warnsystem, 343, 346
- Gurtverletzungen, 184
- H**
- Hals- und Lenden-Wirbelsäule, 374
- Halsnerven, 63
- Halswirbel-Distorsion, 73
- Halswirbelsäule (HWS), 60, 140
- Halteinrichtung, 236
- Hämothorax, 81
- Hand-Kontaktkraft, 148
- Handschuhe, 229
- Hardware-Architektur, 404
- Harnblase, 88
- Haupt-Blutgefäße, 85
- Haupttypen von Organen, 85
- Heckaufprall-Versuch, 362
- Heckkollision, 343
- Heck-Unterfahrschutz, 245
- herstellerspezifische Anforderung, 440
- Herz, 76
- Herzkontusion, 82
- Highway Loss Data Institute (HLDI), 18, 333
- Hirn- und Rückenmarkhaut, 56
- Hochgeschwindigkeitsfilmtechnik, 388
- Hochgeschwindigkeitsvideokamera, 388
- Höhenversteller, 197
- H-point manikin, 376
- Hüftknochen, 90
- Hüftverrenkung, 94
- I**
- implizites Verfahren, 398
- InCrash-Phase, 157
- In-depth-Untersuchung, 16
- Index für die aktive Sicherheit, 313
- Index für die passive Sicherheit, 313
- indirekte Beanspruchung, 104
- innere Sicherheit, 159
- innerorts, 30
- Innovation, 454
- Insassenbelastung, 162
- Insassen-Erkennungssystem, 280
- Insassenmodell, 396
- Insassenschutz, 25, 158
- bei Seitenkollisionen, 222
- in Nutzfahrzeuge, 233
- Insassenschutz-System, 159, 163, 215
- Insassensimulation, 399, 407, 411, 412
- Insassen-Simulationsmodell, 394
- Instrumentierung, 374
- Integral- oder Vollschutz-Helme, 226
- integrale Sicherheit, 303, 306
- integraler Sicherheitsgedanke, 305
- Integration aktiver und passiver Sicherheitssysteme, 305
- integrierter Sensor, 384
- integriertes Kindersitzsystem, 189
- Integritätslevel für die Zuverlässigkeit, 296
- interner Sensor, 290
- intra-abdominelle Verletzungen, 144
- ISOFIX-System, 189, 234
- isolierte Beckenverletzung, 93
- ISS-Verfahren, 110
- J**
- Jet-Helm, 226
- K**
- Karosserie, 179
- Kinder-Dummy-Serie, 378
- Kinderkopf-Impaktor, 345
- Kinder-Rückhaltesystem, 131, 186, 342, 345
- Kindersitz-Transpondern, 277
- kinematische Betrachtungen, 20

- kinetische Energie, 160  
Klassifizierung der Verletzungen, 63  
Knie-Airbag, 206  
Kniefänger, 222  
Kollisionsart, 32, 232  
Kollisionsarten-Matrix, 32  
Kollisionskontrahent, 32  
Kollisionsmechanik, 163  
Kollisionsobjekt, 21, 25, 40  
Kollisionstyp, 37  
kommerzielles Programmsystem, 406  
Kompatibilität, 25, 164  
Kompatibilitätsversuch, 347  
Kompatibilitäts-Zone, 182  
Komponenten, 210  
Komponenten von Gurtsystemen, 190  
Komponentenprüfung, 445  
Komponententest, 412  
Komponentenversuch, 368, 447  
Kompression der Brust, 132  
Konfliktsituation, 32  
Konformitätsprüfung, 442  
Konstruktionsabteilung, 445  
Konstruktions-FMEA, 442  
Kontaktstelle für Kopf und Brust, 234  
Kontrahentenschutz, 158, 171, 180, 237, 242  
Konzeptphase, 393  
Konzepttauglichkeit, 455  
Kopf, 374  
Kopfhaut, 55  
Kopf-Schutzkriterium, 127  
Kopfstützen, 217  
Kopfverletzungen, 57  
Kopplung, 403  
Körperschall-Sensor, 270  
Kraftmessung, 383  
Kraftrechnung, 20  
Kraftstofftank, 183, 252  
Kreuzbein, 91  
kritische Struktur, 239  
kritischer Beckendrehwinkel, 146  
Kugelsensor, 191, 259  
künftige Vorschriften zur passiven Sicherheit, 330
- L**  
Lage-Anomalie, 89  
Lastenheft, 440  
laterale Belastung, 73  
laterale Beugung, 73  
Lazeration  
    des Herzmuskelgewebes, 82  
    des Zwerchfells, 84  
lebender Mensch, 118  
lebender menschlicher Körper, 115  
Leber, 87  
Leiche, 119  
Leichenteil, 120  
Leichtbau-Fahrzeug, 171  
Lenkeinrichtung, 220  
Letalitätsrate, 109  
Linienorganisation, 435  
Lunge, 75  
Luxation, 104
- M**  
Machbarkeitsnachweis, 441  
Markenstrategie, 436  
Marktreife, 452  
Massenaggressivität, 164, 170  
Massenklassen, 187  
Maßnahmen zum Schutz äußerer  
    Verkehrsteilnehmer, 239  
Material für den Luftsack, 212  
Materialeigenschaft, 400  
Matrix-Struktur, 434  
mechanischer Sensor, 258  
mechanisches System, 292  
Mehrkörper-System, 395  
MEMS-Sensoren, 271  
menschenähnliches FEM-Modell, 422  
menschliches Fehlverhalten, 23  
messbare Daten, 19  
Messdaten-Erfassung, 384  
Messdaten-Verarbeitung, 384  
Messkette, 382  
Messtechnik, 381, 445  
Messwert-Geber, 382  
Mikrokontroller, 290  
mikromechanischer Sensor, 266  
mikromechanisches Sensor-Element, 268  
Milz, 87  
Mittelfellraum, 75  
MKS-Formulierung, 394  
Modell-Entwicklung, 413  
Modifier, 343  
Modulation, 385  
Mortalitätsrate, 166

- Motivation, 247
- Motorrad
- Airbags, 230
  - fahrer, 249
  - Helme, 226
  - Stiefel, 229
- Motor-Schleppmoment-Regelung, 284
- multiple Frakturen, 93
- multiple Verletzungen, 110
- N**
- nach dem Unfall, 307
  - Nackenschutz, 228
  - National Automotive Sampling System (NASS), 17
  - Nebenbedingung, 426
  - Neck-Pro-Kopfstütze, 219
  - New Car Assessment Program, 339
  - Nieren, 87
  - normales Fahren, 306
  - normierter Belastungswert, 348
  - Notausstieg, 233
  - Notbrems-Assistent, 284
  - Not-Bremssystem, 346
  - numerische Simulation, 450
  - numerische Verarbeitung, 388
  - Nutzfahrzeugbeteiligung, 232
- O**
- obere Extremitäten, 148
  - Oberschenkel, 92
  - offene oder geschlossene Frakturen, 104
  - optimale Lösung, 452
  - optisches Insassen-Erkennungssystem, 280
  - Orientierung des Beckens, 91
  - örtliche Verletzung, 58
  - Out-of-Position-(OoP-)Situation, 177
- P**
- „Partner“-Schutz, 158
  - passive Gurtsysteme, 185
  - passive Sicherheit, 1, 6
  - passives Rückhaltesystem, 340
  - passives System, 200
  - Pfahl-Aufprallversuch, 342
  - Phasen des Unfallablaufes, 18
  - Phasengang, 386
  - physikalische Modelle, 115
  - piezoelektrischer Sensor, 265
- Plausibilität, 426
- Pneumothorax, 81
- PostCrash-Phase, 157
- PreCrash
- Phase, 157
  - Sensor, 280
  - Sensorik, 215
- primäre Sicherheit, 5
- Prinzip der Selbsteinschätzung, 318
- Prinziptauglichkeit, 455
- Produktentstehungsprozess, 434
- Produkthaftung, 439
- Produktqualität, 436, 440
- Produktreifegrad, 441
- Prognosefähigkeit, 450
- Programmkopplung, 404
- Protektor, 229
- Prototyp, 443, 448
- Prozess-FMEA, 442
- Prozessziele, 434
- Prüfverfahren zum Fußgängerschutz, 327
- Q**
- Qualitätskriterien, 436
  - Qualitätssicherung, 440
  - Quantifizierung der passiven Sicherheit, 347
  - Quantifizierung der Straßenverkehrssicherheit, 311
- Quecksilber-Safing-Sensor, 261
- R**
- rampenförmig ausgebildete Sitzwanne, 217
  - Rangreihe, 34
  - Rating-Anforderung, 439
  - Reboard-Rückhaltesystem, 188
  - rechnerische Optimierung, 426
  - rechnerische Simulation, 214, 444
  - Region der Halswirbelsäule, 62
  - Reifegrad, 452
  - Rekonstruktion, 456
  - Relativgeschwindigkeit, 164
  - Relativverschiebungen zwischen Gehirn und Hirnschädel, 137
  - Relevanz, 357
  - Relevanzfaktor, 347
  - Reparatur-Crash, 354
  - Reparaturfreundlichkeit, 362
  - Reparaturkosten, 182
  - Reparaturtechnik, 158

- Repräsentativität, 357  
Reproduzierbarkeit, 357, 374  
Restitutionskoeffizient, 162, 164  
Retraktor, 190  
Rettungswesen, 250  
reversibles Sicherheitsgurtsystem, 194  
Richtlinie, 316  
Ride-Down-Effekt, 174  
Rippenfrakturen, 79  
Risiko, 2  
Risikoanalyse, 441  
Risikofunktion, 347  
Robustheitsanalyse, 427  
Rohrgenerator, 210  
Rollmassen-Sensor, 260  
Rotation des Kopf/Hals-Bereichs, 70  
Rotations- oder Kugelstraffer, 194  
rotatorische Beanspruchung des Kopfes, 137  
Rückhaltesystem, 162, 173  
Rückwärtsrechnung, 20  
Rundgenerator, 210
- S**
- Sachschäden, 351, 354  
Safe-by-Wire Plus, 300  
Safing-μC, 290, 295  
Safing-IC, 296  
Safing-Sensor, 292, 293  
Safing-Sensor mit Reed-Kontakt, 262  
Schädel, 56  
Schädelfrakturen, 58  
Schaden, 2  
Schambein, 90  
Schlag gegen den hinteren Hals, 73  
Schlittenanlage für Seitenkollisionen, 366  
Schlittenversuche, 363  
Schloss-Straffer, 192  
Schlosszunge, 197  
Schutz von Zweirad-Fahrern, 246  
Schutzeinrichtung, 248  
Schutzkleidung, 228  
Schutzkriterien, 117, 124, 136, 340, 374  
Schutzkriterien-Level, 117, 124, 340  
    für den Hals, 129  
    für den Kopf, 125  
    für die Brust, 130  
Schutzkriterium  
    für den Becken-/Bauchbereich, 133  
    für die Extremitäten, 134
- Schutzkriterium HIP, 139  
Schutzplanke, 248  
Schutzprinzip, 160  
Secondary Safety Rating System for Cars, 334  
Seiten-Airbags, 205  
Seitenaufprallversuch, 342, 360  
Seitenkollision, 88, 162, 179, 379  
Seitenschutz-Maßnahme, 26  
Seiten-Sensor, 273  
seitlicher Unterfahrschutz, 244  
sekundäre Sicherheit, 5  
Selbstschutz, 25, 158, 171  
    -Maßnahme, 178  
    -Zone, 182  
Sensierung und Diagnose, 257  
Sensorik, 193  
sequentielle Kopplung, 404  
sequenzielle Abarbeitung, 434  
Serienentwicklung, 393, 456  
Serientauglichkeit, 455  
Sicherheit, 3  
Sicherheit äußerer, ungeschützter  
    Verkehrsteilnehmer, 171  
Sicherheit äußerer, ungeschützter  
    Verkehrsteilnehmern, 328  
Sicherheitsanforderung, 291, 436  
Sicherheitsauslegung, 13  
Sicherheitsausstattung, 232  
Sicherheitsgrad, 348  
Sicherheitsgurt, 88, 234  
Sicherheitsindex, 34, 347  
Sicherheitsintegritätslevel, 297  
Sicherheitskennzahl, 5  
Sicherheitskriterien-System, 347  
Sicherheitsmaßnahme, 157  
Sicherheitsstandard, 26, 437  
Sicherheitsvorschrift, 124  
Sicherheitszahl, 167  
Sicherung der Unfallstelle, 251  
Simplifizierung, 373  
Simulation  
    mit Modellen des menschlichen Körpers,  
        422  
    von Frontalkollisionen, 365  
    von Fußgängerunfällen, 418  
    von Motorrad-Kollisionen, 420  
Simulationsdaten-Management, 427  
Simulationsgüte, 358, 373  
simultane Entwicklung, 443

- simultane Kopplung, 404  
Sitzbein, 90  
Sitzeinrichtung, 216  
sitzflächen-integriertes Erkennungssystem, 278  
sitzintegriertes Gurtssystem, 216  
Sitzplatz-Erkennungssensorik, 189  
Sitzsteifigkeit, 216  
sitzstruktur-integriertes Erkennungssystem, 279  
Sitzunterbau, 216  
Smart Restraint System, 26, 196, 214  
sonstiger Unfall, 30  
Spannung, 289  
Speicherung, 386  
Speicherung von Ereignisdaten, 291  
Speiseröhre, 85  
spezifische Unfall-Leistung SPUL, 22, 122, 165  
Sportler, Artisten und Tänzer, 119  
Standardisierung, 453  
statistische Biomechanik, 121, 144, 347  
Statistisches Bundesamt, 14  
Steifigkeit, 160, 162  
Steifigkeitsaggressivität, 164  
Steißbein, 91  
Sterbewahrscheinlichkeitsklassifizierung PODS, 110  
Stoßantrieb S, 22  
Stoßrechnung, 20  
Stoßvorgang, 162  
Stoßzahl, 162  
Straßenrandentschärfung, 248  
Straßenverkehrsbeteiligung, 28  
Straßenverkehrsunfall, 456  
Straßenverkehrs-Zulassungsordnung, 316  
Strukturberechnung, 408  
Strukturierung des Unfallgeschehens, 27  
Struktursimulation, 411  
Struktursteifigkeit, 170  
Submarining, 143  
Submarining-Effekt, 144, 184, 216  
Submarining-Verletzung, 89  
Submodell-Technik, 415  
Synchronisation, 388  
System-FMEA, 442  
Systemintegration, 303
- T  
technischer Mangel, 23  
Technologiestufen, 214  
Telemetrie, 385  
Tendenzen, 213  
Test von Frontschutzbügeln, 330  
Test-Grenzwerte, 117, 374  
Testobjekt, 393  
theoretische Modelle, 116  
thermoplastischer Kunststoff, 227  
Thorax, 74, 375  
Thorax-Instabilität, 79  
Tier, 120  
TNO-10-Dummy, 377  
Todesursache, 11  
Toleranzschwelle, 115, 374  
Traktionskontrolle, 283  
Transientenrekorder, 386  
translatorische Beschleunigung, 136  
Traumatisierung des Abdominalbereichs und des Beckens, 142  
Trigger-Sensor, 264, 295  
Türleitschiene, 223
- U**  
Überlebensraum, 159  
Überlebensraum der Fahrgastzelle, 362  
Überprüfung des Gesamtfahrzeugs, 445  
Überroll- oder Rollraten-Sensoren, 271  
Überrollbügel, 224, 233  
Überroll-Sensor, 261  
Überschreitenunfall, 30  
Übertragung, 384  
Unfall, 2  
Unfall durch ruhenden Verkehr, 30  
Unfall im Längsverkehr, 30  
Unfall- und Verletzungsmechanik, 27  
Unfallanalyse, 8, 22, 23  
Unfallart, 28  
Unfalldaten, 14, 166  
Unfalldatenerhebung, 14  
Unfalldatenerhebung und -statistik, 8  
Unfallfolgen, 23  
unfallfolgenmindernde Maßnahme, 5  
Unfallfolgenminderung, 5, 158  
Unfallfolgenschwere, 21  
Unfallforschung, 8, 458  
Unfallkenngroße, 165  
Unfallmaterial, 14  
Unfallprophylaxe, 5  
Unfallrekonstruktion, 8, 18, 19, 397, 407  
Unfall-Rettungsmaßnahme, 248  
Unfallschwere, 21, 108, 168, 381

- Unfallstatistik, 14  
Unfalltyp, 29  
unfallvermeidende Maßnahme, 5  
Unfallvermeidung, 14, 307  
untere Extremitäten, 99, 148, 376  
Up-Front-Sensoren, 273  
US-NCAP, 339
- V**  
Validierung, 402, 447  
Validierungsphase, 449  
Verbindungstechnik, 411  
Verbund-Sicherheitsglas, 224  
Verkehrsmittel, 4  
Verkehrssicherheit, 305  
Verkehrsteilnehmer, 4  
Verkehrsunfall, 11, 14  
Verkehrswege, 4  
Verlässlichkeit, 410  
Verletzung  
    am Hüftgelenk, 94  
    der Aorta und der Hauptblutgefäße, 82  
    der Bänder, 104  
    der Nerven, 105  
    der unteren Extremitäten, 105  
    des Herzens, 81  
    des Oberschenkelhalses, 95  
    des Steißbeins, 94  
    des Thorax, 78  
Verletzungsart, 48  
Verletzungsentstehung, 53  
Verletzungsfolgekosten, 28, 111, 160, 313, 351  
Verletzungsfolgekosten je  
    MAIS-Verletzungsklasse, 112  
Verletzungskosten, 34  
Verletzungskriterien-Level, 114  
Verletzungskriterium, 114  
Verletzungsmechanik, 53, 64, 78, 86  
Verletzungsmechanik der unteren Extremitäten,  
    102  
Verletzungsmechanik des Beckens, 93  
Verletzungsmechanismen, 95  
Verletzungspotential, 170  
Verletzungsreduzierung, 14  
Verletzungsrisiko, 25, 162, 166, 168, 180, 237  
Verletzungsschwere, 106  
Verletzungsschwere der unteren Extremitäten,  
    106  
Verletzungsschweregrad, 107  
Verletzungstyp, 48
- Verordnung, 316  
Versicherungsschutz, 248  
Versuch, 445  
Versuchsabsicherung, 444  
Versuchsart, 358  
Versuchsmuster, 452  
versuchstechnische Absicherung, 449  
Verzögerung, 162  
Verzögerungsschlitten, 366  
Vierschicht-Verbundglasscheibe, 224  
virtueller Prototyp, 442  
Viskositätskriterium VC, 132  
 $\Delta v$ -Nachteil, 171  
volkswirtschaftliche Verletzungsfolgekosten, 6  
vor dem Unfall, 307  
Vorhersagegüte, 410  
Vorhersage-Modell für Becken- und  
    Abdominalverletzungen, 145  
Vorschriften, 316  
Vorschriften in den USA, 318  
Vorwärtsbewegung des Kopfes, 64  
Vorwärtsrechnung, 20
- W**  
während des Unfalls, 307  
Wegmessung, 384  
Weichteil-Verletzungen, 74  
weitere Anwendungsgebiete, 208  
Weltfahrzeug, 437  
Windschutzscheibe, 223  
Winkelmessung, 384  
Wirbelsäule, 60  
Wirkrichtung von Schutzmaßnahmen, 159  
Wirksamkeit, 357, 358  
Wirkung des Gurtsystems, 184  
Wirkungsweise, 201
- X**  
X-by-Wire-System, 305
- Z**  
Zeitmultiplex-Verfahren, 385  
zentrale Ablaufsteuerung, 388  
Zertifizierung, 442, 449, 452  
Zielfunktion, 426  
Zielkonflikt, 436  
Zündstufen, 290  
Zweiradfahrer, 226  
Zwerchfell, 84, 88  
Zwölffingerdarm, 87