

Florian Kramer

**Passive Sicherheit
von Kraftfahrzeugen**

Aus dem Programm

Kraftfahrzeugtechnik

Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion

von H. Appel, G. Krabbel und D. Vetter

Handbuch Verbrennungsmotor

herausgegeben von R. van Basshuysen und F. Schäfer

Lexikon Motorentechnik

herausgegeben von R. van Basshuysen und F. Schäfer

Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik

herausgegeben von H.-H. Braess und U. Seiffert

Bremsenhandbuch

herausgegeben von B. Breuer und K. H. Bill

Verbrennungsmotoren

von E. Köhler

Automotive Software Engineering

von J. Schäuffele und T. Zurawka

Motorradtechnik

von J. Stoffregen

Motorkolben

von S. Zima

Die BOSCH-Fachbuchreihe

- **Ottomotor-Management**
- **Dieselmotor-Management**
- **Autoelektrik/Autoelektronik**
- **Sicherheits- und Komfortsysteme**
- **Fachwörterbuch Kraftfahrzeugtechnik**
- **Kraftfahrtechnisches Taschenbuch**

herausgegeben von ROBERT BOSCH GmbH

Florian Kramer

Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen

**Biomechanik – Simulation –
Sicherheit im Entwicklungsprozess**

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 346 Abbildungen und 32 Tabellen

ATZ/MTZ-Fachbuch



Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Mitarbeiter:

Dipl.-Math. Dipl.-Ing. (BA) Ulrich Franz, DYNAmore GmbH, Stuttgart
Dipl.-Ing. Thomas Görnig, Conti Temic microelectronic GmbH, Ingolstadt
Dipl.-Ing. Bernd Lorenz, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch-Gladbach
Dr.-Ing. Rodolfo Schöneburg, DaimlerChrysler AG, Mercedes Car Group, Sindelfingen

1. Auflage 1998
2., überarbeitete und erweiterte Auflage Mai 2006

Alle Rechte vorbehalten

© Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006

Lektorat: Reinhard Dapper / Ewald Schmitt

Der Vieweg Verlag ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media.
www.vieweg.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, www.CorporateDesignGroup.de

Technische Redaktion: Andreas Meißner, Wiesbaden

Druck und buchbinderische Verarbeitung: Wilhelm & Adam, Heusenstamm

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN-10 3-8348-0113-5

ISBN-13 978-3-8348-0113-5

Vorwort zur zweiten Auflage

Gemäß dem im Jahre 2004 erschienenen Bericht der World Health Organization (WHO) werden jeden Tag mehr als 140.000 Menschen im Strassenverkehr verletzt, 3.000 getötet und 15.000 bleibend invalidisiert. Neben den Maßnahmen, die beim Menschen ansetzen, kann die Kenntnis der passiven Fahrzeugsicherheit einen wichtigen Beitrag zur Reduktion der Unfallfolgen leisten. Den Hintergrund dafür bildet ein grosses Netz von verschiedenen Disziplinen – Unfallforschung, Unfallmechanik und –analyse, Verletzungs-Biomechanik, Sensortechnik, Karosserie und Deformationsstruktur, Insassenschutz-Systeme, experimentelle und rechnerische Simulation sowie entsprechende Bewertungen und Gesetzgebung. Florian Kramer ist einer der Wenigen, die sowohl über vertiefte Kenntnisse für eine Gesamtschau verfügen, wie auch mehrere der oben genannten Disziplinen in dem hohen Masse beherrschen, das für die Entwicklung von neuen Systemen erforderlich ist.

Schon die erste Auflage von 1998 ist fachübergreifend im Bereich der Fahrzeugsicherheit zu einem Standardwerk geworden; die neue Auflage enthält nicht nur zahlreiche Updates in bereits damals behandelten Themenkreisen und der Fachliteratur, sondern auch ein hochaktuelles Kapitel über Sensorik zur Unfalldetektion, sowie einen interessanten Beitrag aus der Sicht der Automobilindustrie zur Sicherheit im Fahrzeug-Entwicklungsprozess.

Das Buch ist sowohl für den Einsteiger in die Thematik der Fahrzeugsicherheit eine unverzichtbare Hilfe, wie auch für den Erfahrenen, der „alles schon weiss“, aber sich doch noch einmal einen besseren aktuellen Einblick in bestimmte Fachgebiete verschaffen will.

Zürich, Februar 2006

Felix Walz
Arbeitsgruppe für Unfallmechanik
Professor für Rechtsmedizin
Speziell forensische Biomechanik
an Universität und ETH Zürich

Danksagung

Es ist mir eine besondere Ehre und ein überaus freudiger Anlass, zunächst meinen Dank abzustatten an die Kollegen, die ich als Mitarbeiter für das vorliegende Werk gewinnen konnte und die neben ihrer täglichen Arbeitsbelastung spontan ihre Unterstützung zugesagt haben. Es sind dies die Herren (in der Reihenfolge der Kapitel)

- **Prof. Dr. med. Felix Walz** von der Arbeitsgruppe für Unfallmechanik, Professor für Rechtsmedizin, speziell für forensische Biomechanik an der Universität und ETH Zürich: Er schrieb freundlicherweise das Vorwort, las das Kapitel „Biomechanik“ und gab mir wertvolle Hinweise auf neuere Erkenntnisse zu HWS-Verletzungen und zur aktuellen AIS-Skalierung.
- **Dipl.-Ing. Thomas Görnig**, Leiter für Strategische Projekte bei der Conti Temic microeletronic GmbH in Ingolstadt. Er steuerte das (zugegebenermaßen für Fahrzeugingenieure schwierige) neue Kapitel „Sensorik zur Unfalldetektierung“ bei, ohne das ein Buch zur passiven Sicherheit heute nicht mehr auskommt.
- **Dipl.-Ing. Bernd Lorenz**, stellvertretender 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 gesetzlichen Anforderungen und zur Sicherheitsbewertung auf Basis experimenteller Untersuchungen.
- **Dipl.-Math. Dipl.-Ing. (BA) Ulrich Franz**, Geschäftsführer der DYNAmore GmbH in Stuttgart. Er überarbeitete vollständig das Kapitel „Rechnerische Simulation“ und brachte es so auf einen, seit der ersten Auflage vor mehr als sieben Jahre dringend erforderlichen, aktuellen Stand.
- **Dr.-Ing. Rodolfo Schöneburg**, Leiter Sicherheit / Fahrzeugfunktionen der Mercedes Car Group in Sindelfingen, der seinerseits unterstützt wurde durch die Herren Binder, Bürkle, Fehring, Dr. Kolling, 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 die Herren cand. ing. Christoph Köhler, cand. ing. Mirco Petzold und cand. ing. Burkhard Müller während ihrer Beschäftigung als Studentische Mitarbeiter bei SAFE im Rahmen ihres Praktikums geleistet haben: Sie kümmerten sich um Literatur-Recherchen, die Beschaffung der Literatur, die Digitalisierung von Abbildungen und erarbeiteten gelungene Textvorlagen. In unermüdlicher Weise waren sie damit beschäftigt, den zeitgerechten Eingang der einzelnen Beiträge zu kontrollieren, 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, und zwar nicht nur für die uneingeschränkte Mitarbeit, sondern auch und vor allem für ihre Unterstützung und ihre Zeit, die besonders in den letzten Wochen geprägt war durch Diskussionen, Abstimmungen und schließlich das erlösende „ok“ zur Freigabe des jeweiligen Beitrags.

Das nunmehr vorliegende Buch hätte nicht entstehen können ohne die wohlwollende Zustimmung durch die Herren Prof. Dr.-Ing. Hannes Neumann, Rektor der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden, und Prof. Dr.-Ing. Norbert Brückner, Leiter des Studiengangs „Fahrzeugtechnik“ an der HTW Dresden, bei denen ich mich dafür, aber auch für die moralische und sachliche Unterstützung sehr herzlich bedanke. In diesem Zusammenhang darf Herr Dipl.-Ing. Lutz Leithold nicht fehlen, der mich im vergangenen Wintersemester bei meinen Lehrverpflichtungen, bei der Betreuung von Studienleistungen und Diplomarbeiten sowie bei der Vor-Korrektur von Prüfungsleistungen und Klausuren unterstützt und damit erheblich entlastet hat. Auch ihm gilt mein herzliches Dankeschön.

Im Verlauf der Entstehung des Buches durfte ich die vielfältige Unterstützung durch freundschaftlich verbundene und interessierte Kollegen erfahren, die aufzuzählen den Rahmen dieser Danksagung bei Weitem sprengen würde – auch auf die Gefahr hin, dass ich dadurch Verstimmungen hervorrufe, für die ich mich aber sogleich entschuldige, werde ich dies bis auf zwei Ausnahmen unterlassen: Genannt sei an dieser Stelle Herr Dr.-Ing. Heinz Burg, dem ich für die Hinweise auf Literatur, die Überlassung von Abbildungen und die Korrektur zur Unfallrekonstruktion danke. Und gleichermaßen bedanke ich mich bei meinem Sohn und mehrjährigen Mitarbeiter bei SAFE, Herrn Dipl.-Päd. (Univ.) M.A. Michael Kramer, der letztendlich den Anstoß zum Start des nunmehr abgeschlossenen Vorhabens und mir zugleich Ansporn gab. Er stand in der schwierigen Zeit in freundschaftlicher und kollegialer Weise stets für hilfreiche Diskussionen und Hinweise zur Verfügung.

Mein tief empfundener Dank gilt aber 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 beim Vieweg-Verlag in Wiesbaden, für die Abstimmungsgespräche, vor allem aber für seinen Gleichmut, mit dem er den Eingang des Buch-Manuskripts geduldig abgewartet hat. Ihm und seinen Mitarbeitern gilt zudem mein Dank für das Korrekturlesen und die Aufbereitung des Skripts sowie für die Herstellung und die Vermarktung des Buches zur passiven Sicherheit von Kraftfahrzeugen.

Dresden, im März 2006

Florian Kramer

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur zweiten Auflage	V
Danksagung	VI
1 Die passive Sicherheit	1
1.1 Sicherheitswissenschaftliche Grundbegriffe	1
1.2 Die passive Fahrzeug-Sicherheit als Teilgebiet der Straßenverkehrssicherheit	2
Literaturnachweis zu Kapitel 1	7
2 Unfallforschung	9
2.1 Unfalldatenerhebung und -statistik	11
2.1.1 Zielsetzung der Unfallstatistik	12
2.1.2 Polizeilich erhobene Unfalldaten	12
2.1.3 In depth-Untersuchungen	13
2.2 Unfallmechanik und -rekonstruktion	15
2.2.1 Rekonstruktion von Unfällen	16
2.2.2 Unfallschwere	18
2.3 Unfallanalyse	19
2.3.1 Aufklärung der Unfallursachen	20
2.3.2 Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen	21
2.4 Strukturierung des Unfallgeschehens	23
2.4.1 Unfallart	24
2.4.2 Unfalltyp	26
2.4.3 Kollisionsart	28
2.4.4 Kollisionstyp	32
2.4.5 Aufprallart	37
2.4.6 Aufpralltyp	39
2.4.7 Belastungsart und Belastungstyp	41
2.4.8 Verletzungsart und Verletzungstyp	45
Literaturnachweis zu Kapitel 2	47
3 Biomechanik	49
3.1 Anatomie des menschlichen Körpers und Verletzungsmechanismen	49
3.1.1 Der Kopf	50
3.1.2 Die Wirbelsäule	55
3.1.3 Der Thorax	67

3.1.4	Das Abdomen und das Becken	75
3.1.5	Die Extremitäten.....	84
3.2	Verletzungsschwere und deren Monetarisierung.....	94
3.2.1	Verletzungsschweregrad.....	95
3.2.2	Verletzungsskalierung nach AIS	96
3.2.3	Andere Verletzungsskalierungen	97
3.2.4	Monetäre Bewertung der Verletzungsschwere.....	99
3.3	Verletzungs- und Schutzkriterien	101
3.3.1	Definitionen	102
3.3.2	Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von Schutzkriterien.....	105
3.3.3	Gesetzlich festgelegte Schutzkriterien.....	111
3.3.4	Schutzkriterien in der Diskussion	122
	Literaturnachweis zu Kapitel 3	134

4	Sicherheitsmaßnahmen	143
4.1	Zielsetzung und Definitionen	143
4.1.1	Selbst- und Kontrahentenschutz.....	144
4.1.2	Wirkrichtung der Schutzmaßnahmen.....	145
4.2	Schutzprinzipien	145
4.2.1	Energetische Betrachtung.....	145
4.2.2	Wechselwirkung zwischen Frontal- und Seitenkollision	148
4.2.3	Kompatibilität.....	148
4.2.4	Prinzip des Geschwindigkeitsangleichs.....	157
4.2.5	Ride Down-Effekt	160
4.2.6	Out of Position-Situation	162
4.3	Maßnahmen zum Selbstschutz	164
4.3.1	Karosserie und Deformationsstruktur	164
4.3.2	Gurtsysteme und -komponenten.....	170
4.3.3	Airbag-Systeme und -Komponenten.....	185
4.3.4	Insassenschutz-Systeme	200
4.3.5	Selbstschutzmaßnahmen für Zweirad-Fahrer	212
4.3.6	Selbstschutzmaßnahmen für Nutzfahrzeuge.....	217
4.4	Maßnahmen zum Kontrahentenschutz	223
4.4.1	Maßnahmen am PKW zum Schutz äußerer Verkehrsteilnehmer.....	223
4.4.2	Maßnahmen am NFZ zum Schutz von PKW-Insassen und äußeren Verkehrsteilnehmern	228
4.5	Nachkollisionäre und sonstige Sicherheitsmaßnahmen	233
	Literaturnachweis zu Kapitel 4:	240

5	Sensorik zur Unfalldetektierung.....	243
5.1	Entwicklung der Sensorik.....	244
5.1.1	Mechanische Sensoren.....	244
5.1.2	Elektromechanische Sensoren	245
5.1.3	Elektronische Sensoren	250

5.2	Seiten-Sensoren.....	258
5.2.1	Beschleunigungssensoren.....	259
5.2.2	Druck-Sensor	259
5.3	Up Front Sensor	260
5.4	Systeme zur Insassen-Erkennung	261
5.4.1	Kindersitz-Erkennung.....	262
5.4.2	Sitzgebundene Systeme	263
5.4.3	Optische Systeme	265
5.4.4	Übersicht zu Insassen-Erkennungssystemen.....	265
5.5	PreCrash-Sensorik.....	266
5.6	Airbag-Elektronik.....	268
5.6.1	Spannungsversorgung und Energiereserve	270
5.6.2	Sensoren sowie Steuerungs- und Überwachungseinheiten.....	270
5.6.3	Zündungseinrichtung.....	270
5.6.4	Speicherung von Ereignisdaten	271
5.7	Sicherheitsanforderungen an die Airbag-Elektronik.....	271
5.7.1	Mechanische Systeme.....	272
5.7.2	Elektromechanische Systeme.....	272
5.7.3	Elektronische Systeme.....	273
5.7.4	Integritätslevel für die Zuverlässigkeit.....	277
5.8	Datenübertragung	278
5.8.1	Bus-Systeme	280
5.8.2	Bus-fähige Anzünder.....	283
5.9	Systemintegration hinsichtlich aktiver und passiver Sicherheit	284
	Literaturnachweis zu Kapitel 5	285

6	Überprüfung und Bewertung der Sicherheit.....	286
6.1	Quantifizierung der Straßenverkehrssicherheit.....	286
6.2	Gesetzgebung	290
6.2.1	Vorschriften in Deutschland und in Europa	290
6.2.2	Vorschriften in den USA und anderen Staaten.....	292
6.2.3	Zusammenfassung der Vorschriften in verschiedenen Ländern.....	292
6.2.4	Künftige Vorschriften zur passiven Sicherheit	304
6.3	Bewertung auf der Basis der Unfallstatistik.....	306
6.3.1	Highway Loss Data Institute Report.....	306
6.3.2	FOLKSAM Report	307
6.3.3	Secondary Safety Rating System for Cars	307
6.4	Bewertung auf der Basis von experimentellen Untersuchungen	307
6.4.1	ADAC-Testverfahren zur passiven Sicherheit von PKW	310
6.4.2	Bewertung nach „auto motor und sport“ (ams-Test).....	311
6.4.3	Crash Worthiness Rating System for Cars (CWRSC).....	311
6.4.4	New Car Assessment Program (NCAP)	312
6.4.5	Die Quantifizierung der passiver Sicherheit für PKW-Insassen und das Sicherheitskriterien-System SiKriS	317
6.5	Verletzungsfolgekosten und Sachschäden	322
	Literaturnachweis zu Kapitel 6	326

7 Experimentelle Simulation	328
7.1 Versuchsarten	329
7.1.1 Fahrzeugversuche	329
7.1.2 Schlittenversuche	335
7.1.3 Komponentenversuche	338
7.2 Versuchseinrichtungen und -anlagen	341
7.3 Anthropometrische Testpuppen (Dummies)	342
7.3.1 Anforderungen	343
7.3.2 Instrumentierung	344
7.3.3 Verwendete Dummies und ihr Einsatz	346
7.4 Messtechnik	350
7.4.1 Messkette	351
7.4.2 Messwert-Geber	351
7.4.3 Messdaten-Erfassung und -Verarbeitung	353
7.5 Film- und Beleuchtungstechnik	357
Literaturnachweis zu Kapitel 7	360
 8 Rechnerische Simulation	 361
8.1 Geschichte der rechnerischen Simulation	361
8.2 Berechnungsverfahren	363
8.2.1 Mehrkörper-Systeme mit dem Fokus „Insassensicherheit“	363
8.2.2 Mehrkörper-Systeme mit dem Fokus „Unfallrekonstruktion“	364
8.2.3 Finite-Elemente-Methode	365
8.2.4 Kontrollvolumen und Strömungssimulation	368
8.2.5 Gekoppelte Systeme	369
8.2.6 Hardware-Architekturen	372
8.2.7 Kommerzielle Programmsysteme	373
8.3 Berechnungsmodelle	373
8.3.1 Unfallrekonstruktion	374
8.3.2 Strukturberechnung	375
8.3.3 Insassensimulation mit Dummy-Modellen	379
8.3.4 Simulation von Fußgänger- und Zweirad-Kollisionen	383
8.3.5 Simulationen mit Modellen des menschlichen Körpers	387
8.4 Berechnungsbewertung	389
8.5 Rechnerische Optimierung im Bereich der passiven Sicherheit	390
Literaturnachweis zu Kapitel 8	392
 9 Passive Sicherheit im Fahrzeugentwicklungsprozess	 396
9.1 Prozessziele und Entwicklungsorganisation	397
9.2 Der Entwicklungsprozess	397
9.3 Qualität und deren Absicherung	399
9.4 Herausforderungen innerhalb der Projektarbeit	401

9.4.1 Gesetzliche Anforderungen	401
9.4.2 Rating-Anforderungen	404
9.5 Rechnerische Simulation und experimentelle Absicherung im Entwicklungsablauf.....	404
9.5.1 Einsatz der Entwicklungswerkzeuge	405
9.5.2 Absicherung neuer Technologien und Werkstoffe	411
9.5.3 Möglichkeiten und Grenzen.....	412
9.6 Integration der Unfallforschung in den Entwicklungsablauf am Beispiel Mercedes-Benz.....	413
Literaturnachweis zu Kapitel 9.....	417
 Sachwortverzeichnis	 418

1 Die passive 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 er das Produkt $R = W * S$ aus Wahrscheinlichkeit W und Schadenshöhe S zur vergleichenden Gegenüberstellung verschiedener Unfallkonstellationen verwendet. Er bezeichnet das Produkt als „Kompatibilitätskenngröße“, 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 monetarisierter 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 Beinahe-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, unabhängig vom jeweiligen Fachgebiet angewandt werden kann. Er bedarf aber zur Anwendung im Bereich der Kraftfahrzeug-Sicherheit einer gewissen Präzisierung: Unsicherheit und Sicherheit sind komplementäre Begriffe, so dass 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 passive 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 Verkehrs-

sicherheit ist dementsprechend ausgerichtet auf die Verkehrsteilnehmer, die Verkehrsmittel und die Verkehrswege. Einschränkend dazu behandelt die Straßenverkehrssicherheit die Sicherheit des Straßenverkehrs und zielt dabei auf den Menschen, das Fahrzeug und die Umwelt ab (Abbildung 1.1).

Maßnahmen zur Verbesserung der Straßenverkehrssicherheit werden unterschieden in

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

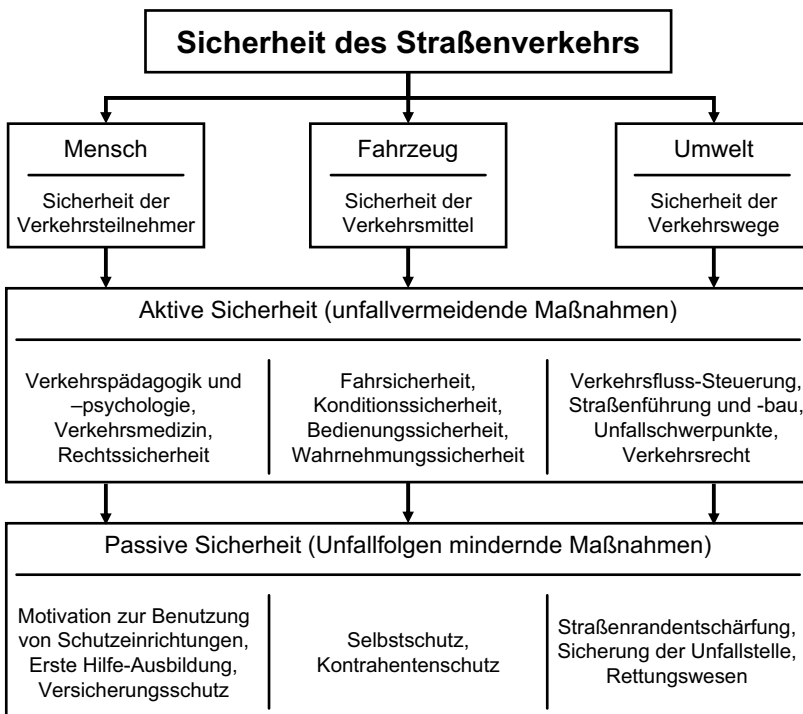


Abb. 1.1: Teilbereiche der Straßenverkehrssicherheit und Beispiele für Sicherheitsmaßnahmen

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 Abbildung 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, aufgrund der Eingeführtheit der Begriffe „aktive“ und „passive“ Sicherheit, diese 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 (Abbildung 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 1980-er Jahre stellt sich eine Stagnation ein, d.h. die Anzahl der Unfälle bleibt trotz zunehmendem Fahrzeugbestand weitgehend konstant.

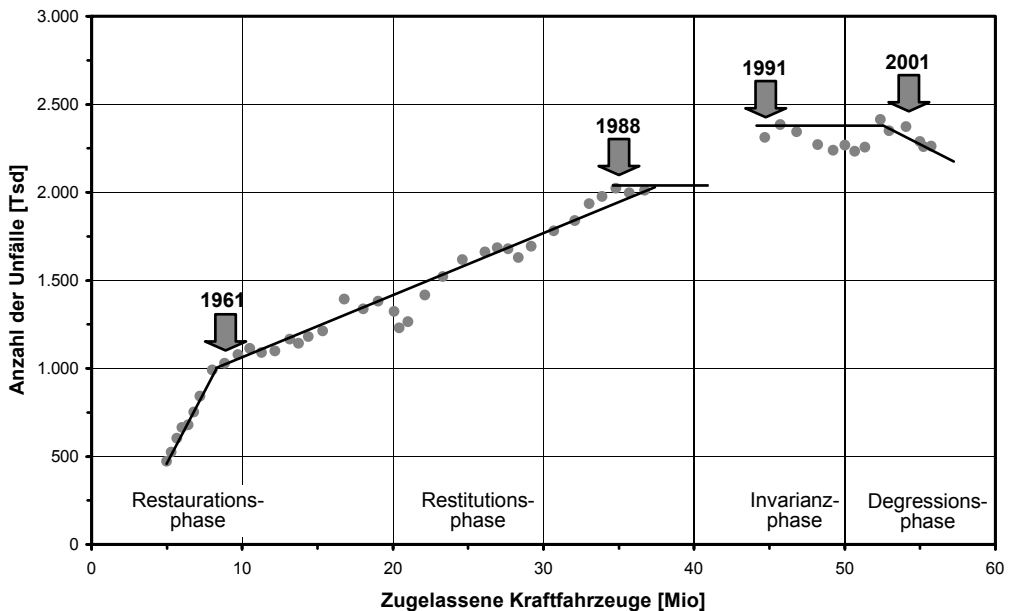


Abb. 1.2: Entwicklung der Unfälle in Abhängigkeit der Zulassungszahlen im Zeitraum 1953 bis 2004

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. Damit lassen sich allerdings die durchaus unterschiedlichen Sicherheitsfortschritte in den einzelnen Bereichen nicht voneinander trennen. Zweitens fehlen bei der Quotientenbildung von Verletzten und Verkehrs- oder Unfallzahlen Hinweise auf absolute Zahlen. Und schließlich sind die Aussagen, allein auf getötete oder schwerverletzte 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 mehr als 50 Jahren der Anteil an den volkswirtschaftlichen Verletzungs-

folgekosten für tödlich Verletzte bei ungefähr 22 %, hingegen für Schwerverletzte bei ca. 51 % 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 Verletzungsfolgekosten (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, so dass hier lediglich das Ergebnis in Form der zeitlichen Entwicklung über einen Zeitraum von mehr als 50 Jahren gezeigt werden soll (Abbildungen 1.3 und 1.4). Für die aktive Sicherheit kann für den Zeitraum von 1953 bis 2004 eine Verdreifachung und für die passive Sicherheit sogar eine Versechsfachung 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 Abbildung 1.4) – keine unmittelbaren, zeitlich eindeutig zuordenbaren Wirkungen zeigen, ist der Anstieg der beiden Kurven zweifellos 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).

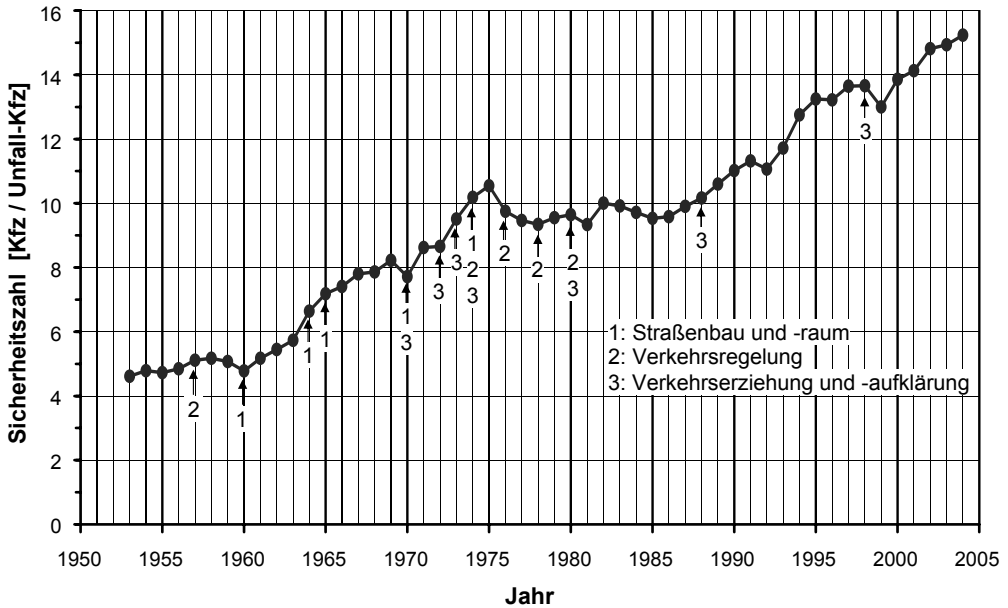


Abb. 1.3: Zeitliche Entwicklung der aktiven Sicherheit im Zeitraum 1953 bis 2004 und Einführung von Maßnahmen zu deren Verbesserung

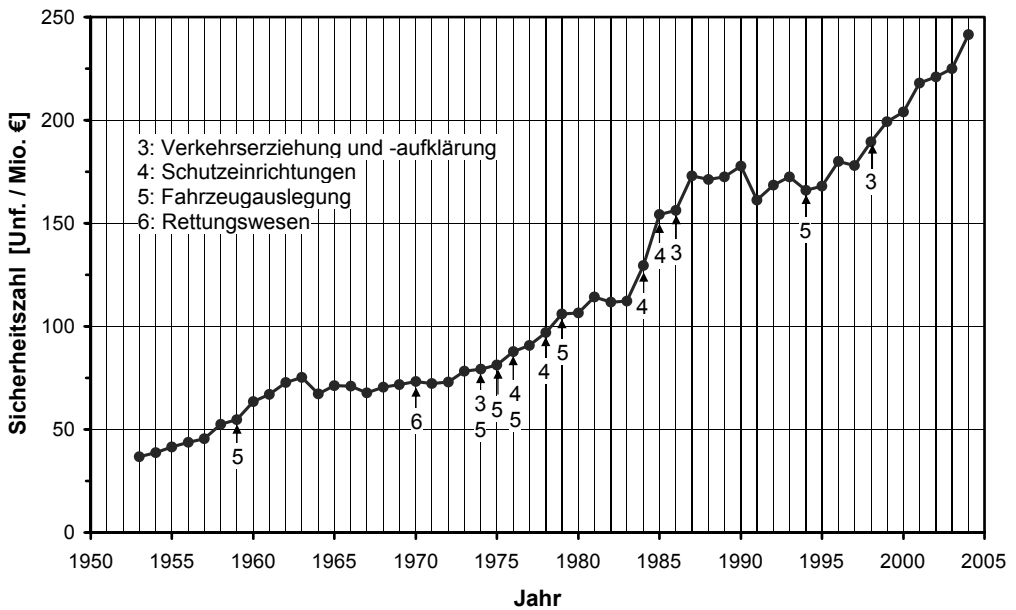


Abb. 1.4: Zeitliche Entwicklung der passiven Sicherheit im Zeitraum 1953 bis 2004 und Einführung von Maßnahmen zu deren Verbesserung

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, so dass beispielsweise durch einen Kostenverminderungsansatz anhand eines Verletzungsvorhersagemodells die jeweilige Sicherheitsmaßnahme bewertet werden kann. Die passive Fahrzeugsicherheit und die damit zusammenhängenden Wirkungsbereiche sind in Abbildung 1.5 dargestellt.

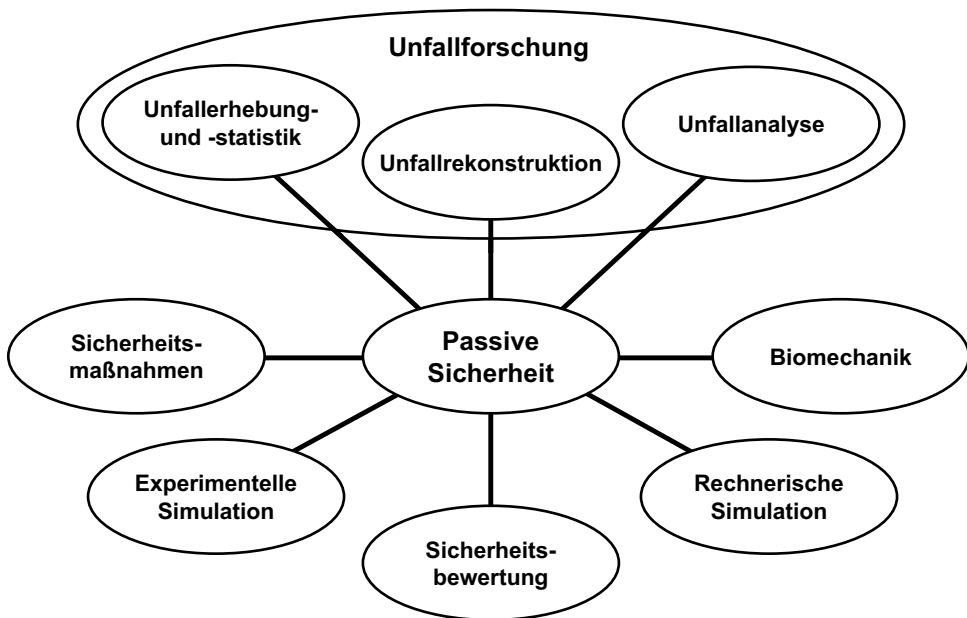


Abb. 1.5: Die passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen und ihre Wirkungsbereiche

Literaturnachweis zu Kapitel 1:

- [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, Nr. 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, 2005/2006.
- [7] KRAMER, F.: Zur Quantifizierung der Straßenverkehrssicherheit. Forschungsbericht Nr. 323/88. Technische Universität Berlin, 1988.
- [8] BRÜHNING, E. u. a.: Zum Rückgang der Getötetenzahlen im Straßenverkehr der Bundesrepublik Deutschland von 1970 bis 1984. Zeitschrift für Verkehrssicherheit, Nr. 3, 1986.

2 Unfallforschung

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 2003 in Deutschland verstorbenen 853.946 Personen unterteilen in Karzinomerkrankungen (24,5 %), Herzmuskelerkrankungen, z. B. Myokardinfarkte (8,1 %), Erkrankungen des Kreislaufsystems (46,4 %), der Atmungsorgane (6,8%), der Verdauungsorgane (4,9 %) und sonstige natürliche Todesursachen, z. B. Infektionen, Tuberkulose, Diabetes u. a., (5,2 %) sowie Todesfälle aufgrund von Unfällen und Gewalt (4,1 %). Diese Hauptgruppen sind in Abbildung 2.1 dargestellt.

Todesursachen

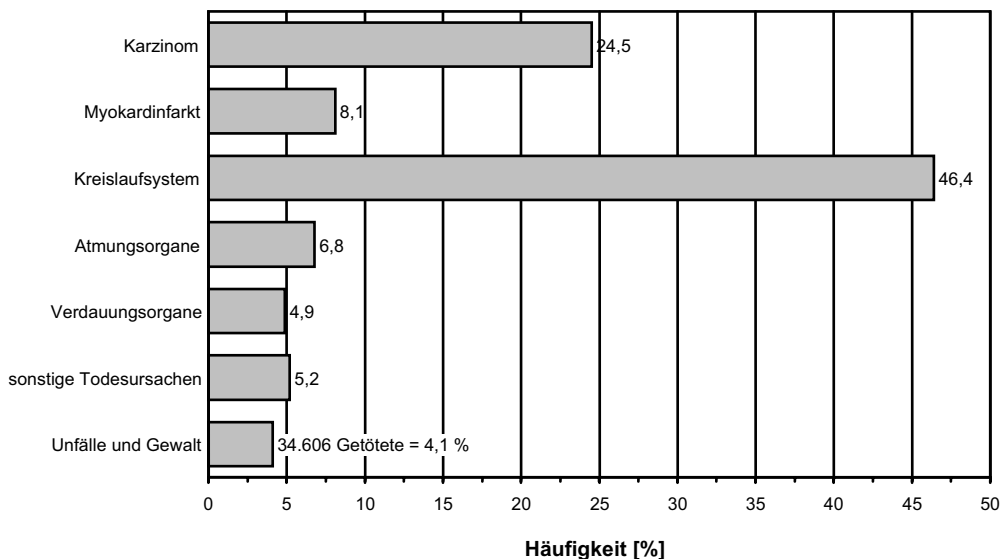


Abb. 2.1: Hauptgruppen der Todesursachen (n = 853.946) im Jahr 2003

Bei der letztgenannten Hauptgruppe handelt es sich um insgesamt 34.606 Fälle unnatürliche Todesursachen, also Verletzungen und Vergiftungen. Diese lassen sich in zwei Gruppen, in Unfälle und Gewalt, unterscheiden, und zwar einerseits in Verkehrsunfälle (19,3 %), häusliche Unfälle (18,0 %), Arbeitsunfälle (1,6 %), Sport- und Spielunfälle (0,5 %) und sonstige Unfälle, wie Todesfälle durch Stürze, Feuer, Waffen, chemischen und biologischen Substanzen sowie Unfallspätfolgen, (19,5 %). Die andere Gruppe umfasst Selbstmord und Selbstbeschädigung (32,2 %) sowie sonstige Gewalt (8,9 %), darunter Mord und Totschlag. Die jeweiligen Anteile sind in Abbildung 2.2 gezeigt.

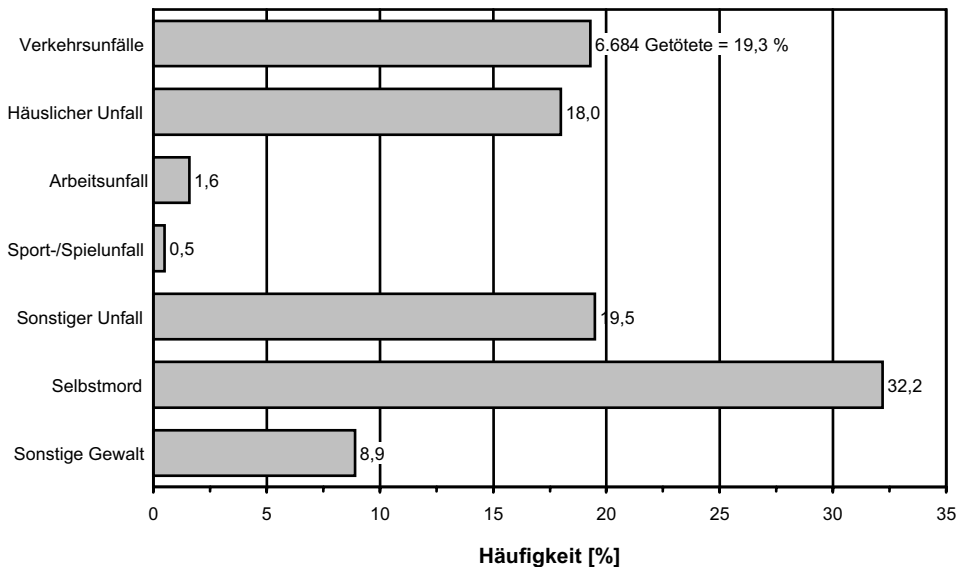
Todesursachen

Abb. 2.2: Unfälle und Gewalt als Todesursachen (n = 34.606) im Jahr 2003

Von den im Jahre 2003 Verstorbenen (853.946 Todesfälle) verunglückten bei Straßenverkehrsunfällen insgesamt 6.684 Personen tödlich, das sind 0,78 %. Es waren dies deutlich weniger als Selbstmord-Opfer, aber etwa doppelt soviel wie gewaltsam getötete Personen.

Die Unfallforschung umfasst die drei Teilbereiche Unfallerbhebung und -statistik, Unfallrekonstruktion und Unfallanalyse (Abbildung 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].

Im technischen Bereich der Unfallforschung wird versucht, mit Hilfe von Simulationen experimentell mit Freiwilligen, Leichen und Dummies 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 Unfalles 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].

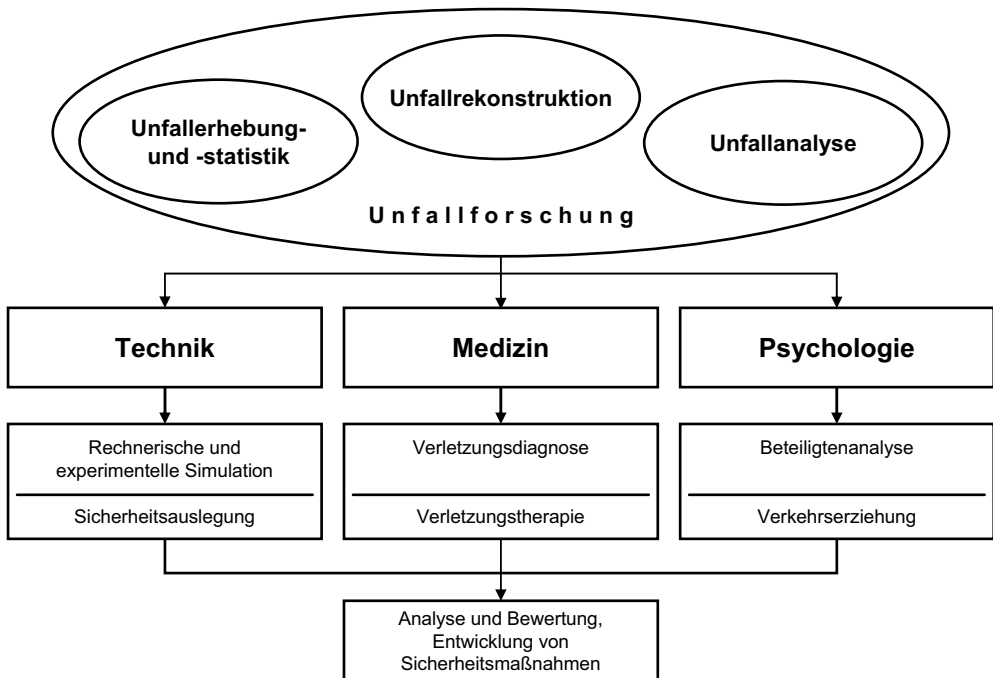


Abb. 2.3: Unfallforschung und Umsetzung der Erkenntnisse in verschiedenen Disziplinen

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 relativer Unfallhäufigkeiten, wie in Abbildung 1.3 anhand der Maßzahl zur Quantifizierung der aktiven Sicherheit [5] gezeigt werden konnte. Sicherheitsmaßnahmen zielen hierbei ab auf den verkehrspädagogischen Aspekt, nämlich auf Verkehrserziehung und -aufklärung.

2.1 Unfalldatenerhebung und -statistik

Eine der wesentlichen Beiträge an unnatürlichen Todesursachen liefern die Verkehrsunfälle (vergl. Abbildung 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 zugängli-

cher 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 sog. „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 werden (Abbildung 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 Unfalldaten-Formulare keine Eintragung derartiger Informationen (vergl. 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 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 nahe liegenden Gründen keine Polizei herbeigerufen, um den Unfall aufzunehmen.

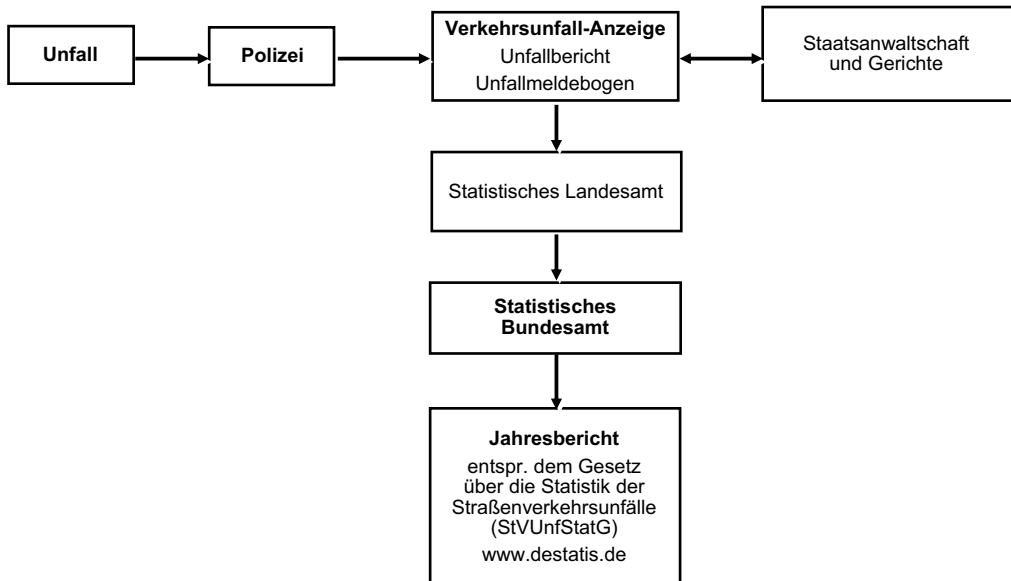


Abb. 2.4: Datenerhebung zur Bereitstellung der Bundesstatistik

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 untersuchten 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 (vergl. Abbildung 2.5).

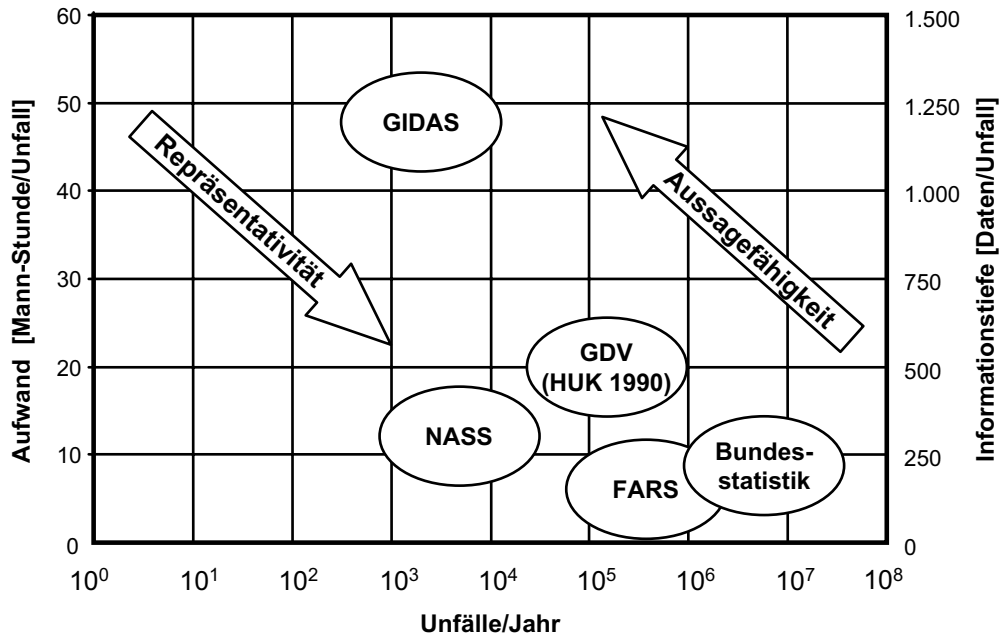


Abb. 2.5: Aufwand, Detaillierung und Anzahl der Fälle bei der Unfalldatenerhebung

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 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 der 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 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, DaimlerChrysler) 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 1989-er Datenmaterial gerade 4.648 Unfälle (vergl. Abbildung 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 Erhebungsort. Das 1988 aufgelegte CDS-Programm konzentrierte sich auf die passive Fahrzeugsicherheit; das parallele Datenerhebungsprogramm, das General Estimates System (GES), arbeitet zur Vervollständigung der CDS-Daten Information aus Polizeiberichte ein, so dass 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 Abbildung 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 Zielrichtungen der Straßenverkehrssicherheit Mensch, Fahrzeug, Umwelt (vergl. Abbildung 1.1) ist aus der Sicht der beteiligten Disziplinen Technik, Medizin und Psychologie (vergl. Abbildung 2.3) in den einzelnen Unfallphasen Einleitung (PreCrash), Kollision (InCrash) und Folgen (PostCrash) die gesamte Kausal- und Wirkkette eines Unfalles 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 gewinnen darüber hinaus Fragestellungen, 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 oder der Verletzungen oder Beschädigungen,
- die mögliche Verletzungsreduzierung durch Anlegen des Gurtes oder durch Tragen von Schutzhelmen und
- die Sitzposition von Insassen zur Klärung der Frage, wer das Fahrzeug gefahren hat [13].

Und im sicherheitsspezifischen Bereich stellen sich Fragen nach

- den Unfallursachen unter psychologischen und physiologischen Aspekten,
- den Bewegungen der Fahrzeuge und den Bewegungen der Insassen relativ zum Fahrzeug (Unfallmechanik),
- den Verletzungsursachen bzw. den verletzungsverursachenden 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 unzulänglich 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), Schwerpunkt-

höhe, Sichtbehinderungen durch parkende Fahrzeuge oder Straßenrandbewachung, 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 (einggelegter Gang, blockierende Räder), Beeinträchtigung des Fahrers/Lenkers durch 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 **kinematische 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 Impulserhaltungssatz, dem Drehimpulserhaltungssatz und dem Energieerhaltungssatz. Dabei wird angenommen, dass der Impuls ebenso wie die Energie vor und nach der In-Crash-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 gewinnt 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, Spuren-

verlaufen sowie den Beschädigungsbildern an den Fahrzeugen ausreichend genau übereinstimmen.

2.2.2 Unfallschwere

Bei der Betrachtung der Unfallschwere, nicht zu verwechseln mit der Unfallfolgen-schwere, 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, so dass der Vorverlagerungsweg der Insassen eingeschränkt werden kann. Die äußere Beanspruchung des Kollisionsobjekts während der In-Crash-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 Unfall-Datenerhebung im Wesentlichen nur qualitativ und nur in den wenigsten Fällen quantitativ ermitteln lässt, beschreibt die Unfallkenngröße 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

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