



Heiko Johannsen

Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion

Grundlagen der Unfallaufklärung

3. Auflage

ATZ/MTZ-Fachbuch

Die komplexe Technik heutiger Kraftfahrzeuge und Motoren macht einen immer größer werdenden Fundus an Informationen notwendig, um die Funktion und die Arbeitsweise von Komponenten oder Systemen zu verstehen. Den raschen und sicheren Zugriff auf diese Informationen bietet die regelmäßig aktualisierte Reihe ATZ/MTZ-Fachbuch, welche die zum Verständnis erforderlichen Grundlagen, Daten und Erklärungen anschaulich, systematisch und anwendungsorientiert zusammenstellt.

Die Reihe wendet sich an Fahrzeug- und Motoreningenieure sowie Studierende, die Nachschlagebedarf haben und im Zusammenhang Fragestellungen ihres Arbeitsfeldes verstehen müssen und an Professoren und Dozenten an Universitäten und Hochschulen mit Schwerpunkt Kraftfahrzeug- und Motorentechnik. Sie liefert gleichzeitig das theoretische Rüstzeug für das Verständnis wie auch die Anwendungen, wie sie für Gutachter, Forscher und Entwicklungingenieure in der Automobil- und Zuliefererindustrie sowie bei Dienstleistern benötigt werden.

Heiko Johannsen

Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion

Grundlagen der Unfallaufklärung

3., überarbeitete Auflage

Mit 129 Abbildungen und 21 Tabellen



Springer Vieweg

Prof. Dr.-Ing. Heiko Johannsen
Fachgebiet Kraftfahrzeuge
TU Berlin
Berlin, Deutschland

Die ersten beiden Auflagen des Buches erschienen unter dem Titel „Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion“.

ISBN 978-3-658-01593-0
DOI 10.1007/978-3-658-01594-7

ISBN 978-3-658-01594-7 (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 2013
Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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

Gedruckt auf säurefreiem und chlorkfrei gebleichtem Papier.

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

Vorwort zur dritten Auflage

Dieses Buch bezieht sich auf den Pkw-Unfall im Straßenverkehr und behandelt die Themenkreise Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion. Vorangestellt wird, um Begriffe eindeutig festzulegen, ein Kapitel zur Unfallsystematik.

Im Vordergrund stehen technische Aspekte der Unfallaufklärung. Auf medizinische und rechtliche Fragestellungen wird nur soweit wie nötig eingegangen. Zentrales Anliegen des Buches ist die Erläuterung moderner technischer Rekonstruktionsverfahren vor dem Hintergrund der klassischen Mechanik mit Impulssatz, Drehimpulssatz und Zusatzhypthesen. Grundlagen und Anwendung, Theorie und Praxis sollen verbunden, Prinzipielles und Methodisches betont werden. Die Grundlagen für das Verständnis von modernen Unfallrekonstruktionsverfahren, ob in Vorwärts- oder Rückwärtsrechnung gehalten, ob auf Stoßrechnung oder Kraftrechnung basierend, werden dargestellt und an anwendungsnahe Beispielen demonstriert.

Die technische Unfallrekonstruktion ist ein vergleichsweise junger Wissenschaftsbereich. Sein Anfang liegt in den vierziger Jahren des 20. Jahrhunderts und hat mit den Arbeiten von Brüderlin begonnen. Die stetige Weiterentwicklung der Verfahren bis in die heutige Zeit der PC-Unterstützung wird in diesem Buch nachgezeichnet.

In dieser dritten Auflage des erstmals im Jahre 1994 erschienenen Buches werden die Abschnitte Unfallsystematik, Unfallforschung und Unfallmechanik aktualisiert und der Abschnitt Unfallrekonstruktion erweitert. Definitionen werden präzisiert, Daten aktualisiert, zwischenzeitlich erschienene Veröffentlichungen und Bücher werden berücksichtigt. Behandelt werden in diesem Buch auch – nur scheinbar – nachgeordnete Fragen, über die oft hinweggegangen wird, so zum Beispiel: Wo verstecken sich bei dem grafischen Verfahren der Unfallrekonstruktion die Zusatzhypthesen? Wie ist bei rechnerischen Verfahren das Koordinatensystem zu legen? Wie unterscheidet sich die Vorzeichenfestlegung bei vorgegebenen und gesuchten Größen, z. B. Geschwindigkeiten? Warum ist zwischen eingeprägten Kräften und Reaktionskräften zu unterscheiden? Zu welcher Gruppe gehört die Stoßkraft bzw. der Stoßantrieb, welche Konsequenzen ergeben sich daraus?

Das Buch basiert auf langjähriger Forschung und Lehre im Fachgebiet Kraftfahrzeuge der Technischen Universität Berlin.

Das Buch wendet sich vornehmlich an Unfall- und Kraftfahrzeug-Sachverständige, sei- en sie selbstständig oder für Versicherungen bzw. Überwachungsvereine tätig. Gerade dem

erfahrenen, in der Praxis tätigen Unfallgutachter soll mit dem Buch die Rückbesinnung auf die physikalischen Grundlagen der von ihm entweder explizit oder, in Software eingebunden, implizit angewandten Verfahren erleichtert werden. Darüber hinaus möge das Buch den Studenten an Universitäten und Hochschulen bei ihrer Ausbildung behilflich sein. Das Buch eignet sich hier als Grundlage und Leitfaden bei Vorlesungen und Übungen. Auch den Sicherheitsingenieuren bei Automobilherstellern und Sicherheitszulieferern wird das Buch nützlich sein. Schließlich soll das Buch jungen Ingenieuren den Einstieg in die technische Unfallrekonstruktion, Unfallanalyse und Unfallforschung erleichtern und deren Verbindungen zur Sicherheitsforschung aufzeigen.

Diese Buch basiert im Wesentlichen auf der 2. Auflage von Professor Dr.-Ing. Hermann Appel, Dr.-Ing. Gerald Krabbel und Dirk Vetter. Bei der vorliegenden Überarbeitung und Neugestaltung des Buches hat Herr cand. ing. T. Berger tatkräftig mitgeholfen. Des Weiteren basiert die Überarbeitung teilweise auf fruchtbaren Diskussionen mit Gerd Müller und Mathias Stein. Wesentliche Teile der In-Depth Datenanalysen wurden freundlicher Weise von Prof. Dietmar Otte bereitgestellt. Ihnen allen habe ich sehr zu danken.

Berlin, im Juni 2013

Heiko Johannsen

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen, Bezeichnungen, Formelzeichen	XI
1 Einleitung	1
2 Unfallsystematik	5
2.1 Definitionen: Unfall, Risiko, Sicherheit	5
2.2 Zeitliche Phasen des Unfalls	11
2.3 Unfallart und Unfalltyp	12
2.4 Kollisionsart und Kollisionstyp	17
2.5 Aufprallart und Aufpralltyp	20
2.6 Belastungs- und Verletzungsarten des Menschen	25
3 Unfallforschung	27
3.1 Bearbeitungskette von der Unfallerhebung bis zur Unfallforschung	27
3.2 Unfallerhebungen	28
3.2.1 Polizeiliche Unfallerhebungen	31
3.2.2 Erhebungen am Unfallort durch spezielle Forschungsteams	32
3.2.3 Retrospektive Unfalluntersuchungen	36
3.3 Unfallrekonstruktion und Unfallaufklärung, Rechtsprechung	41
3.4 Unfallanalyse	44
3.5 Unfallschwere, Unfallfolgenschwere	46
3.5.1 Unfallschwere, Unfallkenngröße	47
3.5.2 Unfallfolgen, Unfallfolgenschwere	52
3.6 Unfallforschung, Sicherheitsforschung	57
3.7 Ausgewählte Ergebnisse der Unfallanalyse, Unfallforschung und Sicherheitsforschung	59
4 Unfallmechanik	85
4.1 Kinematische Grundlagen	85
4.2 Crashkinematik, Crashpulse, Stoßziffer (Stoffgesetze)	88
4.2.1 Crashkinematik, Deformationskennungen	88
4.2.2 Stoßziffer	95

4.3	Kraftrechnung	97
4.3.1	Schwerpunktsatz	99
4.3.2	Drallsatz	100
4.4	Stoßrechnung	101
4.4.1	Stoßarten	101
4.4.2	Stoßtheorien	102
4.4.3	Ergänzungshypothesen	104
4.4.4	Impulssatz	105
4.4.5	Drehimpulssatz	105
4.4.6	Stoßgleichungen für die ebene Scheibe	106
4.4.7	Gerader zentrischer Stoß zweier Scheiben	107
4.4.8	Schiefer exzentrischer Stoß zweier Scheiben	110
4.5	Arbeitssatz (Energiesatz)	112
4.5.1	Arbeitssatz für starre Körper	112
4.5.2	Arbeitssatz für deformierbare Körper im statischen Gleichgewicht	114
4.5.3	Arbeitssatz allgemein	115
4.5.4	Arbeitssatz für den Wandaufprall eines Fahrzeugs	115
4.5.5	Arbeitssatz für die gerade, zentrische Kollision zweier Fahrzeuge	116
4.5.6	Arbeitssatz für den exzentrischen Aufprall eines Fahrzeugs auf einen starren Pfahl	117
4.5.7	Arbeitssatz für die Auslaufbewegung nach dem Stoß	117
4.5.8	Berechnung der Stoßziffer für einen Wandaufprall	119
4.6	Anwendungsbeispiele zur Kraftrechnung	120
4.6.1	Physikalisches Pendel	120
4.6.2	Frontalkollision zweier Fahrzeuge	121
4.7	Anwendungsbeispiele zur Stoßrechnung	125
4.7.1	Exzentrischer Stoß gegen eine drehbar gelagerte Scheibe	125
4.7.2	Kollision Pkw-Baum	128
4.7.3	Pkw-Pkw-Seitenkollision	133
4.7.4	Pkw-Pkw-Offset-Frontalkollision	135
4.7.5	Kollision Pkw-Fußgänger	138
4.7.6	Frontalaufprall ohne und mit Abgleiten, Einfluss auf Geschwindigkeitsänderung und Energieabsorption	144
4.8	Festlegung der Unbekannten in Ersatzsystemen	146
5	Unfallrekonstruktion	149
5.1	Unfallrekonstruktionsverfahren	150
5.1.1	Rückwärts-Unfallrekonstruktion, insbesondere Rückwärts-Kollisionsrekonstruktion	153
5.1.2	Vorwärts-Unfallrekonstruktion, insbesondere Vorwärts-Kollisionsrekonstruktion	156
5.1.3	Kontrollmöglichkeiten	159

5.1.4	Unfalldatenspeicher	160
5.2	Grafische Rekonstruktionsverfahren	162
5.2.1	Antriebs-Balance-Verfahren	163
5.2.2	Impuls-Spiegelverfahren	165
5.2.3	Drehimpuls-Spiegelverfahren	167
5.2.4	Energie-Ringverfahren	169
5.2.5	Rhomboïd-Schnittverfahren	172
5.2.6	Band-Schnittverfahren	173
5.3	Rechnerische Rekonstruktionsverfahren	177
5.4	Anmerkungen und Ergänzungen zu den vorgestellten Rekonstruktionsverfahren	179
5.5	Einflüsse auf die Qualität von Rekonstruktionsergebnissen	182
Anhang	187
Literatur	199
Sachverzeichnis	213

Abkürzungen, Bezeichnungen, Formelzeichen

Abkürzungen

ABS	Anti-Blockiersystem (Bezeichnung der Fa. Bosch für ihre ABV)
ABV	Automatischer Blockierverhinderer
ACC	Autonomous Cruise Control (oder Adaptive Cruise Control)
ACIR	Automotive Crash Injury Research (USA)
ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobilclub e. V.
ADR	Australian Design Rules
AIS	Abbreviated Injury Scale alt.: Automotive Industry Standards (Indien)
ANCAP	Australian New Car Assessment Programme
APF	Abdominal Peak Force
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMFT	Bundesministerium für Forschung und Technologie, jetzt Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
BMW	Bayrische Motorenwerke AG
BUB	bewegliche undeformierbare Barriere
C-NCAP	China New Car Assessment Programme
CARAT	Computer Aided Reconstruction of Accidents in Traffic
CDC	Collision Deformation Classification
CDS	Crashworthiness Data System (Unterprogramm von NASS, sammelt statistische Daten zu Fahrzeugkollisionen)
CRASH	Calspan Reconstruction of Accident Speeds on the Highway
DAT	Deutsche Automobil Treuhand GmbH
DEKRA	Deutscher Kraftfahrzeug-Überwachungs-Verein e. V.
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DOT	Department of Transportation (USA)
Dummy	Messpuppe
EBS	Equivalent Barrier Speed (veraltet)
ECE	Economic Commission of Europe

EDCRASH	Engineering Dynamics Corporation Reconstruction of Accident Speeds on the Highway, Unfallrekonstruktionsprogramm der Engineering Dynamics Corporation (USA)
EES	Equivalent Energy Speed
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
ESV	Experimental Safety Vehicle
ETS	Equivalent Test Speed
Euro NCAP	European New Car Assessment Programme
EVU	Europäischer Verein für Unfallforschung und Unfallanalyse e. V.
FARS	Fatality Analysis Reporting System (USA)
FAT	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. im VDA
FEM	Finite Elemente Methode
Fg	Fußgänger
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standard
FOLKSAM	Automobilversicherer in Schweden
Fr	Fahrrad, Fahrradfahrer
GB	Guobiao (nationale Norm in China)
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.
GIDAS	German In Depth Accident Study
GTÜ	Gesellschaft für Technische Überprüfungen
GUVU	Gesellschaft für Ursachenforschung bei Verkehrsunfällen e. V.
HIC	Head Injury Criterion
HLDI	Highway Loss Data Institute (USA, Institut der Versicherungswirtschaft)
HPC	Head Protection Criterion (wie HIC, aber Untersuchungszeit begrenzt auf Kontaktzeitraum)
HUK	Verband der Haftpflichtversicherer, Unfallversicherer, Autoversicherer und Rechtsschutzversicherer e. V. (HUK-Verband), München. Abgelöst durch GDV
IIHS	Insurance Institute for Highway Safety (USA)
INRETS	Institut National De Recherche Sur Les Transports Et Leur Sécurité (Frankreich), heute IFSTTAR
IR	Infrarot
IRCOBI	International Research Committee On Biomechanics
ISS	Injury Severity Score
JNCAP	Japan New Car Assessment Programme
Kfz (KFZ)	Kraftfahrzeug
KMVSS	Korean Motor Vehicle Safety Standard (Südkorea)
KNCAP	Korean New Car Assessment Programme
KT	Kollisionstyp
Latin NCAP	Latin New Car Assessment Programme (Südamerika)
LV	Leicht Verletzte
M	Momentanpol, Drehpol

MAIS	Maximum AIS = Maximaler AIS-Wert bei einem Verletzten
MB	Mercedes Benz
MHH	Medizinische Hochschule Hannover
MKS	Mehrkörpersystem
Mz	Motorisierte Zweiradfahrer
NASS	National Automotive Sampling System (USA, 1966 eingeführt)
NCAP	New Car Assessment Program (USA)
NCSA	National Center for Statistics and Analysis (USA), „Statistisches Bundesamt“ der USA, bei dem z. B. die Unfallerhebungsdaten aus NASS einfließen
Nfz (NFZ)	Nutzkraftwagen
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration (USA), amerikanische Verkehrssicherheitsbehörde im DOT
NIC	Neck Injury Criterion
Nij	Normalised Neck Injury Criterion
ODB	ortsfeste deformierbare Barriere
OOP	Out of Position
OUNB	ortsfeste undeformierbare Barriere
OWiG	Ordnungswidrigkeitengesetz
Pkw (PKW)	Personenkraftwagen
PMTO	Post Mortal Testobject (Leiche)
PODS	Probability of Death Score
PSPF	Pubic Symphysis Peak Force
RDC	Rib Deflection Criterion
S	Schwerpunkt
SAE	Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, DA, USA
SID	Side Impact Dummy
SNPRM	Supplemental Notice of Proposed Rulemaking
SPUL	Spezifische Unfall-Leistung
STAPP	Name, daher Stapp Conference
StPO	Strafprozessordnung
SV	schwer Verletzte
TRIAS	Type Approval Test Procedures (Japan)
TRL	Transport Research Laboratory (England), früher TRRL
TRRL	Transport Road Research Laboratory (England)
TTI	Thoracic Trauma Index
TUB	Technische Universität Berlin
TUD	Technische Universität Dresden
TÜV	Technischer Überwachungsverein
TV	tödlich Verletzte
UDS	Unfall-Daten-Speicher (früher: Unfall-Daten-Schreiber)
US-NCAP	US New Car Assessment Programme
VC	Viscous Criterion

VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.	
VDI	Vehicle Deformation Index	
VDI	Verein Deutscher Ingenieure	
VIDI	Vehicle Interior Deformation Index (inzwischen nicht mehr angewandt)	
VOI	Volkswirtschaftlich Optimierter Insassenschutz (BMFT-Forschungsprojekt)	
VTI	Swedish National Road and Transport Research Institute	
VW	Volkswagen AG	

Formelzeichen, Bezeichnungen

α	Einlaufwinkel	
μ	Reibwert	
φ	Bog	Drehwinkel
ω	Bog/s	Winkelgeschwindigkeit
Θ	kgm^2	Massenträgheitsmoment
Θ_0	kgm^2	Massen-Trägheitsmoment bezogen auf den Punkt 0
$\underline{\underline{\Theta}}$	kgm^2	Massen-Trägheitsmatrix bezogen auf den Punkt 0
a	Index für äußere Kraft	
\underline{a}	m	Abstandsvektor des Stoßantriebes
\underline{a}	m/s^2	Beschleunigung (Betrag)
A	Nm	Arbeit
A, E	Anfang, Ende einer Bewegung	
B	Berührpunkt, Kontaktspunkt, Impulsübertragungspunkt am Fahrzeug (identisch mit K)	
c	N/m	Steifigkeit
c_{ers}	N/m	Ersatzsteifigkeit
D	kgm^2	Drall
D	m	Eindrückung
1D, 2D, 3D	ein-, zwei-, dreidimensional	
Δv	m/s	Geschwindigkeitsänderung
e	Index für eingeprägte Kraft	
\underline{e}	Einheitsvektor	
\underline{e}	m	minimaler Abstandsvektor des Stoßantriebes
E	Nm	Kinetische Energie
EES	km/h	Equivalent Energy Speed
F	N	Kraft
h	m	Höhe
i	Index für innere Kraft	
i	m	Trägheitsradius
I, \underline{I}	$\text{kgm/s}, \text{Ns}$	Impuls, Impulsvektor

k		Restitutionskoeffizient, Stoßziffer, Stoßzahl
K		Berührungs punkt, Kontakt punkt, Impuls übertragungspunkt am Fahrzeug (identisch mit B)
KO		Kollisionsort auf der Straße
l	m	Länge
l_R, R	m	Radstand
m	kg	Masse
M	Nm	Moment
M		Momentanpol
M_D		Drehpol
m_{ers}	kg	Ersatzmasse
N		Normalrichtung des Stoßantriebes
N	kgm/s^2	Newton
P, P	$\text{kgm/s}, \text{Ns}$	Stoßantrieb, Stoßantriebsvektor
P^*	$\text{kgm/s}, \text{N s}$	kleinstmöglicher Stoßantrieb, Hilfsgröße
r	m	Lagevektor
R		Index für Reaktionskraft
R	m	Radstand
s	m	Weglänge, Deformationsweg
s		Sekunde
S		Schwerpunkt
$SPUL$	m^2/s^2	Spezifische Unfallleistung
T		Tangentialrichtung des Stoßantriebes
T	s	Vollschnüngsdauer
t	s	Zeit
v	m/s	Geschwindigkeit
v_{koll}, v_0	m/s	Aufprall-, Kollisionsgeschwindigkeit
v_{rel}	m/s^2	Relativgeschwindigkeit
W, W_{Def}	Nm	Deformationsarbeit
W_{el}	Nm	elastische Deformationsarbeit
W_{pl}	Nm	plastische Deformationsarbeit
\times		äußeres Produkt von Vektoren
x, y, z	m	Lagekoordinaten (i. Allg. für den Schwerpunkt)
$x(t)$	m	zeitabhängiger Weg
$\dot{x}(t)$	m/s	zeitabhängige Geschwindigkeit
$\ddot{x}(t)$	m/s^2	zeitabhängige Beschleunigung
$(\cdot), (\cdot)'$		vor, nach dem Stoß
$(\underline{\cdot})$		einfache Unterstreichung für Vektor
$(\underline{\underline{\cdot}})$		doppelte Unterstreichung für Matrix, Tensor

Die Unfallforschung im Straßenverkehr geht von dem einzelnen Unfall aus und dient mit Unfallerhebung, Unfallrekonstruktion, Unfallaufklärung und Unfallanalyse einerseits der Rechtssicherheit, sowohl in strafrechtlicher als auch zivilrechtlicher Hinsicht, andererseits der Verkehrssicherheit, sowohl im Hinblick auf die aktive als auch die passive Sicherheit. Die Unfallforschung basiert letztlich auf dem einzelnen, in der Realität abgelaufenen Unfall. Sämtliche Einzelheiten eines Unfalls sind so zu erfassen, zu analysieren und zu bewerten, dass die einzelnen Phasen des Unfallablaufes in ihrer räumlichen und zeitlichen Zuordnung bestimmt und beurteilt werden können. Aus der Sicht der beteiligten Disziplinen (Medizin, Psychologie, Technik ...) ist für die Unfallkomponenten (Mensch, Fahrzeug, Umfeld) in den einzelnen Unfallphasen (Einlauf-, Kollisions-, Auslauf-, Folgephase) die gesamte Kausal- und Wirkungskette eines Unfalls nachzuvollziehen.

Im Bereich des Verkehrsstrafrechtes wird von der Unfallaufklärung die Klärung der Vermeidbarkeit erwartet, im Bereich des Zivilrechtes interessiert, wer für den Schaden aufzukommen hat und in welchem Umfang Schäden eingetreten und zu ersetzen sind. Unfallsachverständige sind hierbei Dienstleister der Straf- und Zivilgerichte, für außergerichtliche Schadensregulierungen liefern sie die maßgeblichen Begründungen.

Im Bereich der Verkehrssicherheit zielt die Unfallforschung auf Maßnahmen zur Vermeidung von Unfällen und auf Maßnahmen zur Minderung der Unfallfolgen. Unfallursachen im Regelkreis Mensch-Fahrzeug-Umfeld sind ebenso wie Zusammenhänge zwischen technischer Ausführung und Unfallfolgen, zwischen konstruktiver Gestaltung von Fahrzeugen und Verletzungsfolgen zu identifizieren. Daraus sind Sicherheitsmaßnahmen und Sicherheitssysteme abzuleiten, nach ihrer Einführung sind Bewertungen vorzunehmen.

Ob im Bereich Strafrecht, ziviles Haftpflichtrecht oder Verkehrssicherheit, die Aufklärung von Unfallvorgängen ist zunächst nur Mittel zum Zweck und erst dann eigener Forschungsbereich im Sinne der Erarbeitung, Weiterentwicklung und Verbesserung von Aufklärungsmethoden. Die technische Unfallrekonstruktion ist Teil der Unfallaufklärung, diese Teil der Unfallanalyse, und diese wiederum Teil der Unfallforschung. Die Unfallmecha-

nik stellt den Bereich der klassischen Mechanik dar, der für die technische Unfallrekonstruktion benötigt und zielgerichtet aufbereitet wird.

Heute bedient sich der mit technischen Unfallrekonstruktionen von Straßenverkehrsunfällen befasste Gutachter oder Sicherheitsingenieur verstärkt rechnergestützter Verfahren unter Verwendung kommerziell verfügbarer „Standardsoftware“. Diese Programme sind zwei- oder dreidimensional angelegt, sie behandeln die Vorwärts oder/und die Rückwärtsrechnung, die Kraft- oder/und die Stoßrechnung. Sie sind schnell, komfortabel und genau im Rahmen der Vorgaben. Sie ermöglichen es, in kurzer Zeit viele Varianten durchzurechnen und dabei einflussreiche Eingangsparameter zu variieren. Außerdem erlaubt die heute allseits verfügbare Software die grafische Darstellung von kontinuierlichen Zeitverläufen (z. B. von Weg, Geschwindigkeit) oder die Zeitschrittdarstellung von Fahrzeugpositionen vor, während und nach der Kollision. In ganz besonderer Weise trägt die bildliche Animation von Fahrzeugbewegungen zur Veranschaulichung, Verständlichmachung und Plausibilitätsüberprüfung bei.

Die Genauigkeit und Wiedergabtreue eines Rekonstruktionsverfahrens sollte eigentlich nur der Genauigkeit und Verlässlichkeit der jeweiligen Eingangsparameter entsprechen. So wirkungsvoll ein Rekonstruktionsprogramm in der Hand des „Fachmannes“ sein kann, so irreführend, weil nicht vorhandene Exaktheit vortäuschend und zu Falschaussagen verführend, kann die Computer-Software in der Hand dessen werden, der die hinter den Programmen stehende Mathematik und Mechanik nicht einschätzen kann, der die enthaltenen Annahmen und Voraussetzungen nicht beachtet und der sich keine Rechenschaft über die möglichen Toleranzen der Eingangsgrößen ablegt. Hier sind zum Beispiel die auf Dezimalen „exakten“ Ergebnisse nicht nur wertlos, sondern wegen falscher Schlussfolgerungen seitens technischer „Laien“ höchst gefährlich.

Zentrales Anliegen des vorliegenden Buches ist die Erläuterung der zugrunde liegenden Theorie moderner, die Stoßtheorie nutzender Rekonstruktionsverfahren, seien sie grafisch oder rechnergestützt angelegt. Vor dem Hintergrund der klassischen Mechanik werden die Grundlagen gezielt aufbereitet, das Prinzipielle und das Wesentliche betont. Es wird auf Kürze, Prägnanz und Nachvollziehbarkeit Wert gelegt. Häufig auftretende, wichtige, überschaubare Kollisionstypen von Personenkraftwagen werden zweidimensional mit Impulsatz, Drehimpulssatz und Zusatzhypthesen behandelt. Variationen der Zusatzhypthesen geben einen Einblick in ihren qualitativen und quantitativen Einfluss. Soweit wie möglich werden analytische Lösungen abgeleitet, die Ergebnis-Formeln können mit unterschiedlichen Eingangsgrößen benutzt, Eingangs- und Ausgangsgrößen können beliebig vertauscht werden. Die aus heutiger Sicht als historisch zu bezeichnenden grafischen Verfahren wie z. B. Impuls- oder Drehimpulsspiegelverfahren werden an „Paradebeispielen“ erläutert, da mit ihrer Hilfe die Stoßtheorie sehr anschaulich erläutert werden kann.

Den Abschnitten „Unfallmechanik“ und „Unfallrekonstruktion“ werden die „Unfallsystematik“ mit Begriffsfestlegungen und die „Unfallforschung“ mit Methoden und Arbeitsbereichen vorangestellt. Hierin sind Aspekte der Unfallerhebungen, der Unfallrekonstruktion, der Unfallaufklärung und der Unfallanalyse einschließlich Unfallstatistik enthalten.

Außerdem werden ausgewählte, neuere Ergebnisse der Unfallforschung einbezogen, insbesondere solche, die für die technische Unfallrekonstruktion interessant sind.

Leser, die vertieft an medizinischen, rechtlichen und psychologischen Aspekten der Unfallaufklärung interessiert sind, seien auf die Beiträge in der Zeitschrift „Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik“ (z. B. [Meyer 00]), Springer Fachmedien München GmbH, sowie auf die Bücher [Wagner 84], [Burg 81] und [Wagner 68] verwiesen. Das bereits historisch zu nennende Buch [Wagner 68] enthält eine Fülle von vielen auch heute noch gültigen Details und befasst sich im Bereich der Verkehrsmedizin ausführlich mit Psychologie, Ophthalmologie, Innere Medizin, Psychiatrie, Chirurgie, Orthopädie, Otologie, Gynäkologie u. a. mehr. [Gögler 68] berichtet in seinem damals viel beachteten Beitrag zur Unfallchirurgie auch über Unfallerhebungen, Unfallmechanik, Verletzungsmechanik, Biomechanik und Fahrzeugsicherheit. Er verweist auf das wohl erste Programm zu vertieften Unfallerhebungen in den USA: „Ausgehend von der Erkenntnis, dass neben der amtlichen Unfallursachenstatistik genau wie bei uns keine Ursachenforschung für die Verletzungen bestand und dass bei der großen Streuung der Gewalteinwirkungen hinsichtlich Richtung und Größe bei Pkw- und anderen Straßenverkehrsunfällen die Arbeiten einzelner Kliniken nicht ausreichend repräsentativ sein können, wurde 1952 die Forschungsgruppe für Autounfallverletzungen an der Cornell-Universität gegründet (Automotive Crash Injury Research, ACIR), die heute das sich in unzähligen Variationen abspielende Massenexperiment auf der Straße aus 21 Bundesstaaten durch ein sorgfältiges Datenverarbeitungsprogramm wissenschaftlich auswertet, als wären es Laborexperimente.“ Bereits im Jahre 1961 wurde innerhalb des ACIR-Programmes eine Skala für Verletzungsschweren mit neun Stufen und eine Skala für Unfallschweren (beruhend auf Fahrzeugdeformationen) mit sechs Stufen definiert [Gögler 68].

2.1 Definitionen: Unfall, Risiko, Sicherheit

Unfälle im Straßenverkehr lassen sich in ihrem Ablauf im Allgemeinen nur unter Betrachtung des geschlossenen Regelkreises „Fahrer-Fahrzeug-Umfeld“ erklären, analysieren und beurteilen. Denn sowohl die Ursachen als auch die Auswirkungen eines Unfalls sind fast niemals allein auf eine Komponente des Regelkreises zurückzuführen, sondern sind das Ergebnis eines interaktiven Zusammenwirkens der drei Komponenten. Fast immer sind daher Unfälle in ihrem Entstehen auf die Verkettung mehrerer Ursachen (z. B. Blendung durch entgegenkommenden Verkehr und dunkle Kleidung eines Fußgängers) und in ihren Auswirkungen auf das wechselseitige Verhalten von mehreren Umständen (z. B. Tragen von Schutzhelmen, Airbagauslösung, Aufprall auf Leitplanken oder Baum) zurückzuführen.

Jeder Fahrvorgang eines Kraftfahrzeuges kann als ein Regelungsvorgang angesehen werden. Ein Fahrzeugunfall ist dann als eine Sachlage definiert, bei der die Abweichung zwischen vorgegebener Fahraufgabe und deren Erfüllung ein zulässiges Maß überschreitet (nicht bewältigte Regelaufgabe) und in deren Folge ein Schaden bestimmter Art und Schwere eintritt. Der Fahrer (Regler) wirkt durch verschiedene Bedienelemente (Regelgröße y) auf das Fahrzeug (Regelstrecke) ein. Die Antwort des Fahrzeugs (Regelgröße) wird vom Fahrer wahrgenommen und mit der Fahraufgabe (Führungsgröße) verglichen, so dass er geeignete Maßnahmen ergreifen kann, um die Differenz zwischen Führungsgröße w und Regelgröße x zu minimieren, siehe Abb. 2.1.

Ziel dieser Betrachtungsweise ist es, den Fahrvorgang als rückgekoppelten, dynamischen Vorgang zu veranschaulichen, mit den Methoden der Regelungstechnik das System „Mensch-Fahrzeug-Umfeld“ mathematisch zu beschreiben und den Einfluss verschiedener Parameter zu erfassen. Das Übertragungsverhalten des Fahrzeugs kann mit den Gleichungen der Fahrzeugdynamik beschrieben werden. Das „Übertragungsverhalten“ des menschlichen Reglers ist jedoch nur unvollkommen erfassbar. Ein mathematisches Modell für das Übertragungsverhalten des Menschen geht davon aus, dass sich das Lenken eines Kraft-

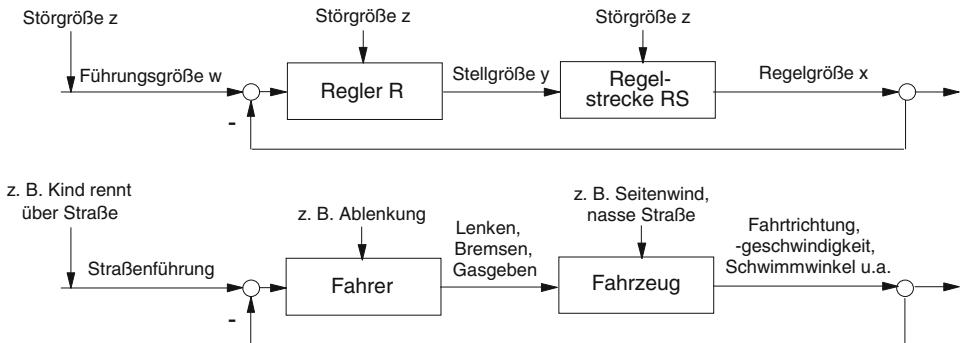


Abb. 2.1 Einfache Darstellung des Regelkreises „Fahrer-Fahrzeug-Umfeld“

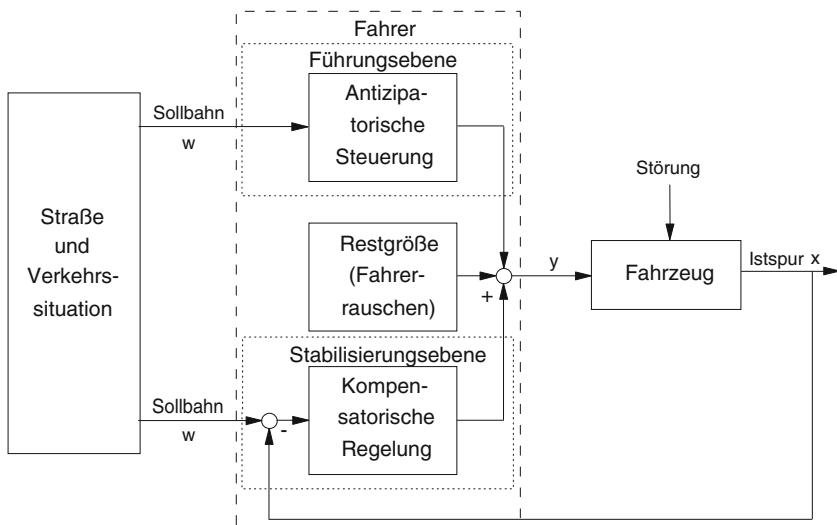


Abb. 2.2 Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens [Zomotor 87]

fahrzeuges in zwei Ebenen, der Führungs- und der Stabilisierungsebene, abspielt, Abb. 2.2. Die Funktion der Führungsebene besteht darin, die Geschwindigkeit und den Istkurs des Fahrzeugs abzustimmen. Sie umfasst die Wahrnehmung des momentanen und zukünftigen Straßenverlaufs als Führungsgröße für den Fahrvorgang und die zugehörigen Lenkreaktionen. Hierbei ist anzumerken, dass in anderen Zusammenhängen (z. B. Fahrerassistenzsysteme) eine dritte Ebene, die Planungsebene, berücksichtigt wird. In diesem Zusammenhang spielt diese jedoch keine Rolle.

Diese Fahrtätigkeit ist eine vorausschauende (antizipatorische) Steuerung. Der Vorgang, das Lenkrad vorausschauend auf den einsehbaren Straßenverlauf (z. B. vor einer Rechtskurve nach rechts) einzuschlagen, wird Steuerung (im Gegensatz zu Regelung) genannt, weil der Wirkungssinn nur in eine Richtung geht. In der Stabilisierungsebene

wird die momentane Fahrzeuggbewegung relativ zur Straßenführung beobachtet und dafür gesorgt, dass sich das Fahrzeug trotz der einwirkenden Störungen mit möglichst geringen Abweichungen auf dem vorgesehenen Kurs bewegt. Abweichungen werden im geschlossenen Regelkreis durch Lenkkorrekturen kompensiert. Diese Fahrertätigkeit, bei der eine Fehlergröße ausgeregelt wird, heißt Kompensationsregelung (siehe u. a. [Klebelberg 82]).

Löst man sich von der regelungstechnischen Betrachtung, so lässt sich ein Unfall als plötzliches und meist auch unvorhergesehenes Ereignis definieren, das den Zustand eines Fahrzeugs und/oder seiner Insassen nachteilig verändert. Ein Straßenverkehrsunfall ist danach definiert als ein Ereignis, bei dem infolge des Fahrverkehrs auf öffentlichen Wegen oder Plätzen Personen getötet, verletzt oder Sachschäden verursacht worden sind (§ 1 StVUnfStatG). Die Unfallwahrscheinlichkeit hängt zu einem großen Ausmaß davon ab, in welchem Umfang der Fahrer in der Lage ist, Ereignisse vorauszusehen, die zu einem Unfall führen könnten.

Das mit einem Unfall verbundene Risiko des Individuums bzw. für die Gesellschaft setzt sich zusammen aus:

- der zu erwartenden Häufigkeit eines zum Schaden führenden Ereignisses und
- dem beim Ereigniseintritt zu erwartenden Schadensausmaß.

Juristisch wird als Schaden ein Nachteil durch Verletzung von Rechtsgütern auf Grund eines bestimmten Vorgangs oder Zustands definiert. Das Schadensausmaß wird am Fahrzeug durch den Sachschaden (Reparatur, Wiederbeschaffung) und am Menschen durch den Personenschaden (Verletzungsschwere, Verletzungskosten) gekennzeichnet.

Versicherungstechnisch wird Risiko als Produkt von Schadenshäufigkeit [%] und Schadenshöhe [€] definiert. Mit abnehmendem Risiko erhöht sich die Sicherheit. Im Zusammenhang von Mensch, Fahrzeug und Umfeld wird „Risiko“ [Wilde 81; ISO 98] definiert als:

- wahrgenommenes Risiko – akzeptiertes Risiko \Rightarrow subjektives Risiko
- wahrgenommenes Risiko – subjektives Risiko \Rightarrow akzeptiertes Risiko
- subjektives Risiko \approx 1/angestrebte Vorsicht.

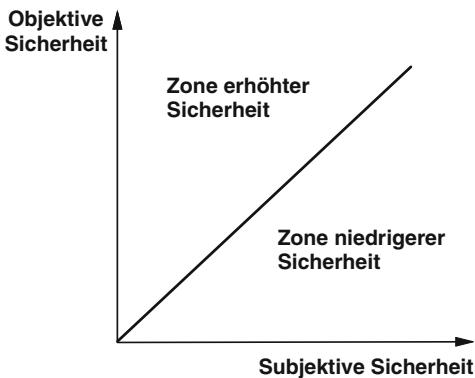
Unter Bezug auf den Straßenverkehr wird nach objektiver, subjektiver und tatsächlicher Sicherheit (Abb. 2.3) unterschieden [Klebelberg 82]:

- tatsächliche Sicherheit = objektive Sicherheit – subjektive Sicherheit

Hiernach wird die Sicherheit im Straßenverkehr beispielsweise ansteigen, wenn ein nach technischen Kriterien sicheres Fahrzeug dem Fahrer das Gefühl gibt, ein unsicheres Fahrzeug zu führen. Auf den Verkehrsfluss bzw. die Verkehrsleistung, d. h. auf den originären Zweck des Verkehrs, könnte sich das allerdings negativ auswirken.

Von einer Risikokompensation wird gesprochen, wenn wegen erhöhter objektiver Sicherheit (z. B. Einführung von ABV-Systemen) die subjektive Sicherheit (Sicherheitsgefühl

Abb. 2.3 Zusammenhang zwischen objektiver und subjektiver Sicherheit



des Fahrers) übermäßig ansteigt und so die technische Verbesserung infolge überzogener Ausnützung durch den Menschen in ihrem Sicherheitspotenzial mehr als aufgezehrt wird.

Unter Bezugnahme eines Risikos auf bestimmte, über die gesamte Lebenszeit einer Person homogene Expositionsbedingungen, so wird von einem Individualrisiko oder dem mittleren Pro-Kopf-Risiko bei lebenslanger Exposition gesprochen. Abbildung 2.4 zeigt eine Risikoskala, wobei das tödliche Risiko auf eine Lebenszeit von 70 Jahren und auf eine Lebensarbeitszeit von 50 Jahren bezogen ist [LAI 91]. Das Risiko, in einen Unfall beliebiger Art mit Todesfolge innerhalb der Lebenszeit von 70 Jahren verwickelt zu werden, ist demnach etwa 1:20.

Den Angaben von [LAI 91] soll die Abschätzung über das Risiko für tödliche Verletzungen bei Straßen-Verkehrsunfällen hinzugefügt werden, bezogen auf das Jahr 2009 und die Bundesrepublik Deutschland. Insgesamt wurden 4152 Personen getötet (StBA 10/1), die Zahl der Einwohner betrug 81,802 Millionen. Werden diese Zahlen für 70 Jahre zu Grunde gelegt, dann folgt daraus das Individualrisiko für tödliche Verletzungen (TV) im Straßenverkehr:

$$\text{Risiko}_{\text{TV}} = \frac{4125 \text{ Getötete/Jahr} \cdot 70 \text{ Jahre}}{81,802 \text{ Mio Einwohner}} \approx 1/280 \text{ TV/Einw.}$$

Das Risiko für schwere Verletzungen SV (68.567 im Jahre 2009) und für leichte Verletzungen LV (329.104 im Jahre 2009) beträgt demnach:

$$\text{Risiko}_{\text{SV}} = 1/17 \text{ SV/Einw.}$$

$$\text{Risiko}_{\text{LV}} = 1/3 \text{ LV/Einw.}$$

Es ist zu erkennen, dass das Risiko, bei Verkehrsunfällen getötet zu werden, im Verhältnis zu anderen, natürlichen Expositionen, besonders hoch ist. Das Risiko in Folge anderer Unfälle zu versterben ist jedoch deutlich größer. Eine Aufteilung der Todesursachen bei Gewaltanwendung und bei Unfällen zeigt insbesondere für Verkehrsunfälle ein differen-

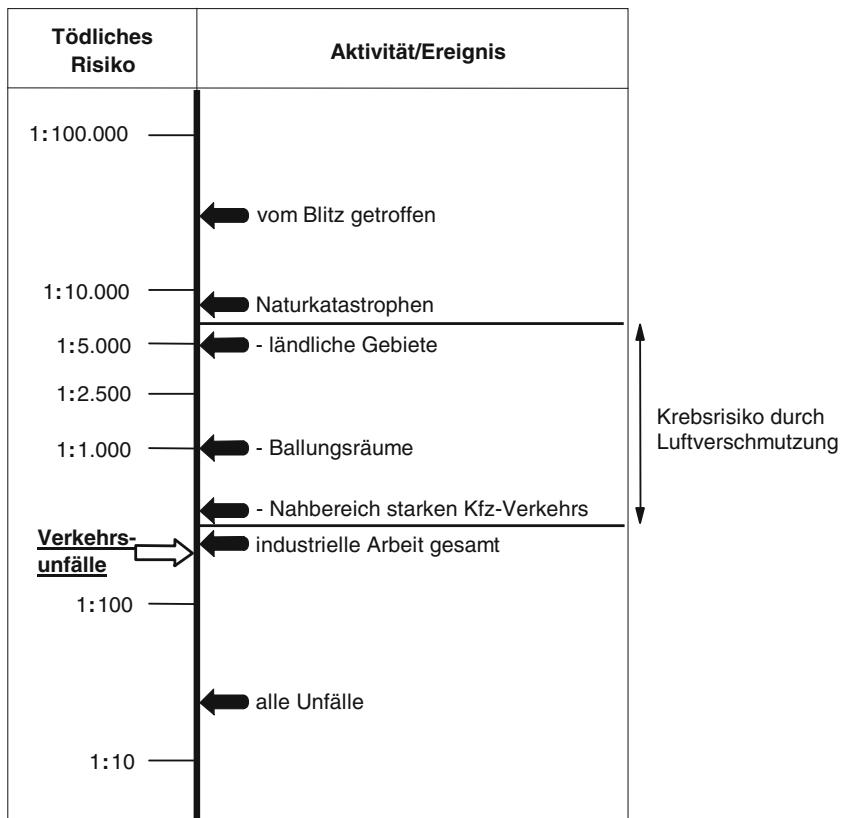
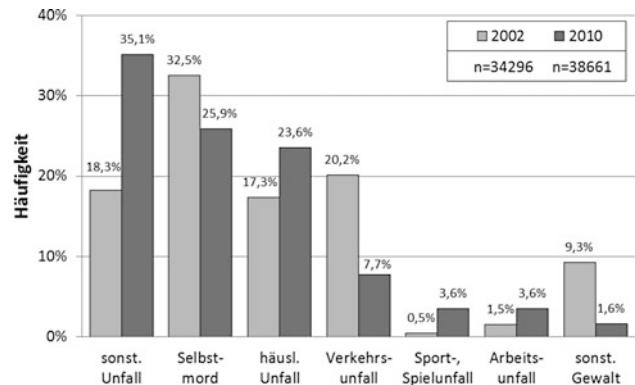


Abb. 2.4 Lebenslange Individualrisiken für tödliche Verletzungen durch Unfälle und Krebsrisiko

Abb. 2.5 Unfälle und Gewalt, Anteile der Todesursachen in Deutschland 2002 und 2010 [StBA 11/1, StBA 03]



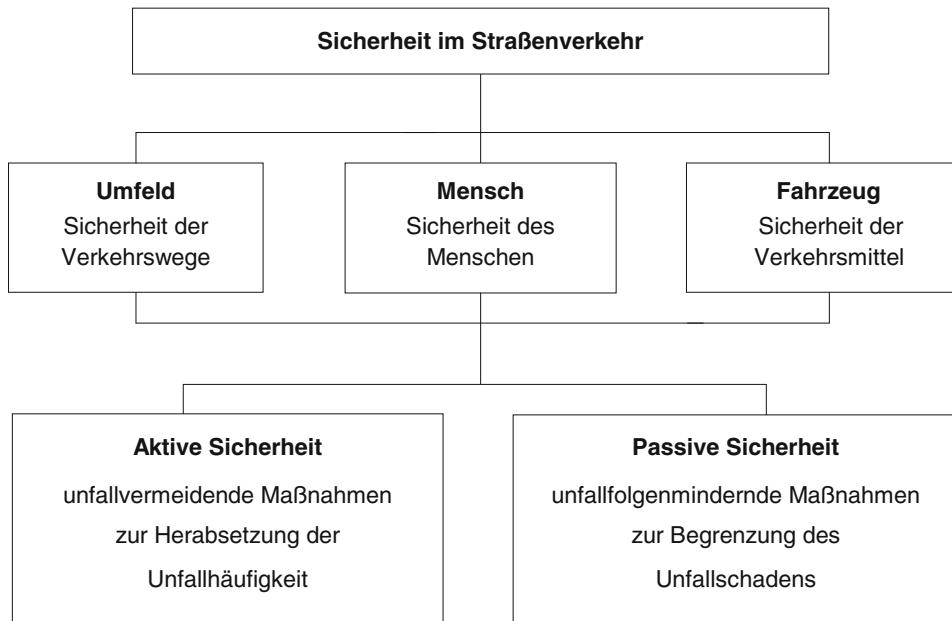


Abb. 2.6 Einteilung der Sicherheit im Straßenverkehr

ziertes Bild für die Jahre 2002 und 2010. Während 2002 Verkehrsunfälle bei den Getöteten mit rund 20 % den größten Anteil der Unfalltoten ausmachten waren es im Jahr 2010 nur noch rund 8 % und damit deutlich weniger als Opfer von häuslichen Unfällen oder anderen Unfällen (siehe Abb. 2.5). Bemerkenswert ist, dass der größte Anteil der Getöteten mit Gewalteinwirkung Selbstmordopfer sind.

Die Verkehrssicherheit kann aufgeteilt werden in die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer, der Verkehrsmittel und des Verkehrsraumes, wobei jeweils wieder in aktive Sicherheit im Sinn von Unfallvermeidung und passive Sicherheit im Sinn von Unfallfolgenminderung unterschieden werden kann, siehe Abb. 2.6 und Tab. 2.1. Eine bei Verkehrsunfall entstandene Verletzung ist somit sowohl durch Maßnahmen der aktiven Sicherheit vermeidbar bzw. in der Schwere reduzierbar u. a. durch den Bremsassistenten zur Reduktion der Aufprallgeschwindigkeit und damit resultierender geringerer Verletzungsschwere, wie auch Maßnahmen der Passiven Sicherheit selbst. So wird gerade heutzutage bei fortlaufend fallenden Getöteten- und Verletztenzahlen dies als geeignete fortführende Maßnahmen angesehen effektiv weitere Unfall- und Verletzungsprophylaxe zu erzielen, in dem verstärkt Maßnahmen der Aktiven Sicherheit in Fahrzeugen und Straßenverkehr implementiert werden. Fahrzeug- und Fahrerassistenz-Systeme sind hier zu nennen.

Tab. 2.1 Einteilung der aktiven und passiven Sicherheit im Straßenverkehr mit Beispielen für Sicherheitsmaßnahmen

	Aktive Sicherheit	Passive Sicherheit
Mensch	Verkehrserziehung zur Vermeidung kritischer Situationen, Begrenzung der Informationsmenge, Rechtssicherheit, Promillegrenze	Motivation zur Benutzung von Sicherheitseinrichtungen (u. U. durch Bußgeld), Notfallmedizin, Rettungswesen
Fahrzeug	Fahrsicherheit und -verhalten, Konditionsicherheit, Bedienungssicherheit, Wahrnehmungssicherheit, Fahrerassistenzsysteme	Selbstschutz der Insassen, Airbag, Fußgängerschutz, Kompatibilität, Energieabsorption der Struktur, Zellensteifigkeit
Umfeld	Verkehrsfluss-Steuerung und Verkehrsleitung, Straßenführung und -bau, Entschärfen von Unfallschwerpunkten	Sicherung der Unfallstelle, Vermeidung von Folgeunfällen, Entschärfung des Straßenrandes (Bäume, Leitplanken)

2.2 Zeitliche Phasen des Unfalls

Entsprechend dem zeitlichen Verlauf eines Unfallgeschehens werden folgende Unfallphasen unterschieden [Langwieder 75; Appel 84/1]:

- Einlaufphase (Pre-Crashphase, Unfalleinleitungsphase) Zeitraum vom Erkennen der kritischen Situation bis zum ersten Kontakt mit dem Hindernis, Unfallgegner o. ä.
- Kollisionsphase (In-Crashphase, Crash-Phase) Zeitraum vom ersten Kontakt der Kontrahenten bis zum Lösen. Bei Mehrfachkollision treten mehrere Kollisionsphasen auf.
- Auslaufphase
Zeitraum vom Lösen der Kontrahenten bis zu ihrem Stillstand oder bis zu einer nachfolgenden Kollision. Bei Mehrfachkollision treten also mehrere Auslaufphasen auf.
- Folgephase (Post-Crashphase, Unfallfolgephase).

Der Ablauf der Einlaufphase wird maßgeblich durch den Fahrer, die Straßenumgebung und die aktive Sicherheit des Fahrzeugs sowie des Umfeldes bestimmt (z. B. durch Fahrwerkseigenschaften, Bremsverhalten, Beladung des Fahrzeugs, gefährliche Kreuzung). Die Auslaufphase wird insbesondere von der translatorischen und der rotatorischen Auslaufgeschwindigkeit sowie dem mittleren Reibwert zwischen Fahrzeug und Untergrund beeinflusst. Die Folgen der Kollisionsphase werden für die verunglückten Verkehrsteilnehmer in weitem Rahmen durch die Maßnahmen der passiven Sicherheit (z. B. Lederkleidung beim Motorradfahrer, Rückhaltesystem beim Fahrzeuginsassen, Leitplanken beim Abkommen von der Straße) aber auch der Folgephase beeinflusst. Die Folgephase ist von den verschiedensten Parametern beim Fahrzeug (z. B. Türöffnungsverhalten, Brand), beim Insassen (z. B. Herausschleudern) und bei der Umgebung (z. B. Schnelligkeit und Qualität der Rettungsdienste) geprägt.

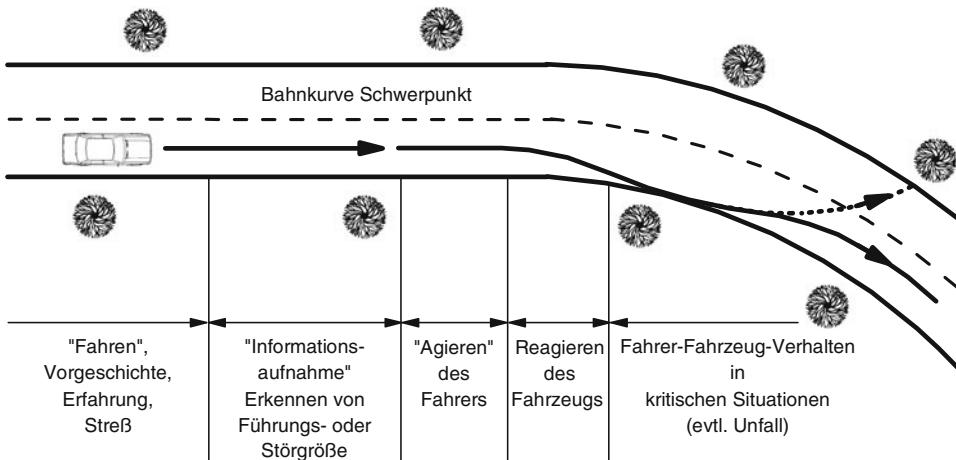


Abb. 2.7 Zeitlicher Ablauf einer kritischen Situation am Beispiel einer Kurvenfahrt

Zur Einlaufphase zeigt die Abb. 2.7 am Beispiel einer Kurvenfahrt vereinfacht den Ablauf einer kritischen Situation, die zum Unfall und eventuell zur Kollision führen kann, aber nicht muss. Der Fahrer erkennt zu einem bestimmten Zeitpunkt eine kritische Situation, unabhängig davon, ob es zu einem Unfall oder nur zu einem Beinahe-Unfall kommt. Nach dem Erkennen der kritischen Situation wird der Fahrer entscheiden, welche Maßnahmen er einleiten wird, um diese abzuwenden. Dabei wird er auf vorliegende Erfahrungen zurückgreifen und eine zur Abwehr der kritischen Situation geeignete Handlung einleiten. Das Fahrzeug reagiert auf Aktionen des Fahrers, so dass es zu einer Interaktion von Fahrer und Fahrzeug kommt, die zu einem Unfall führen kann.

In diesem Sinne kann ein Straßenverkehrsunfall als ein Ereignis definiert werden, bei dem innerhalb des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug-Umfeld die Regelgröße (z. B. tatsächlicher seitlicher Abstand des Fahrzeugs vom rechten Fahrbahnrand) die Führungsgröße (idealer vorgegebener seitlicher Abstand des Fahrzeugs vom rechten Straßenrand) unzulässig weit überschreitet.

2.3 Unfallart und Unfalltyp

Für Zwecke der Unfallanalyse, Unfallforschung und Sicherheitsforschung (s. Kap. 3) hat sich die an der TU Berlin im Rahmen der entsprechenden Lehrveranstaltungen [Appel 73] eingeführte Unterscheidung des Unfallgeschehens in die Kategorien

Unfallart	Unfalltyp
Kollisionsart	Kollisionstyp
Aufprallart	Aufpralltyp

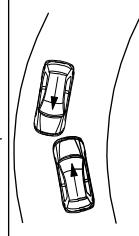
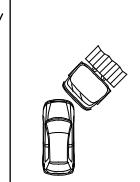
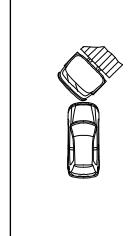
Bezeichnung	Unfallart	Unfalltyp	Kollisionsart	Kollisionstyp	Aufprallart	Aufpralltyp
Bezug	Betrachteter oder am schwersten betroffener Kontrahent	Art der Konflikt-auslösung (Einteilung der Polizei)	Betroffene Kollisions-kontrahenten	Geometrische Konstellation bei der Kollision	Ort der Beschädigung bzw. Kraft-einwirkung am betrachteten Fahrzeug	Detailliertes Beschädigungs-muster am betrachteten Fahrzeug
Beispiel	 Fußgängerunfall oder Pkw-Unfall	 Fahrerfall oder Unfall im Längsverkehr	 Lkw-Pkw-Kollision	 Schräge Frontalkollision unter 45° mit voller Überdeckung für den Pkw und Offset für den Lkw	 Seitenauftprall	 11 FYMW3 30% (VDI) oder BG3 (GDV)

Abb. 2.8 Einteilung des Unfallgeschehens (mit Beispielen)

als zweckmäßig herausgestellt. Diese Einteilung ist, mit spezifischen Abwandlungen, inzwischen auch international üblich und soll im Weiteren hier benutzt werden. Die einzelnen Kategorien beziehen sich, wie in Abb. 2.8 dargestellt, auf die Unfallbeteiligten bzw. Unfallkontrahenten, auf die verkehrliche Konfliktsituation beim Unfall, auf die geometrische Stellung der Kontrahenten beim Unfall bzw. bei der Kollision sowie auf das Beschädigungsmuster des einzelnen Fahrzeuges.

Die (vereinfachte) Verkehrsunfallanzeige der Polizei enthält Merkmale der o. g. Unfallkategorien unter den dortigen Überschriften Unfallart, Unfalltyp, Unfallursachen, Hinder-nis, Beteiligte, Schäden.

Die *Unfallart* nach der hier gewählten Einteilung der Unfallkategorien bezieht sich auf den im Mittelpunkt der jeweiligen Betrachtungen stehenden Kontrahenten. Im Allgemeinen wird das der von Verletzungen schwerer Betroffene sein. Bei Kollisionen mit Hinder-nissen (Alleinunfall) ist es in jedem Falle der betroffene Verkehrsteilnehmer (z. B. im Pkw oder im Lkw), bei der Kollision eines Pkw mit einem Fußgänger wird es der Fußgänger sein, bei Kollisionen zwischen einem Pkw und einem Bus wird es im allgemeinen der Pkw sein. Grundsätzlich gibt es also folgende Unfallarten:

- Nutzfahrzeug-Unfälle (Nfz)
- Personenkraftwagen-Unfälle (Pkw)
- Unfälle von motorisierten Zweirädern (Mz)
- Fahrrad-Unfälle (Fr)
- Fußgänger-Unfälle (Fg).

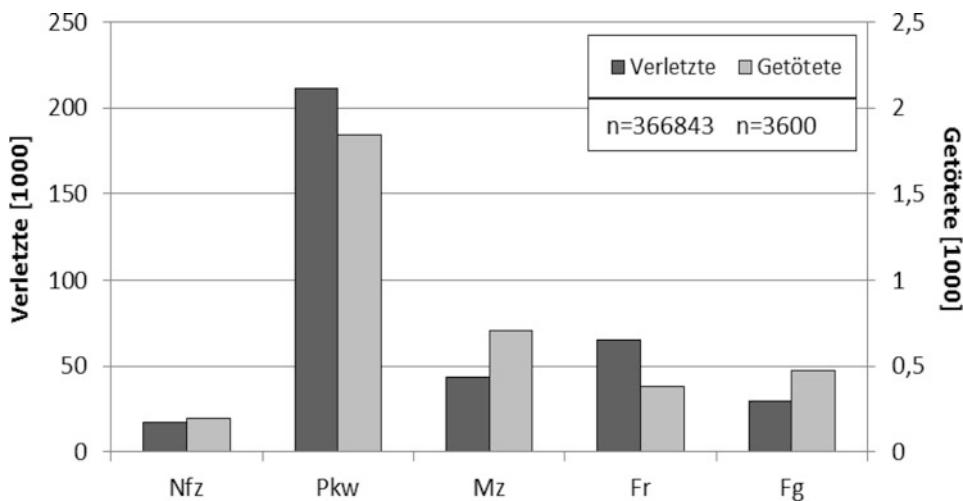


Abb. 2.9 Verletzte und Getötete der Beteiligten bei verschiedenen Unfallarten (Deutschland 2010) [StBA 12/1]

Um bei einer quantitativen Bewertung der Unfallarten untereinander Doppelzählungen zu vermeiden, soll es zunächst genügen, die Zahl der Verletzten oder der Getöteten der betrachteten Betroffenen zu ermitteln und daraus eine Rangfolge abzulesen. Eine derartige Gegenüberstellung wird für Deutschland in Abb. 2.9 vorgenommen.

Es ist zu erkennen, dass der Pkw-Unfall die Unfallart ist, die mit den höchsten Zahlen an Verletzten und Getöteten (nur Fahrzeuginsassen) die größte Bedeutung im Unfallgeschehen hat. Zu erkennen ist ferner, dass die gefährlichsten Unfallarten der Fußgängerunfall und der Motorradunfall ist, da hier das Verhältnis von Getöteten zu Verletzten am höchsten ist. In Bezug auf die Unfallart ist anzumerken, dass dieser Begriff in der amtlichen Unfallstatistik die Stellung der Kontrahenten zueinander beschreibt. Hier werden die folgenden Ausprägungen unterschieden: Unfall mit Fahrzeug, dass anfährt, anhält oder steht; Unfall mit Fahrzeug, dass vorausfährt oder wartet; Unfall mit Fahrzeug, dass seitlich in gleicher Richtung fährt; Unfall mit Fahrzeug, dass entgegenkommt; Unfall mit Fahrzeug, dass entgegenkommt oder kreuzt; Zusammenstoß zwischen Fahrzeug und Fußgänger; Aufprall auf Hindernis auf der Fahrbahn; Abkommen von der Fahrbahn nach rechts; Abkommen von der Fahrbahn nach links; Unfall anderer Art.

Der *Unfalltyp* beschreibt die Situation des Verkehrsablaufes beim Unfall, siehe Abb. 2.8, und wird in dieser Form auch in der polizeilichen Unfalldokumentation verwendet. Unter Berücksichtigung der Einteilung, der polizeilichen Unfallaufnahme, ergeben sich folgende sieben Unfalltypen [StBA 12/2]:

- Fahrunfall
- Abbiegeunfall

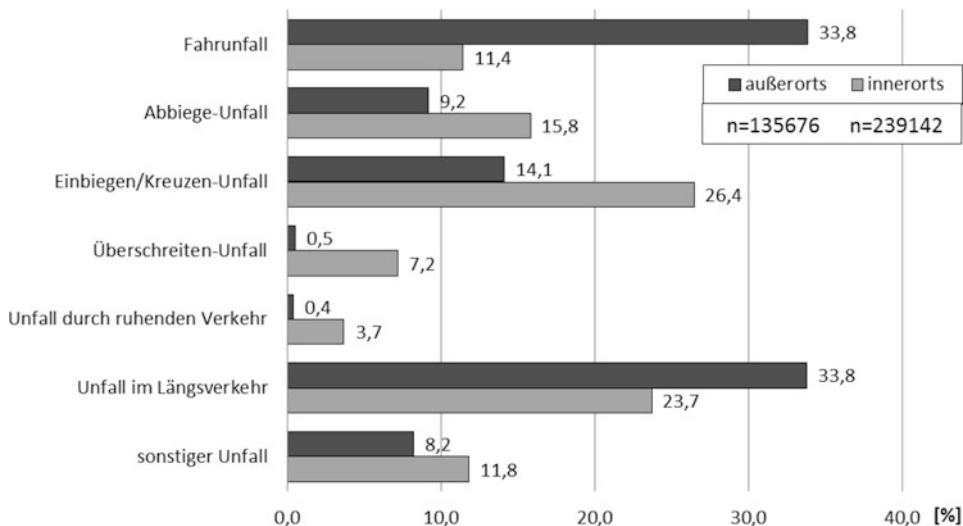


Abb. 2.10 Häufigkeiten der Unfalltypen für Unfälle außerorts und innerorts im Jahr 2010 [StBA 12/2]

- Einbiege-, Kreuzungsunfall
- Überschreitungsunfall
- Unfall durch ruhenden Verkehr
- Unfall im Längsverkehr
- Sonstiger Unfall.

Die Häufigkeiten dieser Unfalltypen sind, unterschieden nach Ortslage, in Abb. 2.10 dargestellt. Bei den innerorts stattfindenden Unfällen zeigen erwartungsgemäß die Einbiege-/Kreuzungs-Unfälle gefolgt von der Unfällen im Längsverkehr eine ausgeprägte Dominanz, während bei Unfällen außerorts die Fahrerunfälle und die Unfälle im Längsverkehr vorherrschen.

Bei Unterteilung des Unfalltyps in Abhängigkeit des Alters des Unfallverursachers, lassen sich kritische Situationen für die entsprechenden Altersgruppen ableiten, Abb. 2.11 (die Daten wurden im Rahmen einer Sonderabfrage beim Statistischen Bundesamt erhoben). Das Risiko einen Fahrerunfall oder einen Unfall im Längsverkehr zu verursachen, sinkt mit dem Alter, während das Risiko einen Unfall im Querverkehr (Unfalltypen Abbiegeunfall, Einbiegen/Kreuzen Unfall) zu verursachen, mit dem Alter ansteigt.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass im Rahmen der Unfallforschung im Allgemeinen der sogenannte erweiterte Unfalltyp verwendet wird, mit Hilfe dessen die Situation im Verkehrsablauf detaillierte (z. B. aus welcher Richtung die Beteiligten in Bezug auf einander kamen) beschrieben werden kann, Verwendung findet.

Diese 3-stellige Kennzahl des Unfalltyps kann aus einem Gesamtkatalog mittels Bezug zu Piktogrammen, die die Unfallsituation darstellen, ermittelt werden. Hierdurch wird der

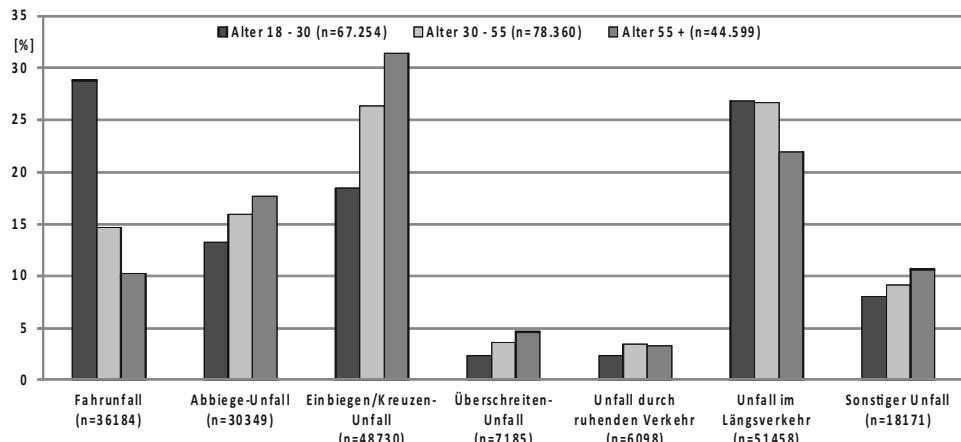


Abb. 2.11 Häufigkeiten der Unfalltypen in Abhängigkeit des Alters des Unfallverursachers im Jahr 2010

Verkehrsvorgang bzw. die Konfliktsituation detaillierter beschrieben, aus der der Unfall entstanden ist. Der erweiterte Unfalltyp bezeichnet den genauen Verkehrsvorgang (z. B. Fahren in einer Kurve) bzw. die Konfliktsituation (z. B. Fahrzeug/Fußgänger von rechts), woraus der Unfall entstanden ist. Dargestellt wird nur die unfallauslösende Situation bzw. der Konflikt. Als Konflikt gilt hier die gleichzeitige Annäherung von Verkehrsteilnehmern (Konfliktpartnern) an eine Straßenstelle, an der sie unter Umständen zusammenstoßen können.

Beispiels eines unmittelbar vor einer Kreuzung die Fahrbahn betretenen Fußgängers, der vor einem herannahenden Fahrzeug von rechts auf die Fahrbahn tritt, werden verschiedene Unfallsituationen des gleichen erweiterten Unfalltyps erläutert, siehe Abb. 2.12. In dieser Situation wäre es denkbar, dass der Fahrzeugführer noch rechtzeitig bremsen konnte und der Fußgänger nicht zu Schaden kam, es jedoch zu einem Auffahrunfall mit einem nachfolgenden Fahrzeug kam, dass das Fahrzeug mit dem Fußgänger oder bei einem Ausweichmanöver mit einem entgegenkommenden Fahrzeug zusammenstieß oder von der Fahrbahn abgekommen sein könnte. Typ bestimmt bei diesen Beispielen ist jedes Mal der Konflikt zwischen dem Fahrzeug und dem Fußgänger, weil der Unfall dadurch ausgelöst wurde. Es liegt hier in jedem Fall ein „Überschreitenunfall“ vor, und zwar der Typ 451. Der Unfall würde auch dann zu Typ 451 gehören, wenn es zu diesem Konflikt auf einem Zebrastreifen oder auf einer lichtzeichengeregelten Fußgängerfurt gekommen wäre, unabhängig davon, ob der Fußgänger oder der Fahrer die Lichtzeichen missachtet hätte.

In Bezug auf den Unfalltyp und damit auch auf den erweiterten Unfalltyp ist zu beachten:

- Für die Bestimmung des Unfalltyp entscheidend ist allein der Verkehrsvorgang bzw. der Konflikt, der zu dem Unfall führte.

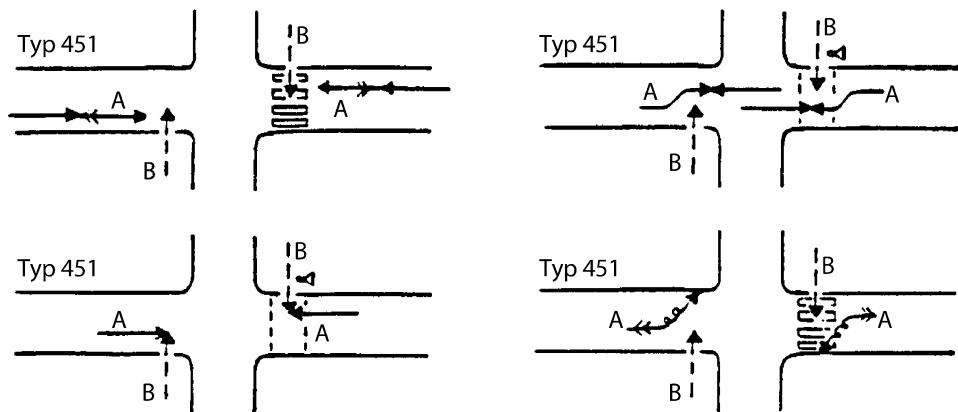


Abb. 2.12 Verschiedene denkbare Unfallsituationen ausgelöst durch einen Konflikt mit einem Fußgänger von rechts (erweiterter Unfalltyp 451)

- Ob und wie Verkehrsteilnehmer kollidiert sind, also die „Unfallart“, ist für die Bestimmung des Unfalltypes nicht von Bedeutung.
- Das Fehlverhalten der Verkehrsteilnehmer, also die „Unfallursache“, spielt für die Bestimmung des Unfalltypes grundsätzlich keine Rolle. Das gilt auch für eine eventuelle Beeinflussung durch Alkohol oder Drogen sowie für Übermüdung.
- Glätte und Schlüpfrigkeit der Fahrbahn (z. B. Eis, Wasserfilm, Öl, Lehm) sowie Witterungseinflüsse (z. B. Nebel) sind bei der Typisierung nicht zu berücksichtigen.

Die Unfalltypenkennzahlen sind dabei dem Katalog des GDV nach den Haupt-Unfalltypen gegliedert. Ein Auszug für Fahrunfälle ist beispielhaft im Anhang eingefügt.

2.4 Kollisionsart und Kollisionstyp

Die *Kollisionsarten* beschreiben die an einer Kollision beteiligten Kontrahenten, z. B. Pkw-Pkw-Kollision oder Nfz-Fußgänger-Kollision. Durch Angabe der Häufigkeiten der Kollisionen bzw. der Verletzten, der Getöteten oder der Verletzungskosten einer Kollisionsart lässt sich diese in ihrer Signifikanz quantifizieren und mit anderen Kollisionsarten vergleichen. Es besteht hier nicht, wie bei der Quantifizierung der Unfallarten, die Gefahr der Mehrfachzählung.

Zur Darstellung der Kollisionsarten kann das Unfallgeschehen in einer Matrix zusammengefasst werden, wobei jedem Matrixelement eine Kombination zwischen zwei (gleichen oder unterschiedlichen) Kollisionskontrahenten zugeordnet wird [Appel 73; Kramer 09]. Dadurch, dass nur die obere Hälfte der Matrix ausgefüllt wird, bleiben die Zuordnungen eindeutig und es braucht z. B. nicht zwischen Pkw/Nfz- und Nfz/Pkw-Kollisionen unterschieden zu werden.

Tab. 2.2 Kollisionsarten-Matrix für Kollisionen mit Verletzten (Anzahl der Alleinunfälle und der Unfälle mit zwei Beteiligten, Deutschland 2010) [StBA 11/2]

	Nfz	Pkw	Mz	Fr	Fg	Alleinunfälle
Nfz	1.886	9.620	1.747	2.790	1.848	3.328
Pkw		74.797	16.225	28.996	15.352	31.537
Mz			742	572	386	10.833
Fr				4.378	2.030	10.799
Fg					0	0

Tab. 2.3 Kollisionsarten-Matrix für Kollisionen mit Getöteten (Anzahl der Alleinunfälle und der Unfälle mit zwei Beteiligten, Deutschland 2010) [StBA 11/2]

	Nfz	Pkw	Mz	Fr	Fg	Alleinunfälle
Nfz	51	49	43	55	57	61
Pkw		384	165	64	173	693
Mz			26	4	3	206
Fr				8	3	74
Fg					0	0

In den Tab. 2.2 und 2.3 sind Kollisionsarten-Matrizen für zwei Fälle angegeben: Zahl der Kollisionen mit Verletzten sowie Zahl der Kollisionen mit tödlich Verletzten. Mit dieser Kollisionsarten-Zuordnung können alle Kollisionen mit zwei Beteiligten und Kollisionen eines Beteiligten mit Hindernissen (Alleinunfall) erfasst werden. Beteiligte sind Nutzfahrzeuge (Nfz), Personenkraftwagen (Pkw), motorisierte Zweiräder (Mz), Fahrräder (Fr) und Fußgänger (Fg). Nicht erfasst werden in der Kollisionsarten-Matrix Mehrfachkollisionen, d. h. Kollisionen zwischen mehr als zwei Beteiligten.

Aus den Tab. 2.2 und 2.3, die sich auf das Unfallgeschehen in Deutschland im Jahre 2010 beziehen, lassen sich im Hinblick auf Schwerpunkte und Prioritäten u. a. folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- die häufigste Kollisionsart ist die Pkw/Pkw-Kollision, gefolgt vom Pkw-Alleinunfall, von der Pkw/Fr-Kollision; Pkw/Mz- und Pkw/Fg-Unfälle kommen in etwa gleich häufig vor (Tab. 2.2)
- die Kollisionsarten mit den größten Zahlen der Getöteten sind der Pkw-Alleinunfall und die Pkw/Pkw-Kollision, gefolgt von Mz-Alleinunfällen und der Pkw/Fg-Kollision (Tab. 2.3).

Eine tiefere Strukturierung und Beschreibung des Unfallgeschehens, über die Unfallart, den Unfalltyp und die Kollisionsart hinausgehend und z. B. Wurfweiten bei Fußgängerunfällen enthaltend, wäre für die Analyse von Verkehrsunfällen zwar nützlich und zumindest interessant, kann aber über die polizeilichen Erhebungen und damit über die Angaben des

Kollisionstyp KT I	KT II	KT III	KT IV
KT V	KT VI	KT VII	KT VIII
KT IX	KT X	KT XI	KT XII

Abb. 2.13 Kollisionstypen der Pkw-Pkw-Unfälle

Statistischen Bundesamtes nicht erfolgen. Eine derartige Vertiefung erfolgt auf der Basis spezieller Unfallerhebungen (s. Kap. 3).

Mit Hilfe der *Kollisionstypen* wird innerhalb einer Kollisionsart die Stellung der Kollisionskontrahenten unmittelbar vor dem Zusammenprall beschrieben. Beispielsweise sind für die Kollisionsart Pkw/Pkw in Abb. 2.13 die möglichen und im realen Unfallgeschehen beobachteten Kollisionstypen dargestellt. Für die Frontalkollision, die Seitenkollision und den Auffahrungsunfall sind jeweils vier Konstellationen angegeben. Diese Einteilung wurde von Experten innerhalb des umfassenden Forschungsprojektes VOI [Richter 84] so festgelegt. Andere Einteilungen sind möglich.

Die Informationen der Bundesstatistik reichen nicht aus, die 12 Kollisionstypen mit Zahlen zu belegen und ihre Häufigkeit bzw. Relevanz zu bestimmen. Dazu sind vertiefte Unfallerhebungen nötig. Auf Basis von GIDAS (German Indepth Accident Study) können Unfalldaten der örtlichen Unfallerhebungen in Hannover und Umgebung sowie Dresden und Umgebung weitere Informationen liefern [Richter 84; Kramer 09; GIDAS 99; BASt 09; Otte 03].

Die Dominanz der Frontalkollision mit etwa 55 % vor der Seitenkollision mit etwa 38 % ist klar zu erkennen (Tab. 2.4). Die Kollisionstypen nach Abb. 2.13 sind offenbar so fein gestuft, dass beispielsweise bei den Offset-Frontalkollisionen in der Unfallauswertung nicht immer zwischen einem schrägen und einem geraden Stoß unterschieden werden kann. Von besonderer Bedeutung sind die Kollisionstypen für die Nachbildung des realen Unfallgeschehens in möglichst wenigen, aber aussagekräftigen Crashtests. So lehnen sich heute

Tab. 2.4 Häufigkeiten der Kollisionstypen für Pkw-Pkw-Unfälle [Kramer 09]

Frontalkollision	Kollisionstypen II und IV	34,1 %
	Kollisionstypen I und III	21,7 %
Seitenkollision	Kollisionstypen V und VI	21,6 %
	Kollisionstypen VII und VIII	16,1 %
Auffahrunfall	Kollisionstypen IX und XI	4,0 %
	Kollisionstypen X und XII	2,5 %
		100,0 %

gesetzlich vorgeschriebene Crashtests an die Kollisionstypen I und II bei der Frontalkollision und V bei der Seitenkollision an.

Bei Unfällen mit motorisierten Zweirädern lassen sich unterschiedliche Kollisionstypen bei den hier gebildeten Gruppen von Zweirädern finden (Abb. 2.14), die die resultierenden Verletzungen aus den sich hieraus ergebenden Bewegungsverhalten von Zweirad und Aufsassen bei der Kollision bedingen. Die hier verwendeten Kollisionstypen basieren auf einer in früheren Publikationen [Otte 87] und wissenschaftlich anerkannten Einteilung in 7 unterschiedliche Gruppen, bei der die Fahrzeulgängsachsen und deren Winkel der miteinander kollidierenden Fahrzeuge unmittelbar vor dem Anprall mittels 6 Kollisionstypen betrachtet und für den Fahrzeuganprall in rechtwinklig und schräg unterschieden werden. Zusätzlich wird auch der Alleinunfall des Krades als Typ 7 mit einbezogen.

Die schwerwiegendsten Folgen treten in Kollisionstypen auf, bei dem das Zweirad derart mit dem Pkw/Lkw kollidiert, dass der Körper relativ gegen das Chassis des Kollisionspartners prallen kann. Es erscheinen die Typen 2 bis 4 eines schräg aufprallenden Zweirades gegen die Front bzw. die Seite eines Fahrzeuges und der Alleinunfall mit einem relativ hohen Anteil MAIS 3+ verletzter Personen. Dominierend sind Motorräder Alleinunfälle mit 45,9 % und einem Anteil MAIS 3+ Verletzter von 10,9 % (bezogen auf alle Fahrer dieses Kollisionstyps). Für die Gruppe der anderen motorisierten Zweiräder zeichnet sich eine ähnliche Verteilung der Kollisionstypen ab (Abb. 2.14 unten). Alleinunfälle sind hier mit 37,6 % nicht ganz so häufig wie bei Motorrädern mit 45,9 %, allerdings sind Kollisionen des Zweirades frontal gegen die Front des Pkw/Lkw (Typ 1 und 2) häufiger. Der Anstoß des Zweirades schräg gegen die Seite eines Pkw/Lkw sind besonders häufig (20,6 % bei Motorrädern, 23 % bei der Gruppe der anderen Krafträder).

2.5 Aufprallart und Aufpralltyp

Die *Aufprallart* beschreibt für einen einzelnen Kollisionsbeteiligten die fahrzeugbezogene Lage der Beschädigung bzw. der Stoßrichtung. Dabei ist es unerheblich, welches der Kollisionskontrahent ist, welche Kollisionsart und welcher Kollisionstyp vorliegt. Im einfachsten Fall wird zwischen folgenden Aufprallarten unterschieden:

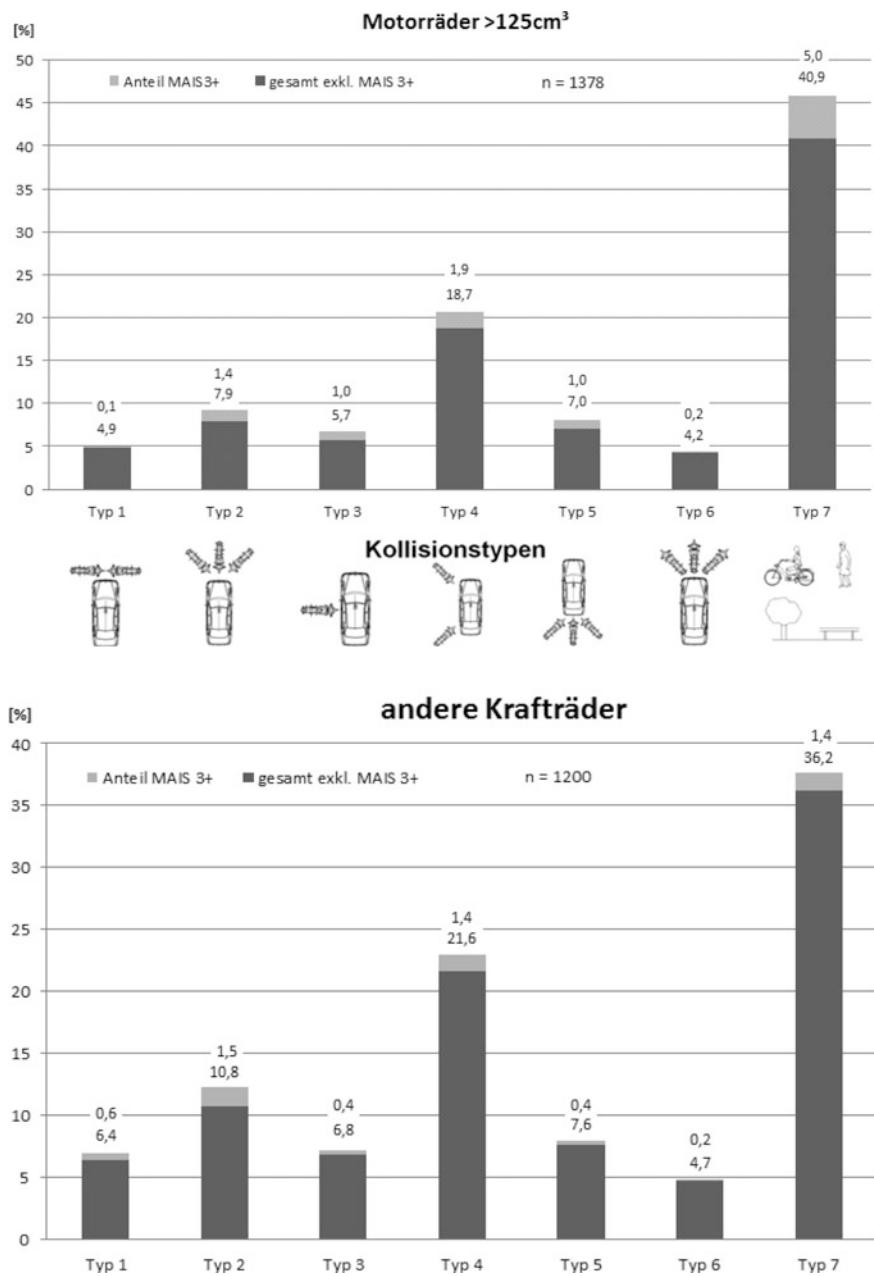


Abb. 2.14 Kollisionstypen motorisierter Zweiräder und Anteile MAIS 3+ der Fahrer [Otte 13]

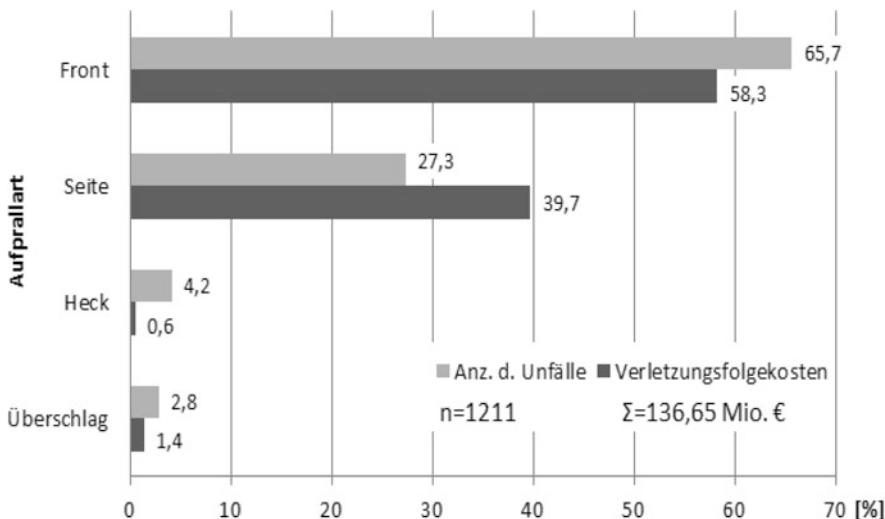


Abb. 2.15 Aufprallarten bei Pkw-Kollisionen nach Häufigkeit und nach Verletzungsfolgekosten [Kramer 09]

- Frontalaufprall,
- Seitenaufprall,
- Heckaufprall,
- Überschlag.

Dem Frontalaufprall eines Pkw kann beispielsweise die Kollisionsart Pkw/Nfz, Pkw/Hindernis oder der Kollisionstyp Auffahrunfall zu Grunde liegen. Allein aus den Beschädigungen und Deformationen des einzelnen, in irgendeine Kollision verwickelten Pkw kann auf die Aufprallart geschlossen werden. Die Aufprallart „Überschlag“ passt sich nicht nahtlos in dieses Definitionsschema ein, ist aber nach allgemeinem Verständnis als eine der vier Aufprallarten festgelegt worden.

Bei Pkw-Unfällen dominiert der Frontalaufprall nach Häufigkeit mit 66 % vor dem Seitenaufprall mit 27 % (siehe Abb. 2.15). Bei der Wahl der Kriterien Getötete oder Verletzungsfolgekosten, zeigt sich die besondere Gefährdung durch den Seitenaufprall. Würden nicht nur Unfälle mit Verletzten, sondern alle Unfälle zu Grunde gelegt werden, würde der Anteil des Heckaufpralls stark ansteigen. Aus diesen Anmerkungen lässt sich erkennen, dass Ergebnisse von Unfalluntersuchungen in starkem Maße vom Untersuchungsmaterial und dessen Abgrenzungen abhängen (siehe z. B. Unterschiede zwischen Abb. 2.15 und 2.18). Nach neuesten Untersuchungen sind, da die AIS-Skala Langzeitverletzungen nicht berücksichtigen kann, die Verletzungsfolgekosten des Heckaufpralls infolge des HWS-Schleudertraumas bedeutend höher einzustufen als in Abb. 2.15 dargestellt.

Der *Aufpralltyp* spezifiziert die pauschalen Angaben der Unfallart, indem für Beschädigungen und für Stoßrichtungen genauere Angaben gemacht werden. Bei den

Abb. 2.16 Einteilung der Aufpralltypen für frontal kollidierende Pkw nach der Collision Deformation Classification (CDC) [SAE J224 94]

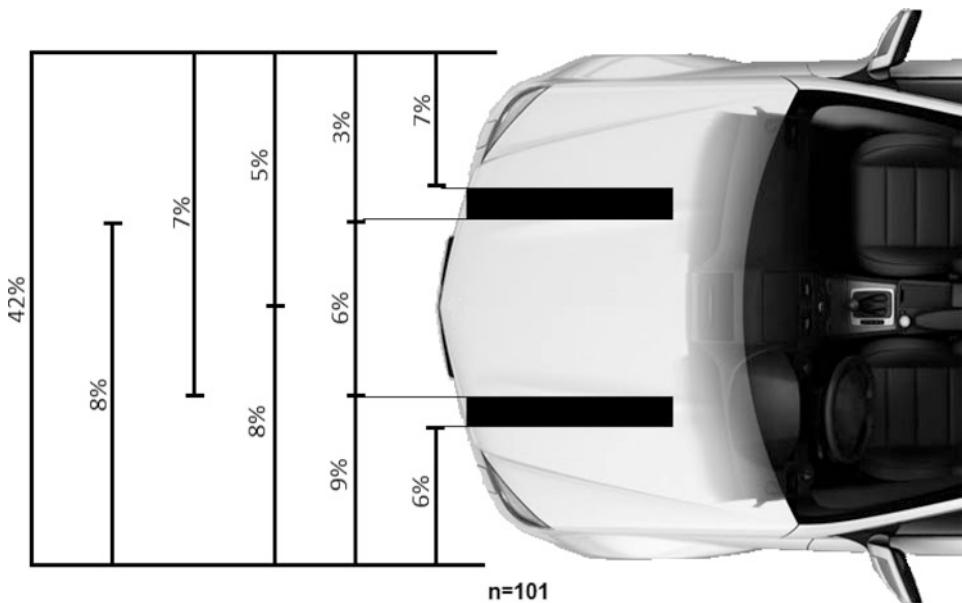
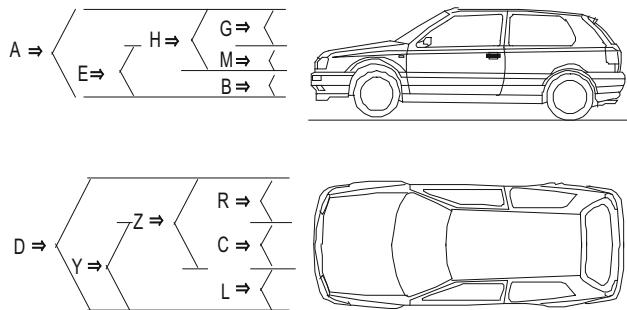


Abb. 2.17 Häufigkeiten der Aufpralltypen für die Pkw-Front (Modelljahr 2000 und später) nach der CDC [FIMCAR 11]

Beschädigungen werden der genaue Bereich und das Ausmaß der Deformationen, der Überdeckungsgrad und ggf. die Intrusionen angegeben. Die Beschreibung der Deformationen kann mit Hilfe des „Beschädigungsgrades“ (BG) [Langwieder 76; HUK 94], des „Vehicle Deformation Index“ (VDI), des „Vehicle Interior Deformation Index“ (VI-DI) [SAE J224], des Beschädigungsgrades oder der vergleichbare „Collision Deformation Classification“ (CDC) [SAE J224] erfolgen, siehe Abb. 2.16.

Die Abb. 2.17, 2.18 und 2.19 enthalten quantitative Angaben zu den Häufigkeiten der Beschädigungen und der Anstoßrichtungen im Frontbereich von Pkw. Es ist zu erkennen, dass der häufigste Aufpralltyp beim Frontalaufprall der Schrägaufprall vorn links mit teilweiser Überdeckung (Offset) ist. In der Europäischen Gesetzgebung ist dies mit dem

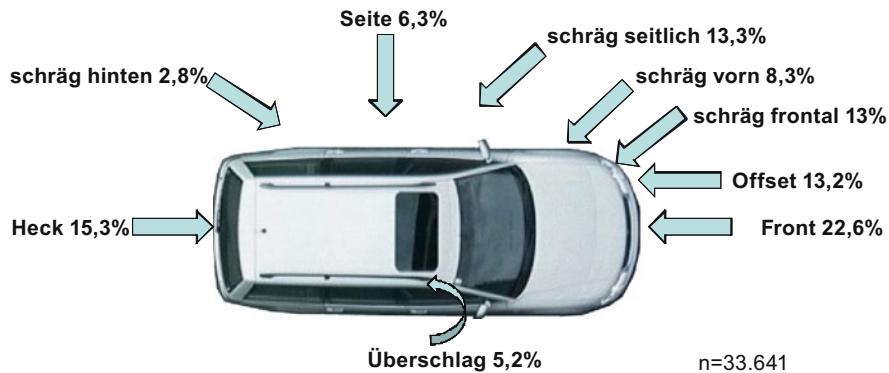
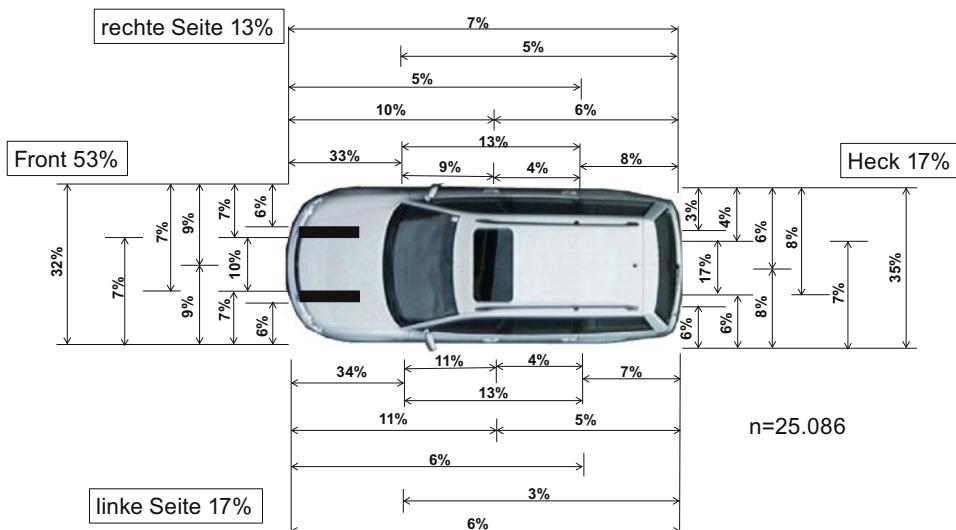


Abb. 2.18 Häufigkeit von Anstoßrichtungen beim Pkw-Aufprall. Anstöße links und rechts zusammengefasst. Nach GIDAS Daten von Juli 1999 bis Juni 2012 [Otte 13]



100% je Fahrzeugteil, bei Mehrfachkollisionen wurde die schwerste Kollision bewertet

Abb. 2.19 Häufigkeit der Aufpralltypen für Pkws. Nach GIDAS Daten von Juli 1999 bis Juni 2012 [Otte 13]

Frontaufprall nach ECE-R 94 bzw. Richtlinie 96/79/EG, abgesehen von der schrägen Anstoßrichtung, berücksichtigt worden, siehe Tab. 3.6. In der Gesetzgebung wird im Sinne der Abbildung der Unfallrealität versucht, häufig auftretende, relevante Aufprallarten aller Kollisionstypen durch entsprechende Crash-Tests zu repräsentieren, siehe für den Pkw-Unfall die Tab. 3.6, 3.7 und 3.8.

2.6 Belastungs- und Verletzungsarten des Menschen

Die bisherigen Einteilungen und Abgrenzungen bezogen sich auf die Unfallsituation und auf äußere Merkmale der Unfallbeteiligten, vornehmlich auf Merkmale der beteiligten Fahrzeuge. Hier wird nun auf den Menschen eingegangen, der in einen Unfall verwickelt ist. Der Mensch im Unfall wird entweder als

- „ungeschützter Verkehrsteilnehmer“ wie Fußgänger, Radfahrer, Motorradfahrer (allgemeiner ausgedrückt als Aufsasse eines motorisierten Zweirades) oder als
- „geschützter Verkehrsteilnehmer“ wie Pkw-Insasse (Fahrer, Beifahrer, Fondinsasse) oder als Nfz-Insasse im Lkw oder Bus

betroffen. Die Verletzungen, die an den verschiedenen Körperregionen wie Kopf, Hals, Thorax, Abdomen, Becken, Extremitäten (untere und obere) auftreten können, werden von äußeren Unfallparametern wie Aufprallgeschwindigkeit oder Art des Hindernisses, von den Struktureigenschaften des Fahrzeuges wie nachgiebiger Vorbau oder steifer Fahrgastzelle u. a. bestimmt. In sehr weitem Maße haben aber auch die direkt wirkenden Schutzsysteme für den Menschen Einfluss auf Art und Schwere der Verletzungen, z. B.:

- Motorradfahrer-Schutzkleidung einschließlich Helm
- Verbundsicherheitsglas
- Gurtsystem
- Innenraumpolsterung, nachgiebige Armaturentafel, nachgiebige Lenkanlage
- Front-Airbags mit Innenraumsensierung und Stufenauslösung
- Seiten-Airbags für Kopf- und Brustbereich
- Türverriegelungen, die gegenüber Frontaufprall oder Überschlag resistent sind,

um nur einige wichtige Schutzsysteme zu nennen. Bei Unfällen ist der Mensch üblicherweise verteilt wirkenden Kontaktkräften ausgesetzt. Aber auch lokal einwirkende Belastungen, wie sie bei Intrusionen in den Fahrgastrraum auftreten können, sind von Bedeutung. Allgemein lassen sich folgende *Belastungsarten* bei Unfällen für den Menschen unterscheiden:

- direkte Krafteinwirkung mit „stumpfer Gewalt“ (z. B. Gurt, Airbag für Fahrzeuginsassen, Fronthaube bei der Kollision eines Pkw mit einem Fußgänger)
- direkte Krafteinwirkung mit „spitzer Gewalt“ (z. B. Aufprall des Kopfes auf eine Pfostenkante, Spaltung der Patella durch ungeschickt angebrachten Zündschlüssel, Durchbohrung des Thorax durch steife Lenksäule)
- indirekte Krafteinwirkung durch Übertragung der auf gewisse Körperteile direkt eingeleiteten Kräfte als Trägheitskräfte, die auf andere Körperteile wirken (z. B. Contrecoup-Verletzungen an der stoßabgewandten Seite des Gehirns, Schädel-Hirn-Traumata, Hyperextensionen oder Hyperflexionen der Gelenke oder der Wirbelsäule durch die

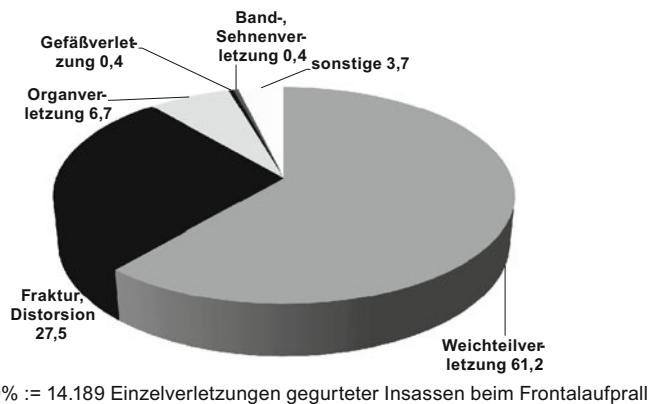


Abb. 2.20 Aufteilung der Verletzungsarten für gegurtete Pkw-Insassen beim Pkw-Frontalaufprall.
Nach GIDAS Daten von Juli 1999 bis Juni 2012 [Otte 13]

Trägheitswirkung des Kopfes gegenüber im Thorax eingeleiteten Kräften). Kennzeichnend für Verletzungen infolge indirekter Krafteinwirkung ist, dass keine Prellungen, äußere Hämatome, Weichteilverletzungen zugeordnet werden können.

Für die *Verletzungsart* der Verunglückten lässt sich folgende vereinfachte Unterteilung angeben:

- Weichteilverletzungen
- Organverletzungen
- Gefäßverletzungen
- Frakturen
- Rupturen
- Bänder- und Sehnenverletzungen
- Verbrennungen.

Die häufigsten Verletzungen bei Frontalunfällen gegurteter Insassen sind die Weichteilverletzungen, gefolgt von Frakturen und Organverletzungen, siehe Abb. 2.20.

3.1 Bearbeitungskette von der Unfallerhebung bis zur Unfallforschung

Basis der Unfallforschung ist der einzelne Unfall. In der Bearbeitungskette von der Unfallerhebung bis zur Unfallforschung liegen Tätigkeitsfelder, deren Inhalte heute nur teilweise mit einheitlich angewandten Begriffen belegt sind. In Abb. 3.1 ist versucht worden, diese Bearbeitungskette mit klar abgegrenzten Begriffen in logischer Abfolge darzustellen und die Verbindung mit der Rechtsprechung und der Sicherheitsforschung herzustellen.

Ausgehend von der „Unfallerhebung“ (Unfallaufnahme) am Unfallort erfolgt auf Grundlage der erhobenen „Spuren“ die fachgebundene „Unfallrekonstruktion“ und danach die interdisziplinäre „Unfallaufklärung“. Die Unfallaufklärung bezieht sich auf einen einzelnen Unfall und ist die Grundlage für die strafrechtliche und/oder zivilrechtliche Auseinandersetzung („Rechtsprechung“) zu diesem Unfall.

In der „Unfallanalyse“ werden eine Vielzahl von Unfällen (statistisch) ausgewertet. Die „Unfallforschung“ bezieht zusätzliche methodische Aspekte ein. Auf der Unfallforschung baut die „Sicherheitsforschung“ auf, indem sie Ausgangspunkt für Sicherheitsmaßnahmen ist und später die Kontrolle für die Wirksamkeit dieser Maßnahmen liefert.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Unfallforschung die Unfallanalyse, diese die Unfallaufklärung und diese die Unfallrekonstruktion einschließt. Eingabeparameter der Unfallrekonstruktion sind die bei der Unfallerhebung ermittelten Spuren (juristisch: „Anknüpfungstatsachen“). Im Weiteren sollen die einzelnen Tätigkeitsfelder hinsichtlich der beteiligten Akteure, der angewandten Methoden und der angestrebten Ergebnisse dargestellt werden.

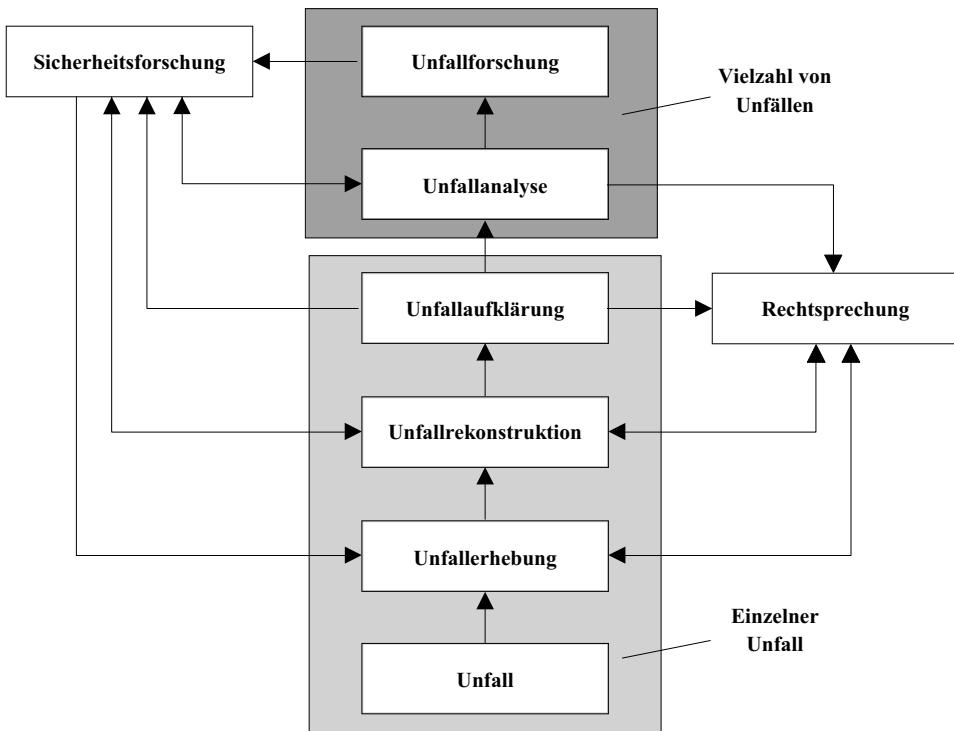


Abb. 3.1 Bearbeitungskette Unfallerhebung – Unfallforschung

3.2 Unfallerhebungen

Ausgehend von dem einzelnen Unfall werden Unfallerhebungen bzw. Unfallaufnahmen direkt am Unfallort vorgenommen. Ziel ist die Erfassung aller für eine nachfolgende Unfallrekonstruktion nötigen „Spuren“, „Daten“, „Anknüpfungstatsachen“ wie Reifenspuren, Fahrzeugbeschädigungen, Unfallursachen, Verletzungen u. a. mehr, siehe Abb. 3.2. Die Unfallerhebungen erfolgen im allgemeinen durch die Polizei, in Sonderfällen durch Unfallsachverständige und durch Krankenhäuser aber auch durch spezielle Forschungsteams von Universitäten, Fahrzeugherstellern oder staatlichen Institutionen. Da bei der Unfallaufnahme nicht immer alle späteren Fragestellungen vorhersehbar sind, gilt als Grundsatz, im vorgegebenen Rahmen so viele Daten wie möglich so genau wie angemessen aufzunehmen. Denn Zahl und Qualität der aufgenommenen Daten bestimmen die Güte einer späteren Unfallaufklärung.

Unfallerhebungen umfassen grundsätzlich die vier Unfallphasen (s. Abschn. 2.2)

- Einlaufphase
 - Kollisionsphase

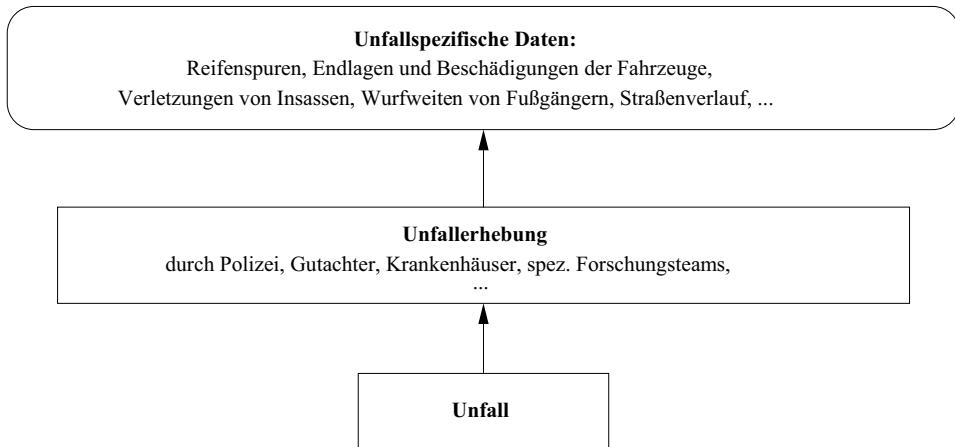


Abb. 3.2 Unfall und Unfallerhebung

- Auslaufphase
- Folgephase

und die drei Unfall-Komponenten, -Aspekte, -Regelkreisglieder

- Mensch, Beteiligte (Größe, Geschlecht, Sitzposition, Wurfweite, Verletzungen, Alkohol ...)
- Technik, Fahrzeug (Fahrzeugtyp, -mängel, Beschädigungen, Kollisionspunkt, Wischspuren, Gurte, Airbag ...)
- Umfeld, Situation (Konfliktsituation, Kollisionsort, Straße, Wetter, Signalanlagen ...).

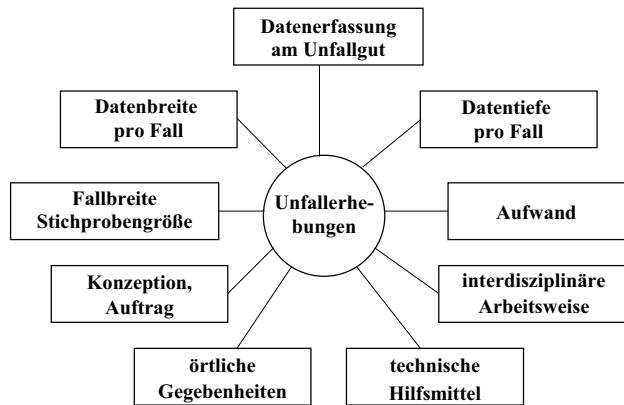
Unter den in den Unfallphasen bei den drei Unfallkomponenten aufgenommenen Daten, Spuren, Anknüpfungstatsachen können wiederum drei Arten, Typen unterschieden werden:

- beschreibbare Daten (Beteiligte, Fahrzeugtyp, Straßenführung, offene Verletzungen, Wetterlage ...)
- messbare Daten (Reifenspuren, Unfallskizze, Endlagen, Straßenbelag, Bereifung, ...)
- ermittelbare Daten (Reibwerte, Bremsenfunktion, innere Verletzungen, EES, ...).

In [Burg 09] wird folgende Einteilung getroffen:

- allgemeine Unfalldaten
- Daten vom Unfallort
- Daten vom Unfallfahrzeug

Abb. 3.3 Besonderheiten bei Unfallerhebungen je nach Gegebenheiten, Aufnahmezweck und Art der Unfallaufklärung



- Daten von Unfallbeteiligten
- sonstige Unfalldaten.

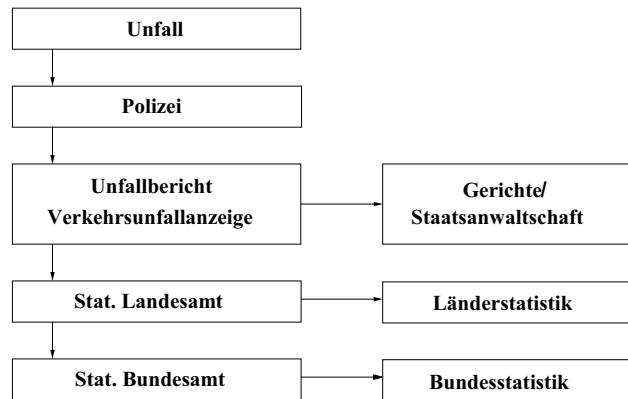
Neben diesen „unfallspezifischen Daten“ werden später für die Unfallrekonstruktion allgemein gültige „Grundlagendaten“ oder „Grunddaten“ benötigt, s. Abschn. 3.3. Im Zuge der Unfallrekonstruktion erweisen sich üblicherweise einige unfallspezifische Daten als tragend, andere als wichtig und wieder andere als überflüssig. Zu den besonders wichtigen unfallspezifischen Daten gehören beispielsweise die Reifenspuren auf der Straße, die Endlagen von Fahrzeugen oder Fußgängern, die Einlauf- und Auslaufrichtungen und der Kollisionsort, zusammengefasst in einer genauen Unfallskizze. Außerdem sind von besonderer Wichtigkeit z. B. die äußereren Fahrzeugdeformationen und die Zuordnung von Verletzungen zu verletzungsverursachenden Fahrzeugteilen. Dringend angeraten ist in Zweifelsfällen die Angabe der Daten mit Toleranzen, um auch für das Ergebnis zu Ober- und Untergrenzen zu kommen.

Umfang und Tiefe der Daten sind je nach aufnehmender Institution (siehe Abb. 3.3) und ihrem Auftrag unterschiedlich. Im Anhang A.2 sind als Beispiele einige Unfallerhebungsbögen des interdisziplinären Forschungsteams an der Medizinischen Hochschule Hannover beigefügt.

In [DIN 92] werden in ausführlicher Weise „Begriffe zu Spurenarten und Spurenmerkmalen“ und „Merkmale für Datenerhebung“ definiert. Diese Definitionen decken sich weitgehend mit den hier getroffenen Festlegungen. Nach [DIN 92] wird zwischen „Primärerhebungen“ und „Sekundärerhebungen“ unterschieden. Insgesamt ergeben sich damit folgende drei Kategorien der Datenerhebung:

- unmittelbare Primärerhebungen: Datenerhebungen direkt nach dem Unfall und direkt am Unfallort, Unfallerhebungen am Unfallort
- retrospektive Primärerhebungen: Datenerhebungen anderorts und später, aber direkt am Unfallgut (z. B. an den Verletzten in Kliniken oder an den Unfallfahrzeugen auf dem Schrottplatz)

Abb. 3.4 Verwendung der Daten der polizeilichen Unfallaufnahme



- retrospektive Sekundärerhebungen: Nutzung des Datenmaterials, das von anderer Seite in Primärerhebungen bereits erhoben wurde.

3.2.1 Polizeiliche Unfallerhebungen

Als wichtigste Institution, die am Unfallort und am Unfallgut unmittelbar nach dem Unfall die Daten aufnimmt, ist die Polizei zu nennen. Ihre Unfallaufnahme (Verkehrsunfallanzeige) erfolgt im Hinblick auf die spätere Klärung der Schuldfrage der Beteiligten im Sinne des Verfolgungsauftrages gemäß § 163 StPO und § 53 OWiG. Darüber hinaus dient sie der allgemeinen Verkehrssicherheit durch Erkennen von Unfallursachen und Unfallschwerpunkten, indem die Aufnahmedaten in aggregierter Form in die Länderstatistiken und die Bundesstatistik eingehen, siehe Abb. 3.4. Rechtsgrundlage für die Zusammenstellung der Straßenverkehrsunfalldaten ist mit der letzten Änderung im Jahre 2007 das „Straßenverkehrsunfallstatistikgesetz“ (StUnfStatG). Danach wird über Unfälle, bei denen infolge des Fahrverkehrs auf öffentlichen Wegen oder Plätzen Personen getötet oder verletzt oder Sachschäden verursacht worden sind, eine Bundesstatistik geführt. Dieses Straßenverkehrsunfallstatistikgesetz ist ein Rahmengesetz, das zur Vereinheitlichung Mindestbedingungen für die Datenerhebung und -aufbereitung festlegt. Traditionell wird zwischen den vier Grundbegriffen Unfälle, Beteiligte, Verunglückte und Unfallursachen unterschieden.

Im Hinblick auf die Unfallfolgen, den Ermittlungsumfang und das Legalitätsprinzip (Verfolgungsrecht, Verfolgungspflicht) werden die Unfälle von der Polizei in drei Kategorien unterschieden. Am 21.12.1994 wurden mit der „Verordnung zur näheren Bestimmung des schwerwiegenden Unfalls mit Sachschaden im Sinne des Straßenverkehrsunfallstatistikgesetzes“ die Kriterien der Einteilung bei Sachschadensunfällen geändert, so dass hier, im Gegensatz zu den Unfällen mit Verletzten, keine direkten Vergleiche von statistischen Auswertungen über der Zeit möglich sind. Unfälle werden heute eingeteilt in Unfälle mit Personenschaden, schwerwiegende Unfälle mit nur Sachschaden und übrige Unfälle:

- Unfälle mit Personenschäden sind solche, bei denen unabhängig von der Höhe des Sachschadens Personen verletzt oder getötet wurden. Als Getötete zählen solche Personen, die innerhalb von 30 Tagen an den Unfallfolgen sterben. Schwerverletzte sind Personen, die unmittelbar zur stationären Behandlung über mindestens 24 Stunden in einem Krankenhaus aufgenommen wurden. Leichtverletzte sind alle verletzten weiteren Personen.
- Schwerwiegende Unfälle mit nur Sachschäden sind Unfälle, bei denen als Unfallursache eine Ordnungswidrigkeit (Bußgeld) oder Straftat vorliegt und bei denen gleichzeitig ein Kraftfahrzeug auf Grund eines Unfallschadens von der Unfallstelle abgeschleppt werden muss sowie Unfälle mit Alkoholeinfluss.
- Alle übrigen Sachschadensunfälle werden nur zahlenmäßig nach Ortslage nachgewiesen.

Ausgewählte Ergebnisse, die auf den polizeilichen Erhebungen und ihrer statistischen Auswertung beruhen, werden im Abschn. 3.5 gegeben. Aus der Sicht der vertieften Unfallaufklärung oder der Unfallforschung liegen Unzulänglichkeiten der Art und des Umfangs der polizeilichen Unfallerhebungen vor. Beispielsweise werden Details der Fahrzeugbeschädigungen, der Verletzungsart, der Verletzungsursachen oder der Wirkung von Sicherheitseinrichtungen nicht erhoben. Hier müssen spezifische Unfalluntersuchungen ansetzen.

Prinzipiell könnte die Qualität der Unfallaufnahme seitens der Polizei aber auch im Rahmen ihres Auftrages durch folgende Maßnahmen gesteigert werden:

- verbesserte Qualität der Fotografie (Übersichtsaufnahmen, Spuren, Fahrzeugbeschädigungen),
- allgemeine Einführung von Unfalldatenspeichern, die in der Einlauf-, Auslauf- und Folgephase als Drive-Recorder und in der Kollisionsphase als Crash-Recorder dienen (siehe Abschn. 5.1.4).

Es lässt sich jedoch beobachten, dass das Problem seitens der Polizei erkannt wurde und entsprechende Maßnahmen ergriffen werden. Inwieweit diese Wirkung zeigen, bleibt abzuwarten.

3.2.2 Erhebungen am Unfallort durch spezielle Forschungsteams

Bei den sog. „Unfallerhebungen am Unfallort“ (genannt auch „InDepth- oder In Depth- oder In-Depth-Accident Analyses“) werden Unfälle am Unfallort im Hinblick auf Unfallsachen unmittelbar nach dem Ereignis untersucht. Das Untersuchungsteam ist idealerweise interdisziplinär besetzt, um technische, medizinische und psychologische Unfallaspekte zu erfassen. Von besonderer Wichtigkeit ist, dass das Untersuchungsteam möglichst schnell am Unfallort ist, um alle Spuren unverfälscht vorzufinden und um bei den Beteiligten sowie

Zeugen auf wirklichkeitsnahe Erklärungsbereitschaft zu stoßen. Die Unfallrekonstruktion bzw. Unfallaufklärung erfolgt später in der Zentrale.

Im Zusammenhang mit InDepth-Untersuchungen ist vorab zu erwähnen, dass bei besonders schweren Unfällen mit tödlich Verletzten von den Verkehrsunfallkommandos der Polizei qualifizierte Unfallsachverständige an den Unfallort gerufen werden. Deren Erhebungen und nachfolgende Untersuchungen zielen ausschließlich auf die Rechtsprechung.

Mit dem Anliegen, die Straßenverkehrssicherheit zu erhöhen und weniger mit der Absicht, zu erhöhter Rechtssicherheit beizutragen, sind in den vergangenen vier Jahrzehnten in verschiedenen Ländern von verschiedenen Institutionen interdisziplinäre InDepth-Forschungsteams eingerichtet worden:

- In Deutschland wird das von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) unterstützte Untersuchungsprogramm „Unfallerhebungen am Unfallort“ an der MHH durchgeführt. Das Programm ist aus einem gemeinsamen Forschungsprojekt von MHH und TUB (Technische Universität Berlin) im Jahre 1973 hervorgegangen. Es werden pro Jahr etwa 1000 Fälle aller Unfallarten mit jeweils bis zu 3000 Einzelinformationen (Daten) aufgenommen. Seit 1985 wird das Projekt statistisch orientiert auf der Basis einer Stichprobenerhebung und Zufallserhebung durchgeführt. Seit 1999 ist es gemeinsam mit der Deutschen Automobilindustrie unter dem Namen GIDAS in Hannover und Dresden etabliert. Die in Hannover und Dresden erhobenen Daten werden in einer Datenbank GIDAS (German In-Depth Accident Study) gespeichert und unter verschiedenen Aspekten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und die Forschungsvereinigung der Automobilindustrie (FAT) ausgewertet.
- Nahezu alle deutschen Automobilhersteller betreiben eigene Unfallforschungsteams zur Dokumentation von Einzelunfällen ihrer eigenen Fahrzeugmodelle, insbesondere neuerer Fahrzeuge zur Ermittlung der Wirkweise von implementierten Sicherheitsmodulen. Tabelle 3.1 gibt eine aktuelle Übersicht.
- Seit kurzem betreiben auch Škoda und Seat fachlich unterstützt vom VW-Konzern Wolfsburg, eine eigene Unfallforschung am Standort Mlada Boleslav bzw. Barcelona. Die Forscher arbeiten dabei ebenso wie in Deutschland eng mit Polizei sowie den Ministerien zusammen. Mittlerweile hat VW weitere Teams in analoger Weise etabliert bzw. befinden sich im Aufbau an Standorten Ihrer Konzernfahrzeugzentren, u. a. China, Tschechoslowakei. Auch BMW hat mittlerweile Teams in China im Einsatz. Das Ziel dient der Verbesserung der Fahrzeugsicherheit über detaillierte Erkenntnisse zu Wirkmechanismen im Feld.
- 1970 wurde die Unfallforschung bei VOLVO in Schweden gegründet und ist auch heute noch kontinuierlich im Einsatz für Volvo Cars. Ziel der Volvo Unfallforschung war „Real Life Safety“. In Publikationen auf Fachtagungen, in Fachzeitschriften und Publikumszeitschriften werden die Ergebnisse und die Arbeitsmethodik der Volvo Unfallforschung veröffentlicht. Das Team der Unfallforschung von Volvo setzt sich aus Ingenieuren, Medizinern und Studenten zusammen. Von diesem Team werden jährlich 50–100 Unfallereignisse aufgenommen.

Tab.3.1 Übersicht über die Unfallforschungsaktivitäten deutscher Autohersteller

Klassifizierung der Unfallaufnahme			Methodik der Datenerhebung				
Hersteller	Volumen (Unfälle pro Jahr)	Erhebungsgebiet (Kerngebiet)	Gegenstand der Unfall- aufnahme	Kennnis von Unfallereignissen	Art der Datenerhebung [1] eigene Erhebung [2] retrospektiv	Durchführer	Aufnahme nach festgelegtem Verfahren
Audi	ca. 90	Land Bayern	Audi-Modelle jünger als 2 Jahre: Personenschaden, massiver Fahrzeugschaden oder Airbagauslösung	Polizei, Medienberichte, Vertriebszentren, Mitarbeiter	1 + 2	Technisch: Mitarbeiter; medizinisch, psychologisch: Mitarbeiter UniKlinikum Regensburg	Ja
BMW	ca. 100	Land Bayern	BMW Group Pkw und Motorräder mit Personenschaden (nur aktuelle Fahrzeuge)	Polizei, automatischer Notruf, Medienberichte, etc.	1 + 2	Mitarbeiter	Ja
Daimler	ca. 80–100	Land Baden-Württemberg	Konzernmodelle, die aktuell im Verkauf sind, Personenschaden	Polizei, Abschleppdienste, Werkstätten, Medienberichte, Mitarbeiter	1 + 2	Mitarbeiter	Ja
Opel	ca. 50	Großraum Frankfurt am Main (Rüsselsheim)	Opel Fahrzeuge mit Mindestunfallschwere	Opel intern und versch. externe Quellen	1 + 2	Mitarbeiter	Ja
VW	ca. 100–120	Länder Niedersachsen und Sachsen-Anhalt	VW und VW Nutzfahrzeuge, die aktuell in Produktion sind; schwerer Personenschaden, ggf. regional auch leichter Personenschaden oder Airbagauslösung	Polizei	1 + 2	Mitarbeiter	Ja

- In den USA wurde im Jahre 1979 unter Förderung der NHTSA das InDepth-Untersuchungsprogramm NASS begonnen. Das sog. „Crash Worthiness Data System“ umfasst dabei 24 über die USA verteilte Teams, die in ihrer Umgebung detailliert Unfälle aufnehmen. Die Absicht ist, durch geschickte Platzierung der Teams und durch einen statistischen Aufnahmeplan mit einer relativ kleinen Fallzahl von In-Depth-Untersuchungen repräsentative Ergebnisse für das gesamte Unfallgeschehen in den USA zu erhalten. Es werden etwa 5000 Unfälle pro Jahr untersucht, wobei pro Unfall etwa 400 Daten aufgenommen werden. So konnten seit 1997 Daten von über 160.000 Unfallerhebungen gesammelt und aufgearbeitet werden. Weniger detailgetreue Erhebungen für deutlich größere Fallzahlen führt das „General Estimates System“ aus, das seit dem Jahre 1997 auf Basis von Polizeireporten jährlich Daten von etwa 60.000 Unfällen für 60 Regionen erhebt. Gesonderte Unterprogramme konzentrieren sich auf spezielle Sicherheitsbereiche und Untersuchungsmethoden, so z. B. FARS für Unfälle mit tödlichen Verletzten.
- In Großbritannien nahm die „Accident Research Group“ der Universität in Birmingham seit Ende der 60er Jahre Unfälle am Unfallort auf. Dabei konzentrierten sich die Erhebungen meist auf spezielle Unfallarten. In der Folgezeit beteiligte sich TRL nicht nur unterstützend, sondern mit eigenen Teams an derartigen Untersuchungen. Daraus entstand 1983 wiederum die CCIS (Cooperative Crash Injury Study), die bis zu ihrem Ende im Jahre 2010 jährlich etwa 1200 Unfälle detailliert ausgenommen und ausgewertet hat. CCIS war in Richtung schwerer Unfälle mit neueren Fahrzeugen (zum Zeitpunkt des Unfalls 7 Jahre oder jünger) verzerrt. Neben TRL und Universität Birmingham beteiligte sich auch die Loughborough University an den unter dem Namen OTS (On the Spot) bekannten Erhebungen. Seit Mitte 2012 wird das Programm im Rahmen der Road Accident In-Depth Studies (RAIDS) mit veränderten Rahmenbedingungen unter Beteiligung von TRL und Loughborough University fortgesetzt.
- In Frankreich werden sowohl von CEESAR im Auftrag von LAB – PSA/Renault als auch von IFSTTAR MA (ehemals INRETS) Unfalldaten erhoben. Während IFSTTAR MA im Süden Frankreichs (Salon-de-Provence) Daten aufnimmt, konzentriert sich CEESAR auf die Departments Essonne und Yvelines südlich und westlich von Paris. Zusätzlich erhebt CEESAR Daten auf nationaler Ebene für bestimmte Fragestellungen (z. B. Unfälle mit Beteiligung von Kindern). Im Prinzip sind Datenumfang und Datentiefe bei beiden Erhebungen vergleichbar mit GIDAS.

Näher soll hier auf die MHH-Unfallerhebung eingegangen werden, da sie beispielhaft für In-Depth-Unfalluntersuchungen und von besonderer Bedeutung für verschiedenste Fragestellungen in Deutschland ist, siehe z. B. [Otte 82, 89, 98]. Im Großraum Hannover, der das Stadtgebiet, Landstraßen und Autobahnen umfasst, wird in Kooperation mit der Polizei und den örtlichen Krankenhäusern die Unfallaufnahme vor Ort und danach die Unfallrekonstruktion bis hin zur Unfallforschung durchgeführt [Otte 82].

Ein interdisziplinäres Team aus Medizinern, Technikern und ggf. Psychologen arbeitet im Zweischicht-Betrieb und fährt unmittelbar nach der Meldung eines Unfalls mit Per-

sonenschaden durch die Leitzentralen von Feuerwehr oder Polizei ggf. die Unfallstelle an (Ankunftszeit im Durchschnitt 10 Minuten nach dem Unfall) und beginnt mit der Datendokumentation. Dabei werden die anzufahrenden Unfälle nach einem statistischen Einsatzplan ausgesucht, um bei beschränkten Personal Ressourcen alle Unfallarten an allen Wochentagen zu allen Tageszeiten erfassen zu können und um Ergebnisse zu erzielen, die für das Erfassungsgebiet repräsentativ sind.

Die Ergebnisse des speziellen Erhebungsgebietes werden unter Berücksichtigung der Ortslage, der Verletzungsschwere und der Tageszeit durch entsprechende Gewichtung auf den Bundesdurchschnitt hochgerechnet. Dadurch werden repräsentative Daten für das Unfallgeschehen in Deutschland angestrebt, die mit Einschränkungen (im Raum Hannover ist z. B. der Anteil von VW-Fahrzeugen größer als der im Raum Stuttgart) auch auf das Unfallgeschehen im Bundesgebiet übertragbar sind.

Die In-Depth-Unfallerhebung zielt sowohl auf die aktive wie die passive Sicherheit, weniger auf Fragen der Rechtsprechung. Eine Besonderheit dieser unmittelbar nach dem Unfall einsetzenden Forschungsarbeit ist z. B., dass Beteiligte glaubhaftere Aussagen machen als das es bei späteren Aussagen der Fall ist, auch wenn sie die Unfallursache bei sich sehen. Diese Offenheit wird nach etwa 15 Minuten von rationalen Überlegungen abgelöst. Das Team erhebt, über die polizeiliche Unfallaufnahme hinausgehend, Unfallursachen, Reifenspuren, Fahrzeugdeformationen, Intrusionen, Sitzdeformationen, Verletzungen, verletzungsverursachende Kontaktstellen, Wirkung von Sicherheitsgurt oder Airbag u. a. mehr. Die wichtigsten Spuren werden sorgfältig fotografisch dokumentiert. Die Unfallstelle wird detailliert vermessen, so dass später maßstäbliche Unfallskizzen hoher Qualität erstellt werden können und erst im Laufe der Rekonstruktion sich als wichtig erweisenden Einzelheiten nachgegangen werden kann. Von medizinischer Seite wird die Dokumentation später im Krankenhaus mit genauen Untersuchungsmethoden fortgesetzt, bei tödlich Verletzten in der Pathologie.

Die Unfallerhebungsdaten der MH Hannover, die angesichts der Datenfülle nur über Datenverwaltungsprogramme gehandhabt und ausgewertet werden können, umfassen etwa 60 Erhebungsbögen (Auswahl siehe Anhang A.2) mit jeweils etwa zehn bis dreißig Einzelangaben. Die Bögen, die mittlerweile durch Computer gerechte Eingabemasken ersetzt wurden, wobei die Daten mittels Handheld-Computern bereits am Unfallort eingegeben werden können, beziehen sich auf das Umfeld, die Unfallskizze, die Personen mit ihren Verletzungen, das Verhalten von Sicherheitseinrichtungen wie Gurt oder Airbag, die Fahrzeuge mit ihren Deformationen, das Fahrrad, das Motorrad, den Fußgänger mit der Zuordnung von Verletzungen und Verletzungsursachen.

3.2.3 Retrospektive Unfalluntersuchungen

Retrospektive Unfalluntersuchungen beruhen in der Regel auf Unfallerhebungen, die von Seiten der Polizei vorgenommen wurden, wobei aber von der durchführenden Institution im Nachhinein oft spezielle Untersuchungen am Unfallgut (z. B. beschädigter Pkw,

Motorradfahrer-Helm) vorgenommen und ergänzende Informationen (z. B. Befragungen der Verletzten, Heilungsverlauf, bleibende Schäden) eingeholt werden. Die bei retrospektiven Unfalluntersuchungen angewandten Methoden sind unterschiedlich, sie richten sich meist auf spezielle Fragestellungen. Scharfe Abgrenzungen können nicht immer vorgenommen werden, die Grenzen zwischen örtlichen Unfallerhebungen und retrospektiven Unfalluntersuchungen sind fließend und oft durchsetzen sich die Tätigkeitsfelder. Als Beispiele sollen folgende retrospektiven Untersuchungen genannt werden:

- FOLKSAM ist der größte schwedische Kfz-Versicherer. Seit Beginn der sechziger Jahre werden hier die Unfallakten sorgfältig aufbereitet und statistisch analysiert. Die grundlegende Arbeit von [Bohlin 67], die erstmals Korrelationen zwischen Unfallscheinungsgrößen, Sicherheitseigenschaften und Verletzungsausgangsgrößen systematisch darstellte, war lange Zeit Ausgangspunkt aller Nutzen/Kosten-Analysen im Sicherheitsbereich.
- Die Unfallforschung der Versicherer (UDV) im Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) forscht seit über 60 Jahren zur Erhöhung der Verkehrssicherheit in Deutschland. Zu diesem Zweck wird eine Unfalldatenbank (UDB) geführt, die einen repräsentativen Ausschnitt aller Kraftfahrt-Haftpflichtschäden in Deutschland mit Personenschaden und einem Schadenaufwand von mindestens 15.000 € beinhaltet. Die detaillierte Erfassung der Schadenefälle erfolgt auf Basis der entsprechenden Schadendokumente, die u. a. die Verkehrsunfallanzeige, Unfallrekonstruktionsgutachten, Schadengutachten, medizinische Berichte, Zeugenaussagen, juristische Korrespondenz und Bildmaterial beinhalten. Aktuell sind in der UDB etwa 6000 Unfälle detailliert erfasst, die als Datenbasis für Forschungsprojekte genutzt werden, wie z. B. zum Sicherheitspotenzial von Fahrerassistenzsystemen [Hummel 11].
- DEKRA wertet die von den ihren eigenen Gutachtern erstellten Unfallaufklärungen aus und betreibt darauf aufbauend eine DEKRA-Unfallauswertung/-forschung. Schwerpunkt ist der Nfz-Unfall, siehe z. B. [Berg 99].
- Der ADAC erhebt seit 2007 Daten zu Verkehrsunfällen, die im Rahmen der ADAC Luftrettung angeflogen werden. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass ein in Richtung schwerer Unfälle verzerrter Datensatz vorliegt.
- Kliniken wie z. B. die Universitätsklinik Heidelberg untersuchen, ausgehend von den Verletzungen der bei ihnen eingelieferten Verunglückten oder von Obduktionsbefunden, spezielle Themen wie z. B. die Schutzwirkung von Motorradfahrer-Helmen, Verletzungsmuster von verunglückten Fußgängern. [CHAZ 06]
- Automobilhersteller wie Daimler, VW oder BMW unterhalten eigene Unfallforschungsteams, die teilweise vor Ort Unfälle aufnehmen, teilweise die beschädigten Fahrzeuge (Daimler z. B. im Großraum Stuttgart) später eingehend untersuchen und teilweise von GIDAS dann Unfallaufnahmen übernehmen, wenn eigene Fahrzeuge betroffen sind. Hierbei geht es in erster Linie um typspezifische Fragen, z. B. welche Schwachstellen in der Fahrzeugkonstruktion zu erkennen sind und wie sich neu eingeführte Sicherheitsmaßnahmen bewährt haben. Die deformierbare Lenkanlage ist z. B. aus derartigen Untersuchungen zu Beginn der 50er Jahre hervorgegangen [Gögler 68].

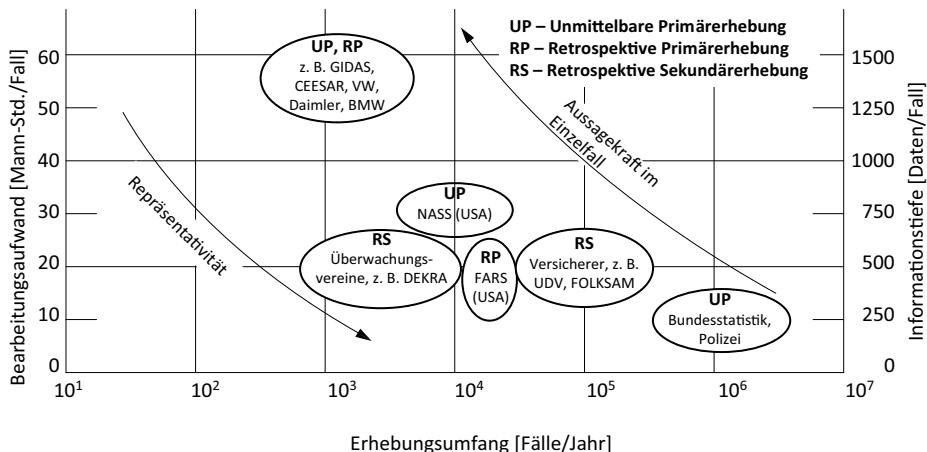


Abb. 3.5 Erhebungsumfang, Bearbeitungsaufwand und Informationstiefe bei Unfallerhebungen (qualitativ bis quantitativ)

- FARS untersucht in den USA alle Verkehrsunfälle, die mit Todesfällen verbunden sind. Die NHTSA finanziert die Erstellung der entsprechenden FARS-Datenbank, die öffentlich über die NHTSA zugänglich ist und Unfallforschern für Auswertungen verschiedenster Art zur Verfügung steht.
- HDI ist eine Institution der Versicherer in den USA, die auf der Grundlage von NASS und FARS spezielle Auswertungen (z. B. zur Abhängigkeit der Crashsicherheit von der Fahrzeugmasse) vornehmen und der US-Sicherheitsbehörde NHTSA im Hinblick auf die Gesetzgebung zuarbeiten.

In Abb. 3.5 wird versucht, die unfallerhebenden und unfallauswertenden Institutionen nach den Kriterien Aussagefähigkeit und Repräsentativität gegenüberzustellen. Beide Kriterien stehen natürlicherweise im Zielkonflikt, auch wenn z. B. bei der begrenzten Stichprobe von GIDAS durch Erfassung verschiedener Straßenkategorien und bei der der NASS durch Platzierung von mehreren Erhebungsteams eine gewisse Hochrechnung auf die Gesamtstichprobe (alle Unfälle in Deutschland oder den USA) angestrebt wird. Tabelle 3.2 stellt die wichtigsten, mit Unfallerhebungen und weiterführenden Unfalluntersuchungen befassten Institutionen nach Erhebungszielen zusammen.

Eine gut arbeitende Unfallforschung zeichnet sich insbesondere durch deren interdisziplinäre Arbeitsweise aus. Neben Verletzungen müssen auch Deformationen und verletzungsverursachende Fahrzeugteile bewertet werden sowie die Fahrzeugkinematik in den Kollisionsphasen analysiert werden. Hierzu bedarf es ingenieurtechnischer Ausbildung und Erfahrungen. Die Bewertung von Verletzungen und deren Unfallmechanismen erfordert traumatologische Kenntnisse und Erfahrungen. Ebenfalls bietet es sich an Unfallursachen unter psychologischen Gesichtspunkten zu analysieren. Ein interdisziplinärer

Tab. 3.2 Übersicht der unfallerhebenden und unfalluntersuchenden Institutionen

Institution	Erhebungs-, Untersuchungsziel	Datenverwendung	Art der Erhebung
Polizei	Tatbestandssicherung zur Schuldfrage	Strafrecht, Zivilrecht, Unfallstatistik	Unmittelbare Primärerhebungen
GIDAS	Ursache, Ablauf, Folgen, Verletzungen, Beschädigungen, Kollisionsgeschehen	Unfallursachen, Effizienz von Maßnahmen, Vorschlag für Gesetzgebung	Unmittelbare Primärerhebungen
Unfallsachverständige	Unfallaufklärung, Feststellung der Schadenshöhe	Gutachten für Straf- und Zivilprozesse, Vergleiche	Retrospektive Sekundärerhebungen
DEKRA	Wie bei Unfallsachverständigen	Wie bei Unfallsachverständigen, Unfallanalyse, Unfallforschung	Retrospektive Sekundärerhebungen
UDV, FOLKSAM	Schadensregulierung	Großzahlstudien zu Schwerpunktthemen	Retrospektive Sekundärerhebungen
Krankenhäuser	Verletzungsmuster	Behandlungsmethoden, Information Öffentlichkeit	Retrospektive Primärerhebungen
Automobilhersteller	Regionale Unfallerhebungen, Verhalten eigener Fahrzeuge	Erhöhung der Sicherheit eigener Fahrzeuge	Unmittelbare und retrospektive Primärerhebungen
NASS	Unfall-, Verletzungs-, Beschädigungsmuster aller Unfälle mit Verletzten	Unfallstatistik, Auswirkung von Maßnahmen	Unmittelbare Primärerhebungen
FARS	Unfall-, Verletzungs-, Beschädigungsmuster aller Unfälle mit Getöteten	Unfallstatistik, Auswirkung von Maßnahmen	Retrospektive Primär- und Sekundärerhebungen

Aufbau einer Unfallerhebung erscheint somit unerlässlich. Dies kann durchaus auch in Kooperation mit diversen Instituten unterschiedlicher Fachdisziplinen erfolgen.

Während in der Vergangenheit bei der Analyse der Ergebnisse der Unfallforschung im Wesentlichen die passive Sicherheit im Fokus stand ist es mehr und mehr wichtig, die Unfallentstehung besser zu verstehen. Leider sind Unfälle im Straßenverkehr hinsichtlich der Unfallursachen nicht immer eindeutig zu erklären, oftmals fehlen der Nachweis des tatsächlich aufgetretenen Bewegungsverhaltens der Fahrzeuge und/oder der Zugang zu den Erläuterungen der Beteiligten. Aber auch der Wahrheitsgehalt der Zeugenaussage und die mangelnde Erklärung des Fehlverhaltens erschwert eine Analyse der Unfallursachen erheblich. Die polizeiliche Unfalldokumentation greift auf eine Unfallursacheneinteilung zurück, die sich an den begangenen Verkehrsverstößen und äußereren Bedingungen der Unfallsituation orientiert und der strafrechtlichen Würdigung dient. Diese Kennzeichnung von Unfallursachen wird in der amtlichen Unfallstatistik für Deutschland und in analoger Form in den nationalen Unfallstatistiken anderer Länder genutzt, u. a. in IRTAD (Road Traffic and Accident Database) und CARE (Community database on Accidents on the

Roads in Europe). In beiden Fällen dienen die polizeilich erfassten Daten als Basis für die Beschreibung des Unfalles und der Unfallursachen. Diese sind in der Regel nicht auf einer Rekonstruktion des Unfalls basierend und geben deshalb häufig lediglich die Häufigkeit der unterschiedlichen Vergehen bzw. Ordnungswidrigkeiten wider. Erkenntnisse, wie beispielsweise eine Überschreitung der Fahrgeschwindigkeit oder auch die tatsächlichen Sichtbedingungen am Unfallort finden in dieser Ursachenbewertung kaum Berücksichtigung. Dagegen werden in sogenannten In-Depth-Erhebungen am Unfallort durch wissenschaftliche Teams häufig Befragungen der Beteiligten vor Ort durchgeführt und die technischen Abläufe der Unfälle analysiert. Zielsetzung einer in GIDAS erarbeiteten Methodik war es, das Unfallgeschehen durch gezielt herausgearbeitete Informationen zu dem Fehlverhalten und den Ursachen der Fahrzeugführer und Beteiligten zu erfassen und diese Informationen in einer Datenbank mit vorhandenen zusätzlichen Daten der Technik und Medizin zusammenzuführen. In-Depth-Erhebungen liefern die Möglichkeit, zusätzlich zum Verständnis der kinematischen und biomechanischen Abläufe beim Unfallgeschehen auch von der Systemkomponente Mensch aus, das selbst berichtete oder beobachtete Verhalten, welches aus seinem Erleben und seiner Bewertung des Unfallablaufes sich ergibt, als Informationen zur Unfallursachenanalyse zusammenzutragen.

In der modernen Unfallforschung spielen die aktive Sicherheit und damit vor allem auch die Kenntnis über die Ursachenfaktoren, die zur Unfallentstehung beigetragen haben, eine immer größere Rolle. Um dem Rechnung zu tragen wurde mit ACAS (Accident Causation Analysis System) ein System zur Erhebung und Erfassung von Unfallursachen entwickelt, welches nicht nur Einflussparameter wie z. B. Nebel, Glätte oder Alkoholeinfluss erfasst, sondern vor allem auch das situative menschliche Verhalten im Moment der Unfallentstehung durchleuchtet und Unfallursachen aus den menschlichen Grundfunktionen aufdeckt. Um ein EDV-gerechtes Erfassen und Auswerten der Ursachenfaktoren zu ermöglichen wurde mit ACAS ein System entwickelt [Otte 09], bei dem jeder Ursachenfaktor detailliert durch einen 4 stelligen numerischen Code beschrieben werden kann. Hierbei können den Unfallbeteiligten mehrere Codes zugeordnet werden, da die Ursache von Verkehrsunfällen häufig in dem Zusammenspiel von mehreren Faktoren zu finden ist.

Bei Unfällen im Straßenverkehr können die Ursachenfaktoren in drei verschiedene Gruppen aufgeteilt werden, welche die erste Zahl des Ursachencodes beschreiben:

Gruppe 1: Menschliche Einflussfaktoren;

Gruppe 2: Faktoren aus dem Bereich der Fahrzeugtechnik;

Gruppe 3: Faktoren aus den Bereichen der Infrastruktur und Umwelt.

Der Kern dieses Systems basiert jedoch auf der Analyse der menschlichen Faktoren (Gruppe 1), da diese über 90 % der Unfallursachen ausmachen. Die Analyse der menschlichen Faktoren wird durch das Identifizieren von Fehlern der Beteiligten beim chronologischen Ablauf menschlicher Grundfunktionen (von der Wahrnehmung bis zur konkreten Handlung) bei der Bewältigung der Fahraufgabe erreicht. Dabei bilden diese 5 Grundfunktionen die Fehlerkategorien (zweite Zahl des Codes) bei den menschlichen Einfluss-

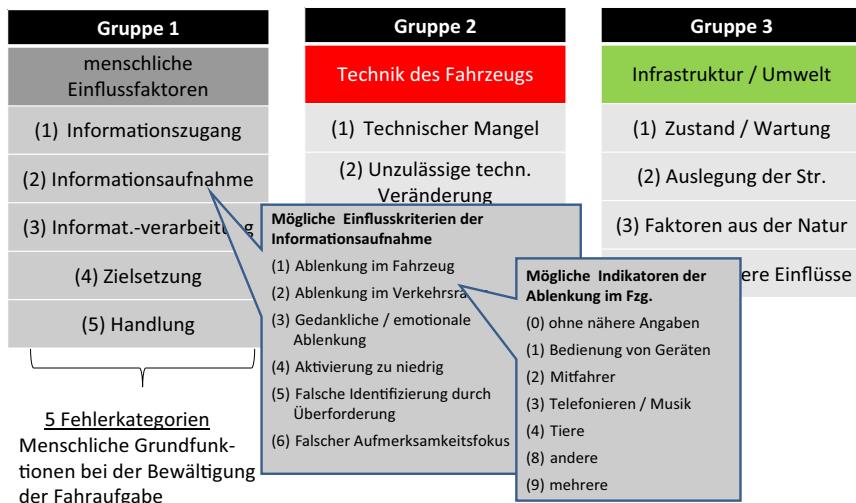


Abb. 3.6 4-Stelliger ACAS Code zur Definition von Unfallursachen [Otte 09]

faktoren. Diese Fehler können weiter hinreichend genau beschrieben werden, da sich die Ursachen aus jedem Bereich der menschlichen Grundfunktionen in deren Ausprägungen bzw. Einflusskriterien (dritte Zahl des Codes) und in spezifische Indikatoren dieser Ausprägungen (vierte Zahl des Codes) weiter differenzieren lassen, siehe Abb. 3.6.

3.3 Unfallrekonstruktion und Unfallaufklärung, Rechtsprechung

Die Unfallaufklärung einzelner Straßenverkehrsunfälle hat zunächst das Ziel, sämtliche Einzelheiten eines Unfalls so zu erfassen und so zu kombinieren, dass die einzelnen Phasen des Unfallablaufes in ihrer räumlichen und zeitlichen Zuordnung bestimmt und „Nebenaspekte“ (z. B. Verletzungsursachen) beurteilt werden können [Wagner 84]. Hierzu sind fachspezifische Unfallrekonstruktionen nötig, die – im Idealfall – in interdisziplinärer Abstimmung aus der Sicht verschiedener Disziplinen zur Unfallaufklärung zusammengeführt werden, siehe Abb. 3.7. Innerhalb jeder Disziplin haben sich dem jeweiligen Problem angepasste Rekonstruktionsmethoden und Beurteilungsgrundlagen herausgebildet, so z. B.:

- Chemie
 - vergleichende Materialuntersuchungen
 - kriminologische Untersuchungen
 - Branduntersuchungen u. a.
- Medizin
 - Art und Zeitpunkt der tödlichen Verletzungen
 - Verletzungssyndrome u. a.

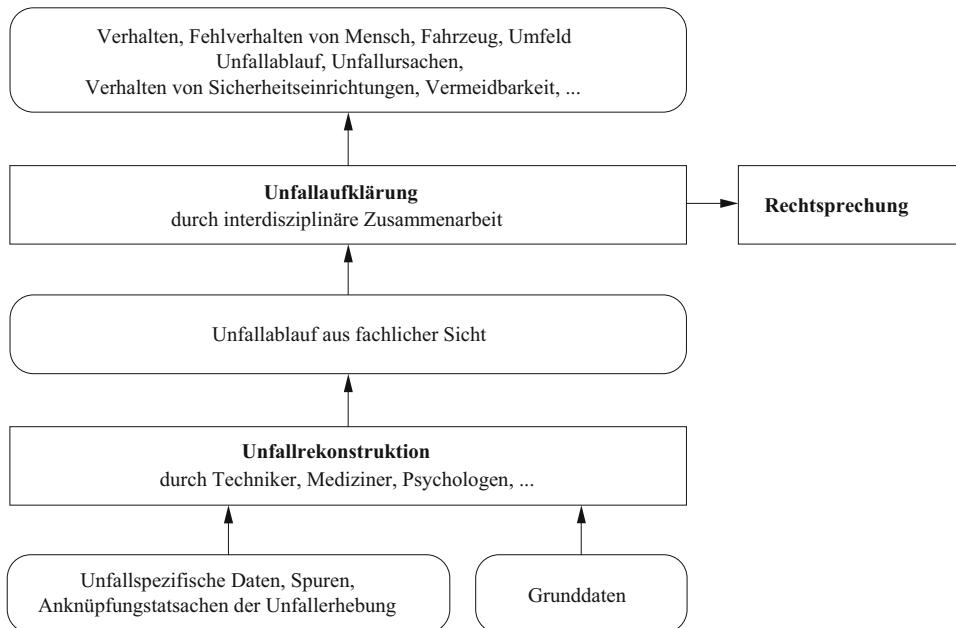


Abb. 3.7 Unfallrekonstruktion und Unfallaufklärung eines Unfalls

- Physiologie, Psychologie
 - Leistungsveränderung durch Alkohol und Medikamente
 - Sehbereiche
 - Reaktionsvermögen u. a.
- Physik
 - Anwendung der Stoßgesetze
 - Anwendung des Energiesatzes
 - Zeit-Weg-Diagramme
 - Rekonstruktion des Beleuchtungszustandes
 - vergleichende Materialuntersuchungen
 - Tragezustand des Gurtes u. a.
- Kraftfahrzeugtechnik
 - Ablauf von Bremsvorgängen
 - Reibungsverhalten von Reifen auf verschiedenen Straßenoberflächen
 - Schräglauftypen von Fahrzeugreifen
 - Deformationsverhalten von Karosserien u. a.

Die Anwendung der angedeuteten Methoden bis hin zu quantitativen Ergebnissen erfordert neben der Verfügbarkeit der spezifischen Unfalldaten die Verfügbarkeit von Grundlagendaten, auf die immer wieder zurückgegriffen werden kann und muss. Diese Grundla-

gendaten waren oder sind heute Gegenstand der Forschung. Aus der Sicht der technischen Unfallrekonstruktion werden im Folgenden einige dieser Grundlagendaten genannt, wobei bezüglich der Zahlenwerte auf die angegebene Literatur verwiesen wird, z. B. [Burg 81; Wagner 84; Appel 84/1; Burg 2009]:

- Reaktionszeit des Menschen unter verschiedenen Anforderungssituationen
- Reaktionszeit des Systems Fahrer-Fahrzeug
- Ansprechzeiten und Schwellzeiten von Bremssystemen
- Restitutionskoeffizient bei dynamischen Karosseriedeformationen
- Reibwerte für Reifen-Straßen-Kombinationen
- Schräglaufkennungen von Reifen
- Kraft-Deformationskennungen von Karosserien unter verschiedenen Aufprallbedingungen
- Energieraster bei Karosserien
- Kraft-Deformationskennungen von Motorrad-Vorderrädern
- Wurfweiten von Fußgängern
- Rutschweiten von Zweirädern unter verschiedenen Aufprallbedingungen.

Als wichtige Aufgabe der Forschung in Firmen, Universitäten und Verbänden kann die kontinuierliche Verbesserung und Aufweitung der Grundlagendaten angesehen werden.

Von der Unfallaufklärung werden spezielle Antworten zu Fragestellungen aus der Sicht der Rechtsprechung (siehe Abb. 3.8) und aus der Sicht der Verkehrssicherheit erwartet, z. B.:

- Unfallursachen unter psychologischen und physiologischen Aspekten, Fehlverhalten
- räumliche, zeitliche Vermeidbarkeit
- Geschwindigkeiten vor dem Unfall
- Reaktionspunkt, Sichtverhältnisse
- Sitzpositionen, Fahreridentifikation
- Auswirkungen einer reduzierten Fahrgeschwindigkeit auf die Schwere von Verletzungen
- Unfallursachen unter dem Aspekt Fahrer-Fahrzeug-Verhalten
- Verletzungen und ihre Ursachen, Verletzungsmuster, Verletzungsmechanismen
- Wirksamkeit von Sicherheitseinrichtungen, Verletzungsminderung, Verletzungsüberhöhung
- Effektivität von Sicherheitsgurten, Frontairbags, Seitenairbags
- Fehlverhalten von Airbags und deren Ursachen
- Kollisionsgeschwindigkeiten, Geschwindigkeitsänderungen
- Einfluss konstruktiver Parameter auf die Verletzungsschwere u. a.

Mögen die Fragestellungen im forensischen und im sicherheitstechnischen Bereich auch unterschiedlich sein, für beide Bereiche laufen die Methoden und Verfahren der Unfallrekonstruktion weitgehend parallel [Appel 84/1]. Für die Rechtsprechung sind die

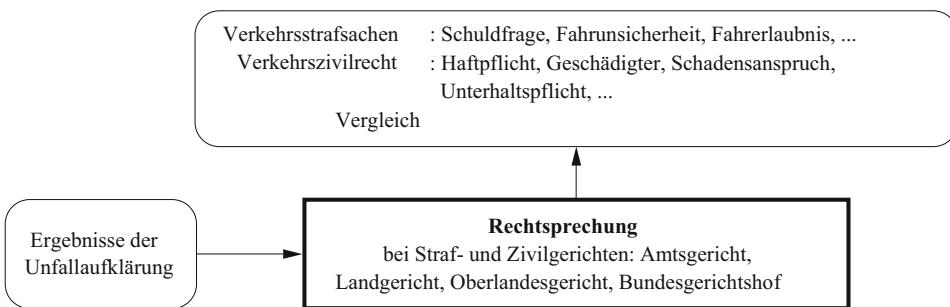


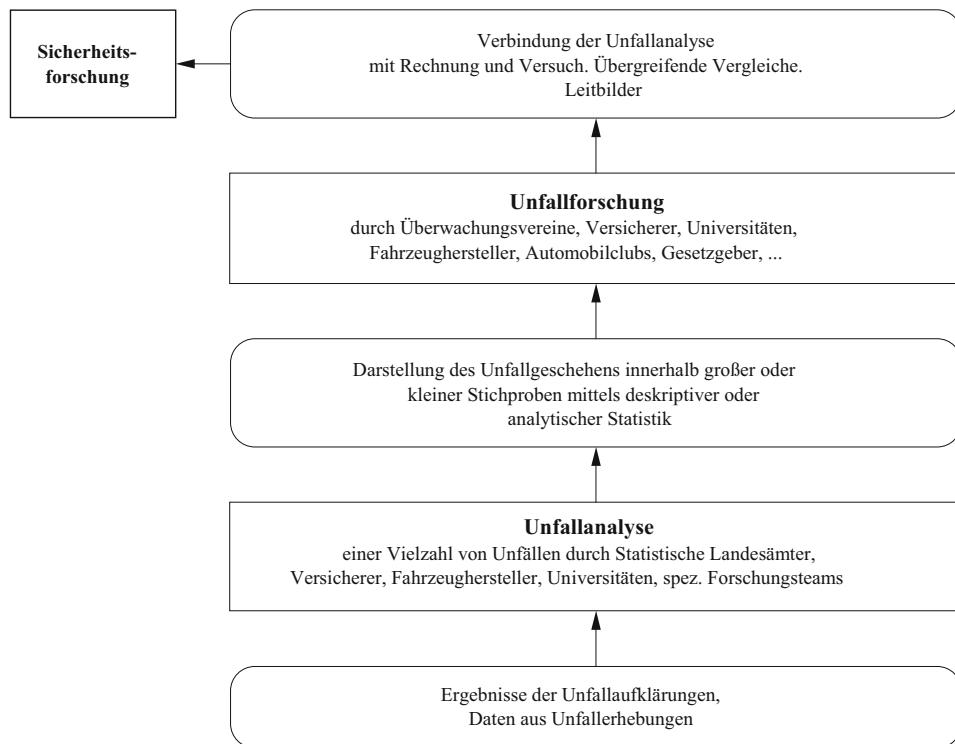
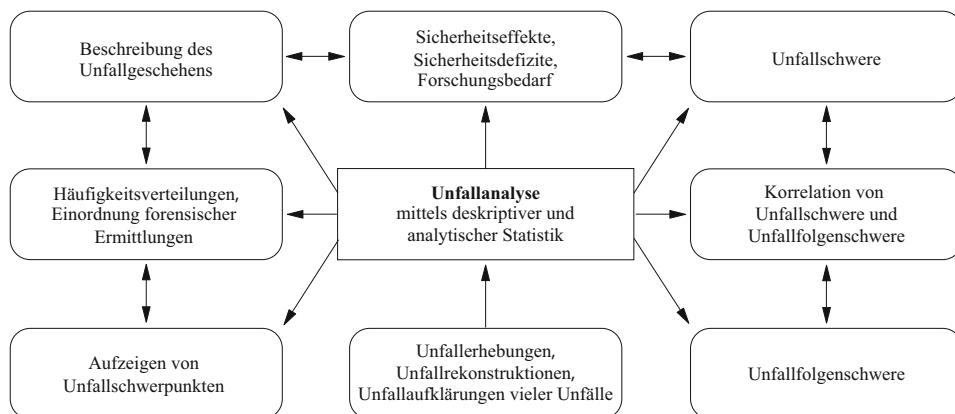
Abb. 3.8 Rechtsprechung und Unfallaufklärung

Ergebnisse der Unfallaufklärung zusammen mit Aussagen von Unfallbeteiligten bzw. Unfallzeugen maßgeblich für die Urteilsfindung, siehe Abb. 3.1 und 3.8. Die Rechtsprechung greift aber auch direkt auf die Unfallerhebung, die fachliche Unfallrekonstruktion oder die Statistik der Unfallanalyse zurück, um Zusatzinformationen zu erhalten. Andererseits beeinflusst sie die Unfallerhebung (z. B. durch das Verlangen nach hochwertigen Unfallskizzen oder die Feststellung von Bremsspuren bei ABS-Fahrzeugen) und die Unfallrekonstruktion (z. B. durch das Verlangen nach anschaulicher Darstellung des Unfallablaufs mittels Computer-Simulation).

3.4 Unfallanalyse

Inhalt und Zweck der Unfallanalyse ist zunächst die Zusammenfassung, Auswertung und Darstellung der Informationen, die bei den Unfallerhebungen angefallen sind. Im wissenschaftlichen Bereich ist der Begriff Unfallanalyse weiter zu fassen, indem auch und vor allem die Ergebnisse der Unfallrekonstruktionen und Unfallaufklärungen einzubeziehen sind. Unfallanalyse bezieht sich – nach dem hier gewählten, nicht überall gebräuchlichen Sprachgebrauch – nicht auf den einzelnen Unfall, sondern auf die statistische Auswertung einer Vielzahl von Unfällen, siehe Abb. 3.1 und 3.9. Im Falle der Bundesstatistik werden das alle in Deutschland registrierten Unfälle sein, im Falle von wissenschaftlichen Untersuchungen können das gezielt angelegte Stichproben sein wie z. B. Fälle, die nur den Unfalltyp Pkw-Unfall, die Kollisionsart Pkw-Hindernis (z. B. Pkw-Baum) und die Aufprallart Seitenaufprall enthalten.

Beispiele für die auswertenden Institutionen und für die angestrebten Ergebnisse sind in den Abb. 3.9 und 3.10 enthalten. Die Auswertungen erfolgen mit Hilfe der deskriptiven oder analytischen Statistik. Im ersten Falle werden Gegenüberstellungen, Vergleiche, Häufigkeitsverteilungen der vorgefundenen Ergebnisse dargestellt, im zweiten Fall werden nach Definition wichtig erscheinender Parameter Zusammenhangshypothesen und Korrelationen abgeleitet, dargestellt und überprüft. In detaillierter Form zeigt Abb. 3.10 die von der Unfallanalyse zu erwartenden Ergebnisse, Angaben und Inhalte.

**Abb. 3.9** Unfallanalyse und Unfallforschung**Abb. 3.10** Ausgewählte Bereiche und Ziele der Unfallanalyse

Die wichtigsten Ergebnisse der deskriptiven Statistik finden sich in den vom Statistischen Bundesamt jährlich fortgeschriebenen Straßenverkehrsunfalldaten, z. B. [StBA 11/2]. Als Teil und zur Vorbereitung der analytischen Statistik sind Korrelationen von Unfallschwere und Unfallfolgenschwere von besonderer Bedeutung. Die beiden Begriffe werden im Abschn. 3.5 erläutert, ausgewählte, neue Ergebnisse der Unfallanalyse im Abschn. 3.7. Die Ergebnisse der Unfallanalyse beziehen sich auf die Grundgesamtheit (z. B. alle Unfälle in Deutschland) oder aber auf spezifische Stichproben (z. B. Pkw-Unfälle mit Airbagauslösung). Bei Vorgabe zu vieler Kriterien besteht die Gefahr, dass die Stichprobe zu klein wird, um statistisch abgesicherte Ergebnisse zu erhalten.

3.5 Unfallschwere, Unfallfolgenschwere

In der Unfallanalyse, Unfall- und Sicherheitsforschung muss im Sinne von Ursache und Wirkung zwischen der Schwere eines Unfalls als Eingangsgröße und der Schwere der Unfallfolgen als Ausgangsgröße unterschieden werden. Die Begriffe Unfallschwere und Unfallfolgenschwere sind unbedingt zu unterscheiden. Nur so lassen sich gesuchte Korrelationen zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen ableiten, die für die Untersuchung von Parametervariationen (z. B. Kollisionsgeschwindigkeit und Verletzungsschwere angefahrener Fußgänger bei unterschiedlicher Gestaltung der Pkw-Front) oder für die Festlegung von allseits anerkannten Grenzwerten (z. B. Testgeschwindigkeiten und damit abgedeckte Kollisionshäufigkeiten unterschiedlicher Verletzungsschweren von Pkw-Insassen) notwendig sind. In Abb. 3.11 ist in allgemeiner Weise der Zusammenhang von Unfallschwere und Unfallfolgenschwere dargestellt.

Allgemein soll als Unfallschwere die auf ein Fahrzeug und auf den Menschen, sei er geschützter oder ungeschützter Verkehrsteilnehmer, ausgeübte „Belastung“ verstanden werden. Unfallfolgenschwere ist die Summe der Sachschäden (an den Fahrzeugen und im Umfeld) und der Personenschäden, wobei die Schadensarten entweder getrennt gehalten oder

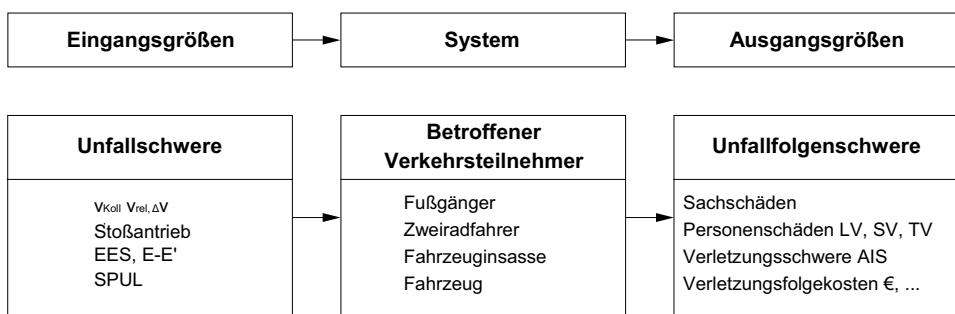


Abb. 3.11 Unfallschwere und Unfallfolgenschwere als Eingangs- und Ausgangsgrößen im Unfallgeschehen bzw. in der Unfallforschung

über eine monetäre Bewertung zusammengeführt werden [Appel 73, 84/1; Kramer 82, 90, 09; Burg 09].

3.5.1 Unfallschwere, Unfallkenngröße

Maßgeblich bei der Festlegung von Unfallschweren ist, dass sie für die Unfallfolgen bestimend und bei der Unfallaufnahme bzw. bei der Unfallrekonstruktion mit hinreichender Genauigkeit ermittelbar sind. Außerdem sollten Unfallschweren allgemein verständlich und kommunizierbar sein, es sei denn, sie sind von vornherein als differenzierte Information für eine nachfolgende EDV-Verarbeitung gedacht, so z. B. CDC, VDI und VIDI. Je nach Unfall und Kollisionsart haben sich unterschiedliche Unfallschweren im Sinne von Unfallkenngrößen als relevant für die Unfallfolgen herausgestellt.

Bei der Kollision von Kraftfahrzeugen mit ungeschützten Verkehrsteilnehmern ist das wichtigste Maß für die Unfallschwere

- v_{Koll} Kollisionsgeschwindigkeit bzw. Anstoßgeschwindigkeit des Kraftfahrzeugs.

Beim Pkw-Front- und Heckaufprall haben sich als wichtige und handhabbare Unfallschweren erwiesen [ISO 99]:

- Δv Geschwindigkeitsänderung $v' - v$ des Fahrzeugschwerpunktes bei der Kollision (Impulsänderung des Fahrzeugs). Diese Unfallkenngröße ist dem übertragenen Stoßimpuls proportional.
- EES Equivalent Energy Speed. EES leitet sich aus den Beschädigungen bzw. äußeren Deformationen bzw. der Energieabsorption ab und ist definitionsgemäß die zu dem betroffenen Fahrzeug gehörige Geschwindigkeit, die beim geraden, zentrischen, vollplastischen Aufprall auf ein beliebig geformtes, festes, undeformierbares Hindernis zu der gleichen bleibenden Energieabsorption $E - E'$ führen würde. Formelmäßig lautet also die Definition:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot \text{EES}^2 = E - E' = W_{\text{Def}} .$$

EES kann von erfahrenen Sachverständigen mit einer Genauigkeit von etwa ± 5 km/h, die Deformationsenergie kann ggf. aus Energierastern (siehe Anhang A.1) ermittelt werden, sofern diese vorliegen.

Beim geraden, zentralen Front-, Heck- oder Seitencrash (siehe z. B. Abb. 3.13) kann unter der Voraussetzung linearer Kraft-Deformationskennung eine Beziehung zwischen der EES und den Deformationen abgeleitet werden [Burg 84; Danne 99], wenn die Gesamtdeformationsenergie bekannt ist oder abgeschätzt werden kann:

$$\text{EES}_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot W_{\text{Def}} \cdot s_1}{(s_1 + s_2) \cdot m_1}} \quad \text{EES}_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot W_{\text{Def}} \cdot s_2}{(s_1 + s_2) \cdot m_2}} .$$

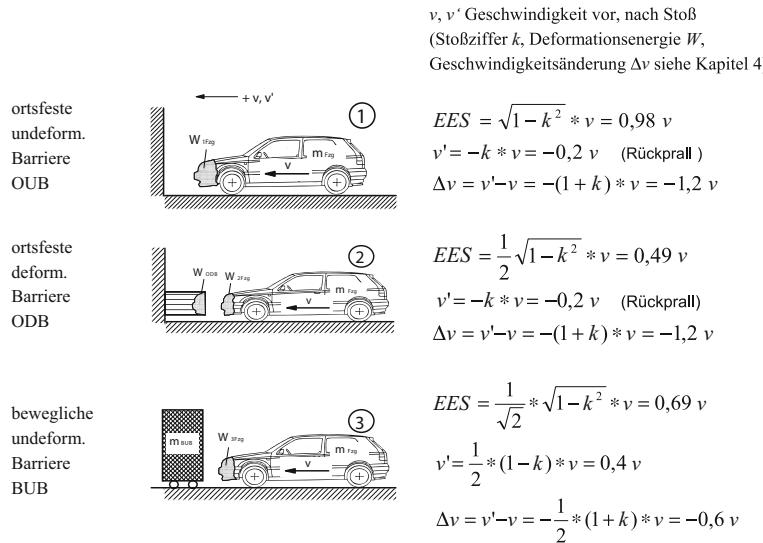


Abb. 3.12 Unfallschweren EES und Δv eines Fahrzeugs beim Frontalaufprall auf verschiedene Hindernisse (Annahmen: $k = 0,2$, $m_{BUB} = m_{Fzg}$, $W_{ODB} = W_{2Fzg}$)

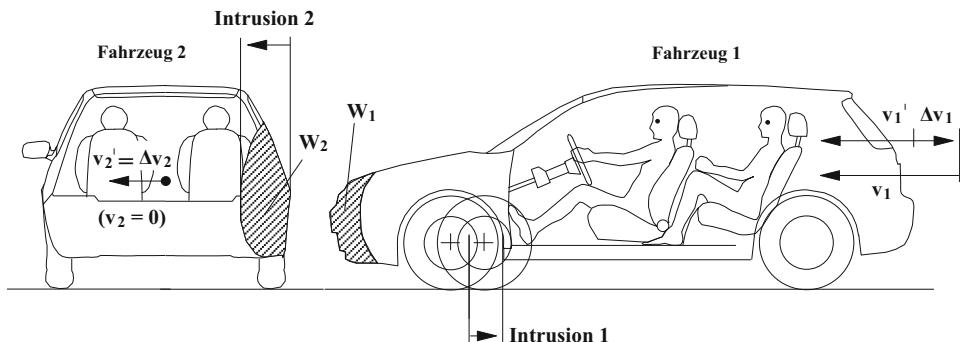


Abb. 3.13 Größen zur Beschreibung der Unfallschwere bei der Pkw/Pkw-Seitenkollision. Stoßendes Fahrzeug 1: Δv_1 , EES₁, Intrusion 1. Gestoßenes Fahrzeug 2: Δv_2 , EES₂, Intrusion 2, v_1

Diese Gleichungen wird man nur nützen können, wenn die Deformationen homogen sind und wenn die Gesamt-Deformationsenergie, d. h. m_1, m_2, v_{rel}, k (siehe Abschn. 4.5.5), leichter abzuschätzen oder vorzugeben sind als EES₁ und EES₂. Dies wird nur in Ausnahmefällen zutreffen.

In Abb. 3.12 sind die drei Maße der Unfallschwere für den Frontalaufprall gegen eine OUB, ODB, BUB beispielhaft dargestellt. Der Restitutionskoeffizient bzw. die Stoßziffer k wird im Abschn. 3.4 erläutert.

Beim Pkw-Seitenaufprall sind folgende Unfallschwerekenngrößen für die Verletzungsschweren der Insassen des seitlich getroffenen Fahrzeugs bestimend (s. Abb. 3.13):

- Δv (des seitlich gestoßenen Fahrzeugs)
- EES (des seitlich gestoßenen Fahrzeugs)
- Intrusion (des seitlich gestoßenen Fahrzeugs)
- v_{Koll} Kollisionsgeschwindigkeit des stoßenden Fahrzeugs. Diese Geschwindigkeit bestimmt maßgeblich die Insassenbeschleunigung des gestoßenen Fahrzeugs. Seitenversteifungen sowie Airbags im Kopf- und Thoraxbereich bewirken hierbei eine Minderung der Kontaktgeschwindigkeit zwischen den Kollisionspartnern und müssen entsprechend mit berücksichtigt werden.

Die beiden wichtigsten Maße der Unfallschwere, Δv und EES, unterscheiden sich umso mehr, je elastischer und je exzentrischer der Stoß ist [Zeidler 82, 84; Berg 98/2]. Beim plastischen, geraden, zentrischen Stoß gegen ein festes Hindernis sind Δv und EES gleich groß, beim vollelastischen Stoß ist $|\Delta v| = 2v_{\text{Koll}}$, EES dagegen Null. Bei Stößen mit Abgleiten ist EES bei steigender Kollisionsgeschwindigkeit nahezu konstant, während $|\Delta v|$ mit v_{Koll} abnimmt, siehe Abschn. 4.7.6. Bezogen auf Sicherheitsüberlegungen lässt sich feststellen, dass Δv mehr eine Kenngröße für die Belastung der Insassen im Rückhaltesystem, EES mehr eine Kenngröße für die Belastung der Deformationsstrukturen und der Fahrgastzelle, darüber hinaus aber auch für die Verletzungen der Fahrzeuginsassen infolge Intrusionen ist [Appel 73; Zeidler 82]. Weder Δv noch EES können jeweils für sich in Anspruch nehmen, als allein maßgebliche Kenngröße für die Unfallschwere angesehen zu werden. Je nach Kollisions- und Aufpralltyp wird Δv oder EES besser mit den Verletzungen korrelieren. Für die Unfallrekonstruktion hat EES inzwischen eine große Bedeutung, in vielen Fällen ermöglicht sie erst die Unfallrekonstruktion. Während Δv über eine technische Unfallrekonstruktion als Ausgangsgröße zu bestimmen ist, lässt sich EES vor Ort als Eingangsgröße einer nachfolgenden Unfallrekonstruktion an jedem der beteiligten Fahrzeuge von Sicherheitsingenieuren oder Unfallsachverständigen anhand der plastischen, also der bleibenden Fahrzeugdeformationen abschätzen. Die Toleranzbreite liegt bei erfahrenen Experten bei etwa $\pm 5 \text{ km/h}$. Voraussetzung ist, dass deutliche plastische Verformungen vorhanden sind, sonst ist EES, z. B. bei einer „low speed collision“, definitionsgemäß Null. Bei der Anwendung von Δv werden immer eine kurze Stoßdauer mit hoher Verzögerung, also Stöße ohne Abgleiten vorausgesetzt. Die EES kann dagegen auch Gleitstöße mit längeren Crashdauern erfassen. Weitere Erläuterungen zu Δv und EES enthält Kap. 4 und insbesondere Abschn. 4.7.6.

Bei einem geraden, vollplastischen Aufprall eines Fahrzeuges auf eine OUB sind Δv und EES gleich groß, nämlich v_{rel} . Beim Aufprall gegen eine stehende, bewegliche Barriere, einmal undeformierbar (BUB) und einmal deformierbar (BDB), treten folgende Ergebnisse für Δv und EES ein, siehe auch Abschn. 4.4.7 und 4.5.5:

Fall der beweglichen, undeformierbaren Barriere (BUB)

$$|\Delta v_{Fzg}| = \frac{m_{BUB}}{m_{Fzg} + m_{BUB}} \cdot v_{rel} \quad |\Delta v_{BUB}| = \frac{m_{Fzg}}{m_{Fzg} + m_{BUB}} \cdot v_{rel}$$

$$W_{Fzg} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_{Fzg} \cdot m_{BUB}}{m_{Fzg} + m_{BUB}} \cdot v_{rel}^2 \quad W_{BUB} = 0$$

$$EES_{Fzg} = \sqrt{\frac{m_{BUB}}{m_{Fzg} + m_{BUB}}} \cdot v_{rel} \quad EES_{BUB} = 0 .$$

Fall der beweglichen, deformierbaren Barriere (BDB)

Δv wie oben

$$W_{ges} = W_{Fzg} + W_{BDB} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_{Fzg} \cdot m_{BDB}}{m_{Fzg} + m_{BDB}} \cdot v_{rel}^2$$

$$\frac{1}{2} \cdot m_{Fzg} \cdot EES_{Fzg}^2 + \frac{1}{2} \cdot m_{BDB} \cdot EES_{BDB}^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_{Fzg} \cdot m_{BDB}}{m_{Fzg} + m_{BDB}} \cdot v_{rel}^2 .$$

Die Aufteilung der gesamten Deformationsenergie richtet sich nach den Kraft-Weg-Kennungen der beiden Kontrahenten.

Im Falle gleicher Massen m und gleicher Steifigkeiten c zweier Fahrzeuge ergibt sich z. B. bei ihrem vollplastischen Frontalaufprall:

$$|\Delta v_{Fzg}| = \frac{1}{2} \cdot v_{rel}$$

$$EES_{Fzg} = \frac{1}{2} \cdot v_{rel} .$$

Daraus folgt, dass bei einer Frontalkollision zweier gleicher Fahrzeuge idealerweise sowohl die Geschwindigkeitsänderung wie die EES und auch die Crashpulse dem Aufprall auf eine ortsfeste undeformierbare Barriere (OUB) mit der halben Relativgeschwindigkeit entsprechen. Die gerade, zentrische Frontalkollision zweier gleicher Fahrzeuge, von denen z. B. eines mit 70 und das andere mit 30 km/h fährt, entspricht also im Prinzip bei homogenen Frontaldeformationen crashdynamisch dem Aufprall jedes einzelnen Fahrzeugs mit 50 km/h auf die OUB. In der Realität treten Durchdringungen auf (z. B. Längsträger), so dass die Pulse weicher werden.

Bei der Festlegung von Unfallschweren folgen mit zweiter Priorität solche Parameter, die in der Unfallrealität schwerer zu ermitteln, zu differenziert aufgebaut und/oder nicht einfach verständlich sind:

- Intrusion und Intrusionsgeschwindigkeit, wichtig beim Seitenaufprall, aber auch beim Frontalaufprall (Fußverletzungen, Prellschlagsyndrom)
- Art des Crashpulses, z. B. bei verspäteter Auslösung des Airbags

- **SPUL** = $\Delta v \cdot a_m$ Spezifische Unfall-Leistung. Diese von [Kramer 90, 09] eingeführte Unfallkenngröße kombiniert die Geschwindigkeitsänderung mit der mittleren Verzögerung, sie kann als massebezogene Crashleistung gedeutet werden. Auch wenn SPUL bei sorgfältig und aufwendig recherchierten Unfällen schärfere Korrelationen mit Verletzungsfolgen als beispielsweise Δv liefert, bleibt das Problem der Unsicherheit, mit der üblicherweise vom Unfallgutachter die mittlere Verzögerung abgeschätzt werden kann
- **VDI, VIDI** Vehicle Deformation Index, Vehicle Interior Deformation Index [SAE J224]. Diese bei InDepth-Untersuchungen benutzten Indizes beschreiben in differenzierter, für nachfolgende EDV-Auswertungen geeigneter Weise äußere Beschädigungen und Intrusionen, sie eignen sich aber nicht zur zusammenfassenden Bewertung der Unfallschwere in einer Maßzahl. Am Beispiel des VDI wird in Abb. 3.14 gezeigt, wie die Anstoßfläche, die Anstoßrichtung, der Deformationsgrad und die Art des Zusammenpralls in einem siebenstelligen Index beschrieben wird. Der VIDI kennzeichnet die Änderungen der inneren Abmessungen des Fahrzeugs. In einem ebenfalls siebenstelligen Index wird die Änderung von fünf charakteristischen Innenmaßen eines Pkw über eine lineare Zehnerskala angegeben.
- **CDC Collision Deformation Classification**. Dieser Index ist ähnlich wie der VDI aufgebaut [SAE J224], siehe Ausschnitt des CDC in Abb. 2.16.
- **BG Beschädigungsgrad**. Bei der Unfallauswertung von Versicherern werden für die äußeren Fahrzeugdeformationen spezielle Klassifikationen definiert, so z. B. der Beschädigungsgrad der GDV, der die Stufen 1 bis 5 unterscheidet [Langwieder 76; HUK 94], siehe Anhang A.3. Dabei entspricht z. B. eine bis zur Spritzwand reichende Frontverformung dem Beschädigungsgrad 4, wird also als extrem eingestuft.
- **a_m** mittlere Beschleunigung/Verzögerung. Dieser naheliegende Vorschlag wurde erstmals von Peugeot/Renault [Tarriere 75] gemacht. Die Unfallkenngröße a_m , obwohl mit Verletzungen besser korrelierend als Δv [Appel 00], konnte sich nicht durchsetzen, da sie sich schwer abschätzen und nur mit großen Unschärfen rekonstruieren lässt. Unter idealen Bedingungen (zentrale, gerade Kollision zweier Fahrzeuge 1 und 2, lineare Kraft-Deformations-Kennung mit den Steifigkeiten c_1 und c_2 , keine Restitution) lassen sich folgende Näherungen, unter Vorgriff auf Kap. 4, ableiten:

Mit

$$m_1 \cdot a_{\max 1} = m_2 \cdot a_{\max 2}, \quad a_m = \frac{1}{2} a_{\max}$$

$$\frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot a_{\max 1} \cdot s_1 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot a_{\max 2} \cdot s_2 = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot EES_1^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot EES_2^2$$

folgt

$$a_{\max 1} = \frac{m_1 \cdot EES_1^2 + m_2 \cdot EES_2^2}{m_1 \cdot (s_1 + s_2)} ; \quad a_{\max 2} = \frac{m_1 \cdot EES_1^2 + m_2 \cdot EES_2^2}{m_2 \cdot (s_1 + s_2)} .$$

Für den Aufprall gegen eine starre Wand gilt:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot a_{\max} \cdot s = \frac{1}{2} \cdot m \cdot EES^2 ; \quad a_{\max} = \frac{EES^2}{s}$$

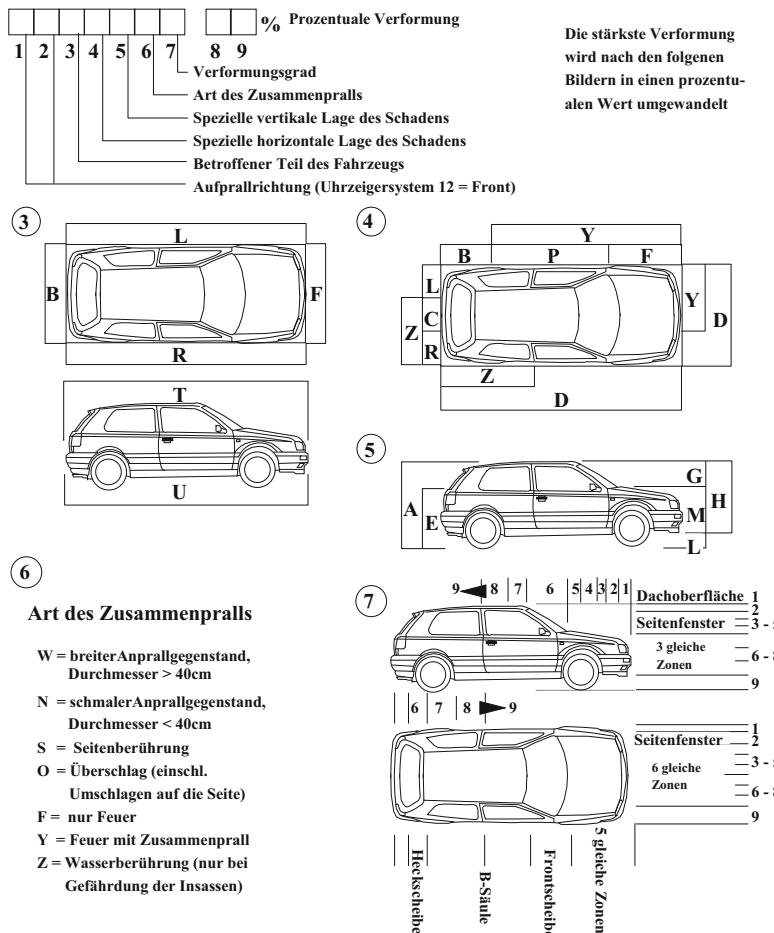


Abb. 3.14 VDI Vehicle Deformation Index [SAE J224]

Zum Beispiel ergibt sich für den üblichen 50 km/h-Wandaufprall bei einem Deformationsweg von 0,6 m eine mittlere Verzögerung a_m von realistischen 160 m/s^2 bei einer maximalen Verzögerung a_{\max} von 320 m/s^2 .

3.5.2 Unfallfolgen, Unfallfolgenschwere

Zu den *Unfallfolgen* gehören Sach- und Personenschäden. Sachschäden sollen hier nicht behandelt werden. Bei den Personenschäden ist zwischen psychischen und physiologischen Verletzungsfolgen zu unterscheiden. Hier sollen lediglich die physiologischen Verletzun-

gen interessieren, die mit der Verletzungsschwere und der Verletzungshäufigkeit die *Unfallfolgenschwere* bestimmen.

Der Grad der Verletzungsschwere kann im Einzelfall in der Regel nur durch eine umfassende medizinische Diagnose bestimmt werden [Wagner 84; Kramer 09]. Die bei Medizinern übliche und notwendige differenzierte verbale Beschreibung von Verletzungen ist in der Unfallforschung nicht zielführend, da nicht nur einzelne Fälle, sondern eine Vielzahl von Fällen betrachtet und miteinander unter Einbeziehung von Parametern, z. B. der Unfallschwere, in Beziehung gesetzt werden sollen. Notwendig ist eine einerseits nicht zu sehr vereinfachte, aber andererseits noch handhabbare Klassifizierung bzw. Codierung von Verletzungen, auch wenn dabei ein Genauigkeitsverlust der Verletzungsbeschreibung in Kauf genommen werden muss. Bei der Klassifizierung haben sich als die wichtigsten Kriterien herausgestellt:

- Maß der Lebensgefährdung
- Dauer der Krankenhausbehandlung
- Krankheitsdauer
- Dauerschäden.

Für die Skalierung von Verletzungsschweren hat sich die 1971 eingeführte „Abbreviated Injury Scale“ (AIS) international durchgesetzt [Committee 71]. Seither wurde die Skala mehrfach revidiert, zuletzt im Jahre 2008 [AAAM 98; Kramer 09].

Für die neun Körperregionen

- Kopf
- Gesicht
- Hals
- Thorax
- Abdomen
- Wirbelsäule
- Obere Extremitäten (Arme einschließlich Schultern)
- Untere Extremitäten (Beine einschließlich Hüfte und Becken)
- Äußere und andere Verletzungen

werden die Verletzungen in einer Ordinalskala von 0 bis 6 mit zunehmender Verletzungsschwere klassifiziert, wobei die von einer Verletzung ausgehende Lebensbedrohung das wichtigste Beurteilungskriterium darstellt. Die Festlegung des AIS-Wertes bezieht sich auf die Zeit unmittelbar nach dem Unfall und auf eine einzelne Verletzung an einem bestimmten Körperteil. Um die Einteilung vornehmen zu können, enthält der AIS-Katalog zu jeder Verletzungsschwere eine detaillierte und umfangreiche Beschreibung der Verletzungen und medizinischen Befunde. Eine vereinfachte und beispielhafte Zuordnung von AIS-Wert und Art einer Einzelverletzung wird in Tab. 3.3 gezeigt [States 80; AAAM 98; Kramer 09]. Zusätzlich wird für jede AIS-Klasse der statistisch ermittelte Wert der Letalitätsrate angegeben, dem Hauptkriterium für die AIS-Einteilung [Appel 73; Kramer 09]. Es ist zu

Tab. 3.3 Verletzungsschweregrad nach AIS, Verletzungsbeispiele und Letalitätsrate [Kramer 09; Unfallchirurg 10]

AIS	Schweregrad	Verletzungen (Beispiele)	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, unkomplizierter Knochenbruch	0,07
3	Schwer, nicht lebensgefährlich	Schädelfraktur ohne Liquoraustritt, Gehirnerschütterung mit Bewusstlosigkeit, Pneumothorax, Verbrennungen 2. Grades bis 25 % der Oberfläche, offene Knochenbrüche	2,91
4	Bedeutend, lebensgefährlich, Überleben wahrscheinlich	Schädelfraktur mit Liquoraustritt, Gehirnerschütterung mit Bewusstlosigkeit bis 24 Stunden, Perforation des Brustkorbes, Verbrennungen 2. oder 3. Grades bis 35 % der Oberfläche	6,88
5	Kritisch, Überleben unsicher	Schädelfraktur mit Hirnstammbulldung, Organriss oder -abriß, Verbrennungen 3. Grades bis 90 % der Oberfläche	32,32
6	Maximal, nicht behandelbar, praktisch nicht überlebbar	Massive Kopfquetschung, Hirnstammlazeration, Schädelbasisfraktur, Thoraxquetschung, Aortaruptur und -durchtrennung, Trennung zwischen Thorax und Becken	100
9	Unbekannt		Unbekannt

erkennen, dass der Zusammenhang zwischen AIS-Wert und Grad der Lebensbedrohung nichtlinear progressiv ist, dass aber selbst eine relativ leichte Verletzung der Schwere 2 bereits (innerhalb von 30 Tagen) zum Tod führen kann, wenn auch nur mit der geringen Wahrscheinlichkeit von 7:10.000, siehe auch Abb. 3.15. Des Weiteren werden üblicher Weise Verletzungen, die ein bestimmte Verletzungsschwere überschreiten, zusammengefasst; AIS 3+ fasst zum Beispiel Verletzungen, die mit AIS3, AIS4, AIS5 oder AIS6 bewertet wurden zusammen.

Fast immer erleiden verunglückte Verkehrsteilnehmer multiple (mehrere) Verletzungen. Zur Bewertung der resultierenden Verletzungsschwere sind viele Ansätze gemacht worden. Im einfachsten Falle wird sie, wie es in der AIS-Revision von 1980 vorgesehen ist, durch den maximalen AIS-Wert (MAIS) eines Verletzten beschrieben. Heute wird üblicherweise die ISS-Skalierung (ISS Injury Severity Score) zur Klassifizierung von Mehrfachverletzungen angewandt [Baker 74]. Dabei wird der ISS-Wert aus der Summe der Quadrate der drei am schwersten verletzten Körperregionen (Kopf/Hals, Gesicht, Brust,

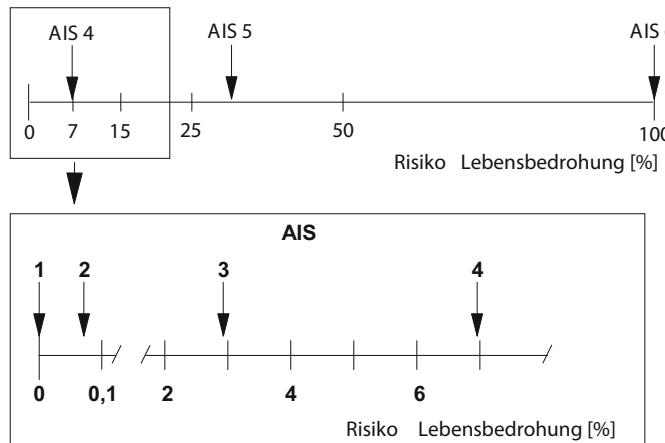


Abb. 3.15 Zusammenhang zwischen AIS-Skalierung und der Grad der Lebensbedrohung bzw. der Letalitätsrate

Bauch/Beckeninhalt, Extremitäten, externe Verletzungen) gebildet, wobei die Quadriierung die Progressivität der AIS-Skala widerspiegelt:

$$\text{ISS} = \text{AIS}_\text{I}^2 + \text{AIS}_\text{II}^2 + \text{AIS}_\text{III}^2 .$$

Der ISS-Wert korreliert besser als der AIS-Wert mit der Letalitätsrate und mit den Verletzungsfolgekosten, auch wenn er nicht die Vorerkrankungen, die physiologische Kondition oder das Alter des Verletzten berücksichtigt. Diese Kriterien sind im PODS (Probability of Death Score) enthalten und sollen zu besseren Korrelationen mit der Letalitätsrate führen [Kramer 09].

Insgesamt sei zum AIS angemerkt, dass im Zuge der Verbesserung der passiven Sicherheit Verletzungen mit einem hohen Grad der Lebensbedrohung im Vergleich zur Zeit der Einführung der AIS Skalierung seltener geworden sind. In Folge dessen werden in der Unfallforschung häufig Verletzungen mit niedriger schwer mit höheren Verletzungsschweren zusammengefasst, z. B. AIS 2+. Hier stellt sich die Frage, inwieweit dies sinnvoll ist, da der berücksichtigte Grad der Lebensbedrohung in diesem Fall von unter einem Promille bis 100 % reicht.

Leider lässt sich zwischen den gebräuchlichen Unfallschweren (v_{Koll} , Δv , EES) und den Skalierungen zur Beschreibung der Verletzungsschwere (AIS, MAIS, ISS, PODS) für einzelne Kollisionsarten mit definiertem Aufpralltyp keine scharfe Korrelation herstellen. Der AIS-Wert eines von einem Pkw angefahrenen Fußgängers bestimmter Größe kann z. B. nicht hinreichend genau aus der Anfangsgeschwindigkeit allein abgeleitet werden. Zu viele weitere Parameter beeinflussen neben den biologischen Streuungen die erlittenen Verletzungen. In [Kramer 90] werden verschiedene Unfallkenngrößen im Hinblick auf körperspezifische Verletzungsschweregrade untersucht. Die schärfsten Zusammenhänge zwis-

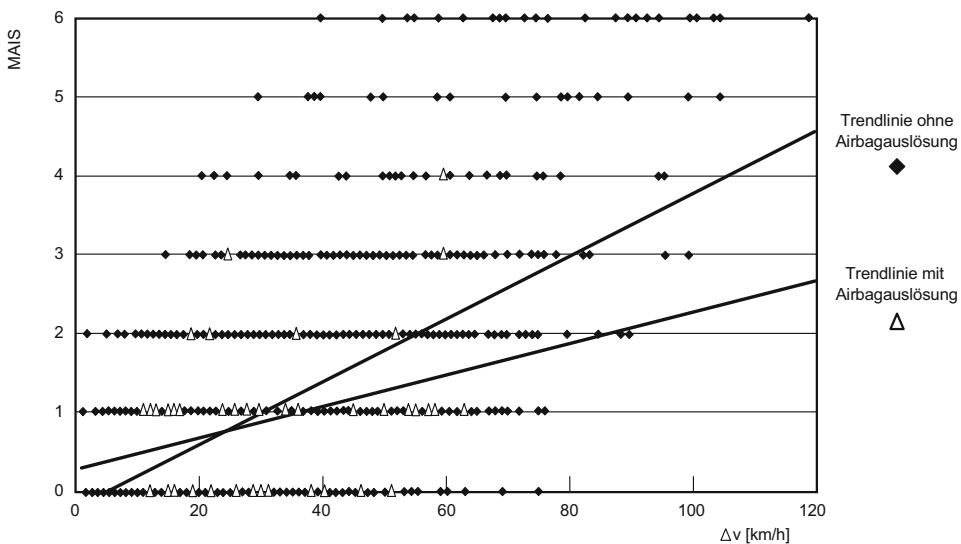


Abb. 3.16 Verletzungsschwere MAIS in Abhängigkeit von Δv bei Pkw-Frontalkollision ohne und mit Airbag. Pkw-Insassen bei Frontalkollision mit Pkw, Lkw oder Objekt [Otte 98]

schen SPUL bzw. Δv und AIS ergeben sich bei den Beckenverletzungen mit Korrelationskoeffizienten zwischen 0,74 und 0,92. Die weite Streuung des Zusammenhangs zwischen Verletzungsschwere und Unfallschwere wird in Abb. 3.16 am Beispiel der MAIS von verunglückten Pkw-Insassen (bei Frontalkollisionen) in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsänderung Δv veranschaulicht [Otte 98]. Es ist z. B. zu erkennen, dass die Verletzungen bei einer Geschwindigkeitsänderung von 30 km/h meist leicht sind, sie können aber mit AIS 5 in Einzelfällen schon sehr schwer sein. Bei Radfahrer- oder Fußgängerunfällen ergeben sich ähnlich weite Streuungen. Im Sinne der Unfallrekonstruktion ist es leider nicht bzw. nur mit großer Unsicherheit möglich von Δv oder v_{Koll} auf AIS/MAIS bzw. umgekehrt zu schließen.

Weniger zur Verbindung von Personen- und Sachschäden, sondern mehr zur Zusammenführung von Verletzungsschweren und Verletzungshäufigkeiten ist es in der Unfall- und Sicherheitsforschung, z. B. bei der Festlegung von Sicherheitsprioritäten im Rahmen von Nutzen/Kosten-Untersuchungen, nötig, eine einheitliche Dimensionierung der Verletzungsfolgen zu finden. Zu dieser Dimensionierung haben sich seit den ersten Untersuchungen zu Anfang der siebziger Jahre die monetären Verletzungsfolgekosten als zweckmäßig erwiesen [Helms 71; Niklas 70; Jäger 77; Richter 84].

Dabei sind Rettungskosten, Heilungskosten, entgangene Einnahmen und viele andere Kostenarten im Sinne von volkswirtschaftlichen Kosten, die der Allgemeinheit entstehen bzw. deren Nutzen ihr entgeht, zu berücksichtigen [Fechner 83; Mattern 88]. Bezogen auf das Jahr 2006 ermittelt [Kramer 09] folgende Kosten für die einzelnen MAIS-Werte:

MAIS 0:	Unverletzt	€ 0,-
MAIS 1:	Gering verletzt	€ 9700,-
MAIS 2:	Mäßig verletzt	€ 50.000,-
MAIS 3:	Schwer verletzt	€ 180.000,-
MAIS 4:	Bedeutend verletzt	€ 400.000,-
MAIS 5:	Kritisch verletzt	€ 980.000,-
MAIS 6:	Maximal verletzt	€ 1.300.000,-

Anhand der MAIS-Kosten können die volkswirtschaftlichen Verluste berechnet werden, die z. B. im Jahre 2010 allein durch Personenschäden bei Straßenverkehrsunfällen in Deutschland entstanden sind. Dazu werden vereinfachend und näherungsweise den in der amtlichen Statistik [StBA 12/2] ausgewiesenen Leichtverletzten die Verletzungsschwere MAIS 1, den Schwerverletzten MAIS 3 und den tödlich Verletzten MAIS 6 zugewiesen:

$$\text{Verletzungsfolgekosten} = \text{LV} \cdot \frac{\text{Kosten}}{\text{LV}} + \text{SV} \cdot \frac{\text{Kosten}}{\text{SV}} + \text{TV} \cdot \frac{\text{Kosten}}{\text{TV}}$$

$$\begin{aligned}\text{Verletzungsfolgekosten 2010} &= 308.550 \cdot € 9700 + 62.620 \cdot € 180.000 + 3648 \cdot € 1.300.000 \\ &= € 19.006.935.000, - .\end{aligned}$$

Es ist zu erkennen, dass Straßenverkehrsunfälle mit Verletzungsfolgekosten von etwa 19 Mrd. € allein aus ökonomischer Sicht der Volkswirtschaft der Bundesrepublik Deutschland einen sehr großen Stellenwert haben, unabhängig von nichtmonetären, ethischen und menschlichen Bewertungen.

Bei dieser Art der monetären Bewertung müssen die großen Ungenauigkeiten berücksichtigt werden. So können die Kosten für verschiedene Verletzungen der gleichen Schwere nach AIS Klassifizierung erheblich voneinander abweichen. Als Beispiel sei eine Sprunggelenkverletzungen, die in der Regel mit langfristigen Beeinträchtigungen verbunden ist, und eine Abdominalverletzung der gleichen Schwere, die nach der Behandlung komplett ausgeheilt ist, angeführt. Des Weiteren ist die Umrechnung von verschiedenen Verletzungsschwereklassifizierungen nicht ohne weiteres möglich. Z. B. können AIS2 Verletzungen sowohl ambulant als auch stationär behandelt werden oder sogar zur Todesfolge führen.

3.6 Unfallforschung, Sicherheitsforschung

Unfallforschung (siehe Abb. 3.9) wird von zahlreichen Institutionen betrieben, die aufbauend auf der Unfallanalyse entweder übergeordnete Aspekte verfolgen – wie z. B. bei internationalen Vergleichen – und die mittels analytischer Statistik grundlegenden Zusammenhängen nachgehen – wie z. B. der Erklärung gewisser Ausprägungen des Unfallgeschehens – oder die durch Verbindung der Unfallanalyse mit Simulationsmethoden neue Rekonstruktionsverfahren entwickeln und Grunddaten ermitteln, siehe Abb. 3.17. Wesentliche

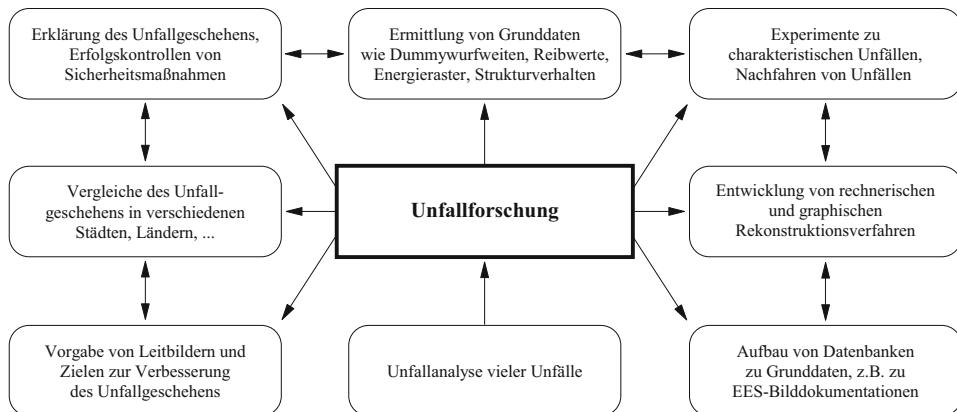


Abb. 3.17 Unfallforschung, ausgewählte Bereiche und Ziele

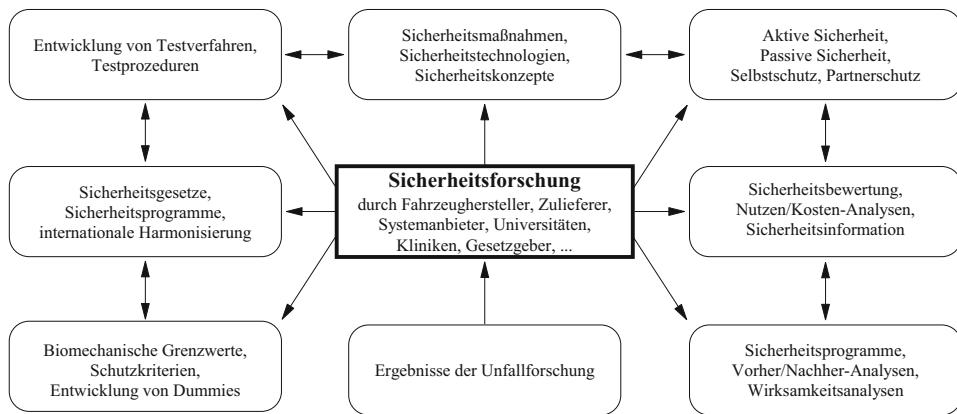


Abb. 3.18 Sicherheitsforschung, ausgewählte Bereiche und Ziele

Bereiche und Aufgaben der Unfallforschung sind z. B. die Erfolgskontrolle eingeführter Sicherheitsmaßnahmen sowie die Identifikation und Vorgabe von Zielen zur Verringerung des Unfallgeschehens im nationalen und internationalen Rahmen.

Die Übergänge von der Unfallanalyse zur Unfallforschung und von hier zur Sicherheitsforschung, siehe Abb. 3.9, 3.10, 3.17 und 3.18, sind fließend und überlappend, scharfe Grenzen lassen sich nicht immer angeben. Das Spektrum der Arbeits- bzw. Zielbereiche der Sicherheitsforschung ist in Abb. 3.18 dargestellt. Es ist verständlich, dass ausgehend von der Unfallanalyse über die Unfallforschung in der Sicherheitsforschung die Fahrzeug- und Teilehersteller eine zunehmend wichtigere Rolle spielen. Die Rückkopplungen der Sicherheitsforschung mit der gesamten Unfallkette ist in Abb. 3.1 angedeutet. Beispielsweise wirkt die Sicherheitsforschung auf die Art der Unfallerhebung zurück, wenn ein Fahrzeughersteller nach Aussagen über die Effektivität neu eingeführter Sicherheitsmaßnahmen (z. B.

Thorax-Seitenairbag im Vergleich zum Kopf/Thorax-Seitenairbag) sucht. Ausgewählte Ergebnisse der Unfall- und Sicherheitsforschung finden sich im Abschn. 3.7.

3.7 Ausgewählte Ergebnisse der Unfallanalyse, Unfallforschung und Sicherheitsforschung

In Kap. 2 sind als Beispiele zu den dort gegebenen Definitionen bereits einige Ergebnisse aus der Unfallanalyse, Unfallforschung und Sicherheitsforschung dargestellt worden. Hier folgt nun eine Auswahl weiterer, meist neuerer Ergebnisse in Form grafischer oder tabellarischer Darstellungen. Dabei werden solche Ergebnisse bevorzugt, die dem Unfallrekonstrukteur bei der Einordnung seiner speziellen Ergebnisse dienlich sein können. Die Bilder mit ihren Legenden sind so gehalten, dass sie weitgehend aus sich heraus verständlich sind. Die jeweiligen Quellen sind in die Legenden aufgenommen worden.

Als Hauptquellen erweisen sich die Zeitschrift „Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik“ und die Berichte zu den sich wiederholenden Unfallforschungs- und Sicherheitstagungen, siehe z. B. [VDI 97, 99, 01; IRCOBI 98; STAPP 99; ESV 98, 11; ESAR 10]. Bei der Auswahl der Abbildungen werden Veröffentlichungen aus dem deutschsprachigen Raum bevorzugt. Im Hinblick auf ältere, aber durchaus heute noch gültige und besonders für die Unfallrekonstruktion wichtige allgemeine Ergebnisse wird auf die einschlägige Literatur verwiesen, z. B. [Wagner 68, 84; BMFT 76; Kühnel 80; Burg 81; Stürtz 81; Kramer 90, 09]. Zu diesen Ergebnissen zählen insbesondere Grunddaten wie z. B. Bremsbeiwerte, Bremsparabeln, Wurfweiten, Rutschweiten, Gehgeschwindigkeiten, Kollisionsgeschwindigkeiten, Bilder von Reifenspuren, EES-Werte, Steifigkeiten, Verletzungsmuster, biomechanische Toleranzgrenzen, Reaktionszeiten und andere Daten bzw. Korrelationen, die allgemeingültig sind und zusammen mit den unfallspezifischen Daten bei der Unfallrekonstruktion Verwendung finden.

Die Abb. 3.19, 3.20, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24 und 3.25 beziehen sich auf allgemeine statistische Angaben. Die Zahl der Getöteten in Deutschland ist seit 1970 auf ein Viertel zurückgegangen. Darin drückt sich die Erhöhung der aktiven und der passiven Sicherheit vom Fahrzeug, Umfeld und Verkehrsteilnehmer aus. Wird die Zahl der Unfallfahrzeuge bezogen auf den Fahrzeugbestand als Maß der aktiven Sicherheit betrachtet, so ergibt sich ebenso ein Rückgang um den Faktor drei. Das plausible Maß der passiven Fahrzeugsicherheit, die Verletzungsfolgekosten pro Unfall, zeigt sogar ein Rückgang um den Faktor sechs [Kramer 09; StBA 12/2]. Die Zahl der Verletzten ist etwa gleich geblieben, die Verletztenrate (Bezug: Verkehrsleistung) aber ebenfalls deutlich gesunken. Besonders hoch, bezogen auf den Anteil an der Gesamtbevölkerung, ist die Zahl der Getöteten bei den Jugendlichen im Alter zwischen 18 und 25 Jahren und dann wieder bei der Gruppe über 75 Jahren, Abb. 3.21. Bei Vergleich der Anzahl der leicht Verletzten mit der Anzahl der getöteten zeigt sich ein größerer Anteil von getöteten mit höherem Alter, Abb. 3.22. Dies zeigt, dass der hohe Anteil der Verkehrstoten von 18–25 Jahre in Bezug auf den Anteil an der Gesamtbevölkerung auf eine hohe Anzahl von Unfällen zurückzuführen ist, während bei den Senioren, das Ri-

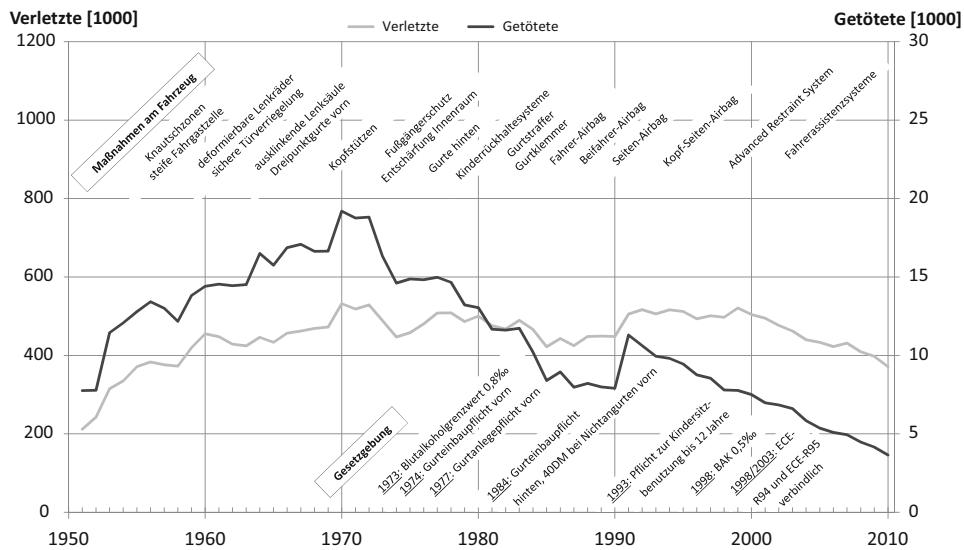


Abb. 3.19 Zeitlicher Verlauf der im Straßenverkehr Verletzten und Getöteten 1953 bis 2010, Bundesrepublik Deutschland, bis 1990 nur alte Bundesländer [StBA 12/1]. Angabe einiger Sicherheitsmaßnahmen und gesetzlicher Regelungen

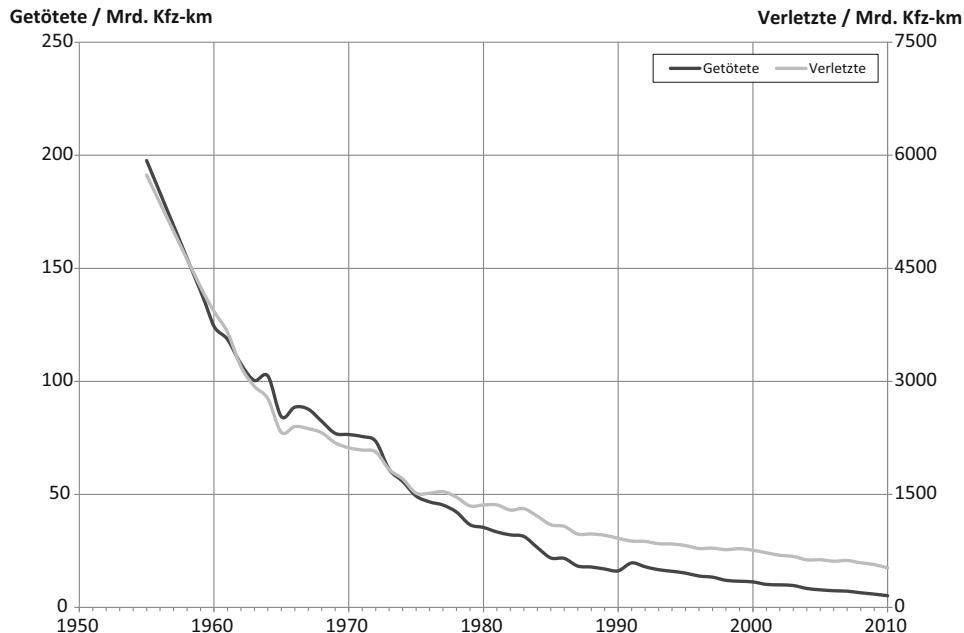


Abb. 3.20 Zeitlicher Verlauf der Getöteten- und Verletztenrate im Straßenverkehr, 1955 bis 2010, Verkehrsleistung als Bezug, Bundesrepublik Deutschland, bis 1990 nur alte Bundesländer [StBA 11/2]

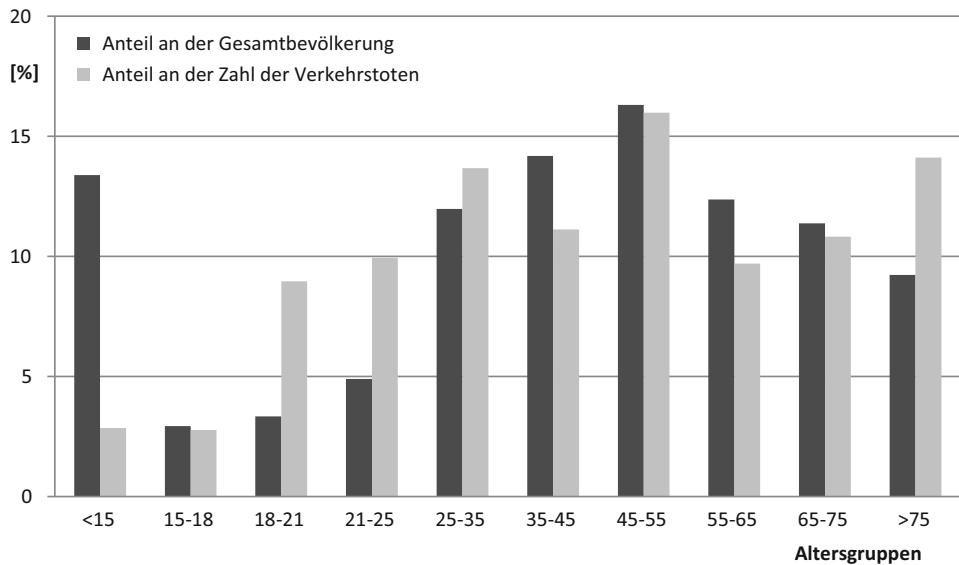


Abb. 3.21 Anteil von Altersgruppen an der Gesamtbevölkerung und an den Verkehrstoten in der Bundesrepublik Deutschland 2010 [StBA 12/2]

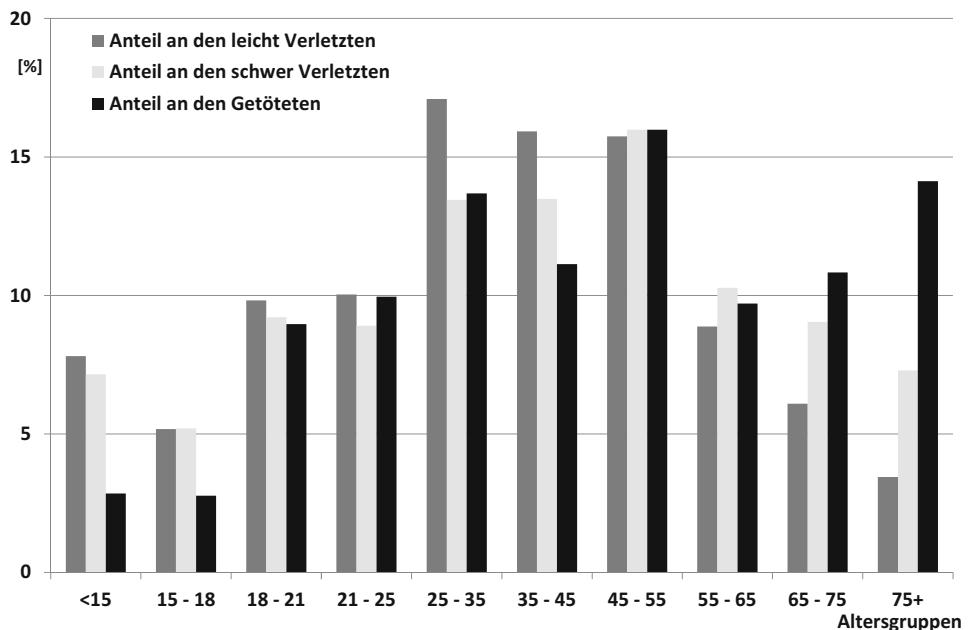


Abb. 3.22 Anteil von Altersgruppen an den leicht Verletzten, schwer Verletzten und den Verkehrstoten in der Bundesrepublik Deutschland 2010 [StBA 12/2]

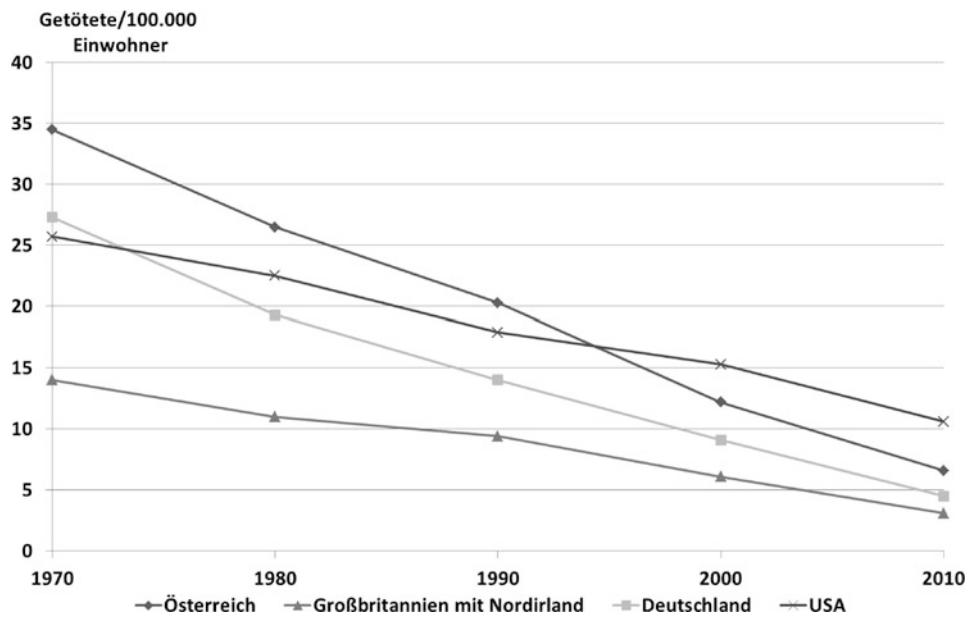


Abb. 3.23 Zeitlicher Verlauf der im Straßenverkehr Getöteten 1970 bis 2010, internationaler Vergleich [Irtad 11]

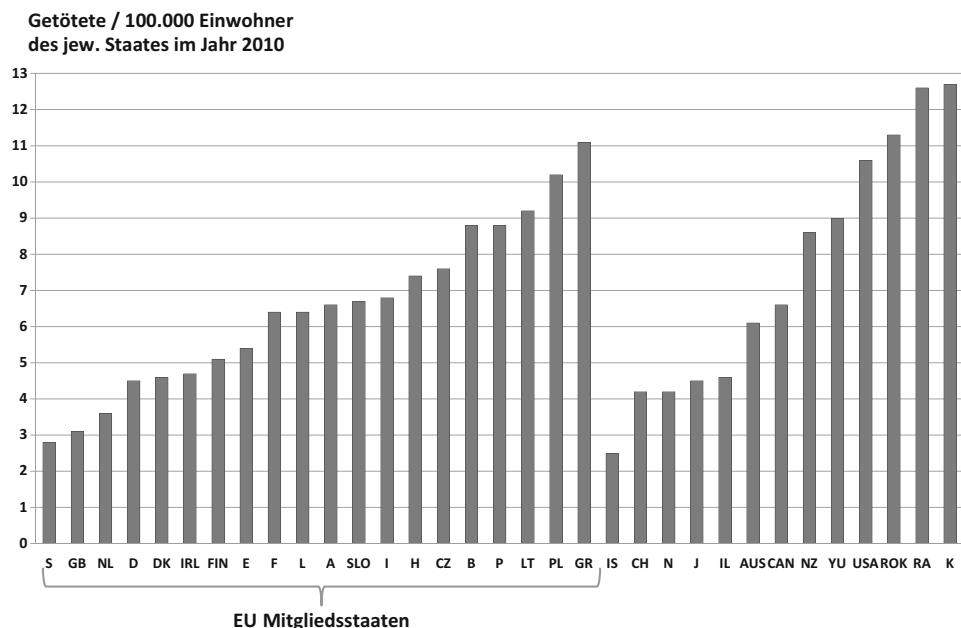


Abb. 3.24 Internationaler Vergleich der Getöteten/100.000 Einwohner 2010 [Irtad 11]

siko an einer Unfallverletzung zu versterben, höher ist. Letzteres wird im Wesentlichen auf Brustkorbverletzungen zurückgeführt [Otte 12; Carroll 09; FIMCAR 11; Johannsen 13]. Im internationalen Vergleich schneidet Deutschland gut ab. Im Falle Großbritanniens fällt auf, dass bei kleiner absoluter Anzahl von Getöteten der Anteil der Fußgänger doppelt so hoch ist wie in den anderen europäischen Ländern. Im Vergleich ist die Entwicklung der Getöteten pro 100.000 Einwohner der USA auffällig. Obwohl die USA 1970 im Vergleich zu Deutschland besser war, blieb die Entwicklung hinter der hier genutzten Vergleichsländer zurück. Mögliche Gründe hierfür sind vielfältig. Eine Annahme ist, dass Maßnahmen, die auf das Verhalten der Fahrer abzielen mit weniger Konsequenz in den USA verfolgt wurden als in anderen Ländern (z. B. Gurtbenutzung). Auch im Vergleich zu anderen europäischen Staaten schneidet die USA relativ schlecht ab, Abb. 3.24. Die stetig auf der Grundlage der Unfallforschung verbesserte passive Sicherheit von Pkw ist in ihrer zeitlichen Entwicklung in Abb. 3.19 mit der Einführung entsprechender Sicherheitsmaßnahmen angegeben. Trotz spektakulärer Einzelunfälle sind Bus und Eisenbahn nach Verkehrsleistung die sichersten Verkehrsmittel bezüglich des Risikos für tödliche Verletzungen, siehe Abb. 3.25. Demgegenüber sind Pkw-Insassen um den Faktor zehn, Motorradfahrer um den Faktor 100 stärker gefährdet.

In den Abb. 3.26 und 3.27 sind zwei Beispiele für die Bewegungsabläufe von ungeschützten Unfallopfern dargestellt. Beim Vergleich der Bewegungsstrajektorien des angefahrenen Fußgängers ist festzustellen, dass die Leiche (PMTO Post Mortales Test Objekt) weiter aufgeworfen wird als der Dummy, und dass die Aufwurfweite des realen Unfallopfers zwischen der von PMTO und Dummy liegt. Beim Dummy wirkt die Haubenvorderkante offensichtlich als Rotationspunkt.

Die Tab. 3.4, 3.5 sowie Abb. 3.28 zeigen die Kollisionsarten und Kollisionstypen nach Häufigkeit und/oder Schwere für verschiedene Verkehrsteilnehmer, und zwar die Kollisionsarten bei der Nfz/Pkw-Kollision, beim Reisebus-Alleinunfall und bei der Motorrad/Pkw-Kollision. Bei der Nfz/Pkw-Kollision sind alle denkbaren Kollisionstypen, bezogen auf die Zahl der Unfälle und der Getöteten, in fast gleicher Weise gefährlich. Für den Reisebus stellt nicht der Frontal- oder Heckaufprall, sondern das Umkippen und Überschlagen den dominanten Kollisionstyp dar. Das Bild bei der Motorrad/Pkw-Kollision ist differenziert: am häufigsten ist der Aufprall auf Straßen-Objekte im Zusammenhang mit Pkw-Kollisionen, am gefährlichsten ist der Frontalaufprall.

In den Abb. 3.29, 3.30, 3.31 und 3.32 sind die Summenhäufigkeiten von Kollisions schweren gezeigt: ν_{Koll} bei Motorradunfällen, EES und Δv beim Pkw-Frontalaufprall. Diese Art der Auftragung hat sich in der Unfallanalyse gegenüber Dichteverteilungen durchgesetzt. Beispielsweise ist zu erkennen, dass beim Primäraufprall von Motorrädern zu 40 % die Kollisionsgeschwindigkeiten unterhalb von 35 km/h, zu 80 % unterhalb von 60 km/h liegen. Der Primäraufprall ist erwartungsgemäß mit größerer Kollisionsgeschwindigkeit verbunden als der Sekundäraufprall.

Beim Offset-Frontalaufprall von Pkw werden 90 % aller Unfälle durch eine EES von 55 km/h abgedeckt, beim Aufprall mit voller Überdeckung sind es bereits 50 km/h (Abb. 3.30). Aus derartigen Ergebnissen der Unfallanalyse resultieren die Festlegungen für

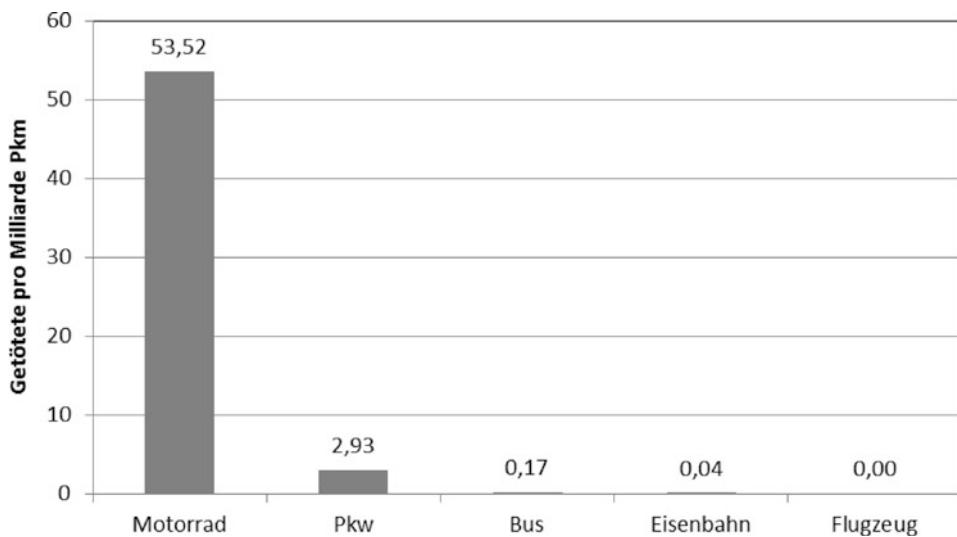
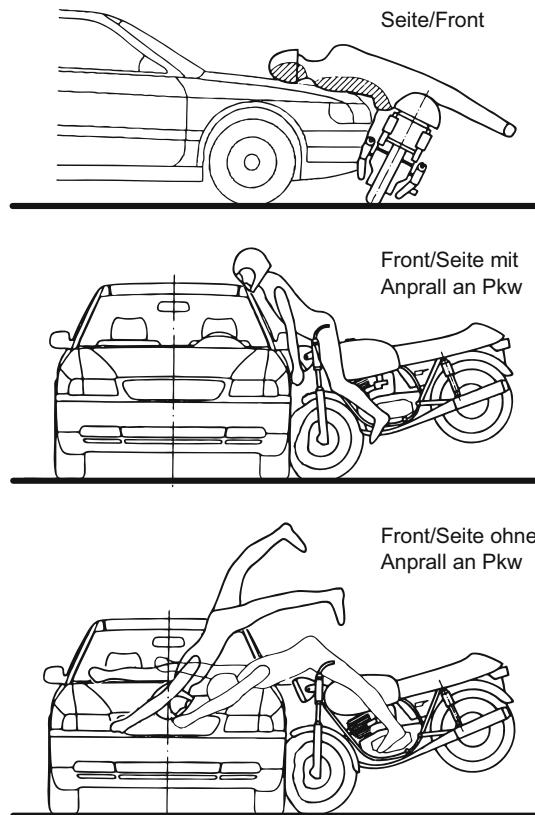


Abb. 3.25 Getötetenrate (Getötete pro Milliarde Personen-Kilometer) nach Art der Verkehrsbeteiligung in Deutschland 2005–2009 [StBA 11/2]

Abb. 3.26 Drei Kollisionsarten bei der Kollisionsart Motorrad/Pkw mit charakteristischen Bewegungsabläufen der Motorradfahrer



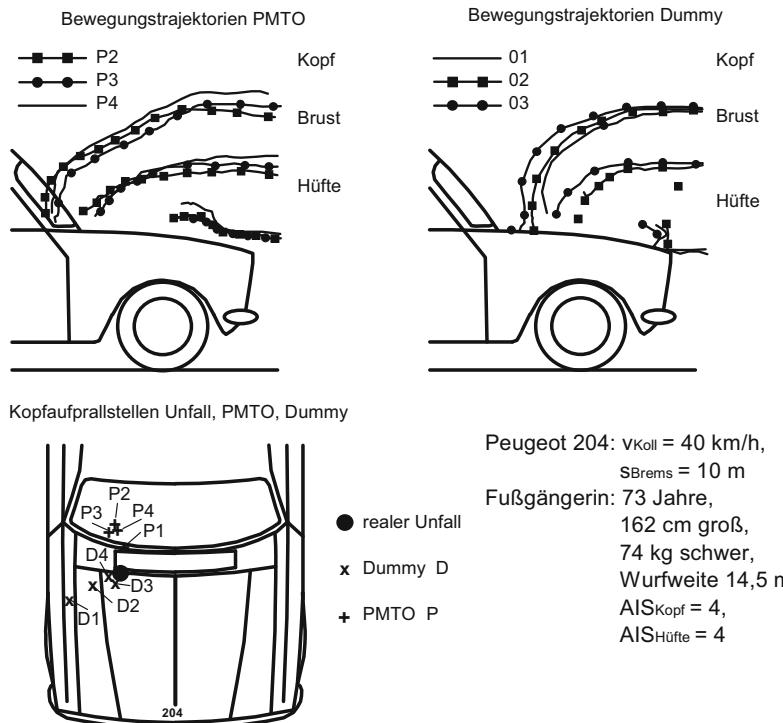


Abb. 3.27 Nachfahren eines realen Pkw/Fußgänger-Aufpralls im Labor. Vergleich von Bewegungstrajektorien und Kopfaufprallstellen [KOB 82; Heger 82; Appel 84/3]

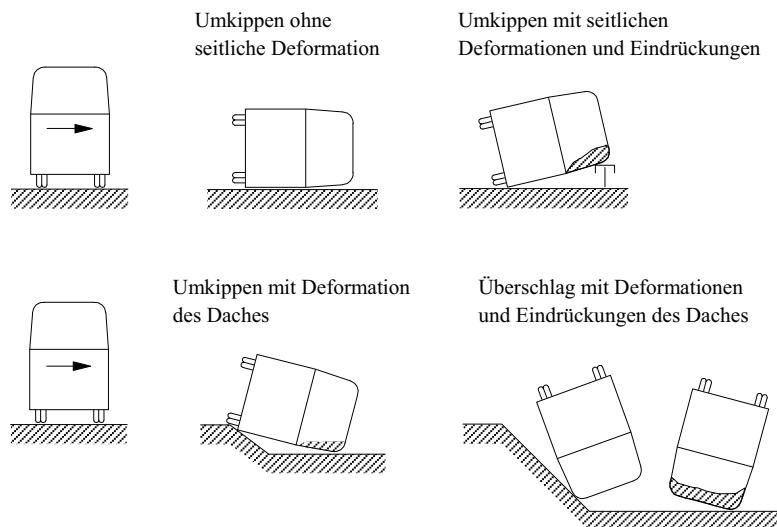
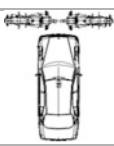
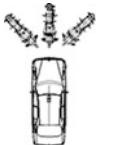
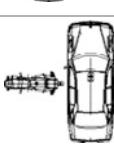
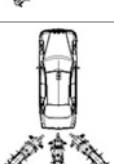
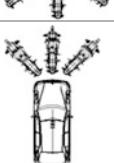
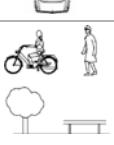


Abb. 3.28 Aufprallarten beim Umkippen und Überschlagen von Reisebussen (nach Riebeck, MAN)

Tab. 3.4 Kollisionstypen bei der Kollisionsart Nfz/Pkw bei Unfällen mit Getöteten oder Schwerverletzten im Pkw. Stichprobe: 185 Unfälle des GDV [Anselm 00]

Kollisionstyp Nfz/Pkw	Verunglückte im Pkw		Davon getötete Pkw-Insassen		Anzahl der Unfälle %
	Anzahl	%	Anzahl	%	
Front/Front	69	25,2	17	53,1	43
Front/Seite	55	20,1	7	21,9	40
Front/Heck	29	10,6	2	6,3	19
Heck/Front	51	18,6	2	6,3	35
Seite/Front	46	16,8	4	12,5	30
Sonstige (z.B. Streifkollision)	24	8,8	–	–	18
Gesamt	274	100,0	32	100,0	185
					100,0

Tab. 3.5 Kollisionstypen und Verletzungsschweren der Kollisionsart Motorrad/Pkw GIDAS 07.1999 bis 06.2012 [Otte 13]

Kollisionstypen Motorräder		Verletzungsschwere Motorradfahrer			
$n = 3133$		unverletzt	AIS 1	AIS 2+	
		←	100 %	→	
Typ 1 $n = 175$ 5,6 %		Kopf Thorax Beine	88,6 % 70,9 % 24,0 %	5,1 % 19,4 % 53,1 %	6,3 % 9,7 % 22,9 %
Typ 2 $n = 312$ 10,0 %		Kopf Thorax Beine	81,1 % 76,6 % 14,4 %	8,3 % 15,1 % 52,6 %	10,6 % 8,3 % 33,0 %
Typ 3 $n = 210$ 6,7 %		Kopf Thorax Beine	71,0 % 72,4 % 32,4 %	9,5 % 19,0 % 51,4 %	19,5 % 8,6 % 16,2 %
Typ 4 $n = 656$ 20,9 %		Kopf Thorax Beine	81,77 % 71,5 % 25,2 %	7,5 % 19,4 % 59,5 %	10,8 % 9,1 % 15,4 %
Typ 5 $n = 258$ 8,2 %		Kopf Thorax Beine	73,3 % 73,3 % 32,2 %	12,0 % 17,1 % 53,1 %	14,7 % 9,7 % 14,7 %
Typ 6 $n = 127$ 4,1 %		Kopf Thorax Beine	86,6 % 73,2 % 40,2 %	5,5 % 19,7 % 45,7 %	7,9 % 7,1 % 14,2 %
Typ 7 $n = 1379$ 44,0 %		Kopf Thorax Beine	79,8 % 67,2 % 38,6 %	8,7 % 19,2 % 48,2 %	11,5 % 13,6 % 13,2 %
$n = 16$	unbekannt				

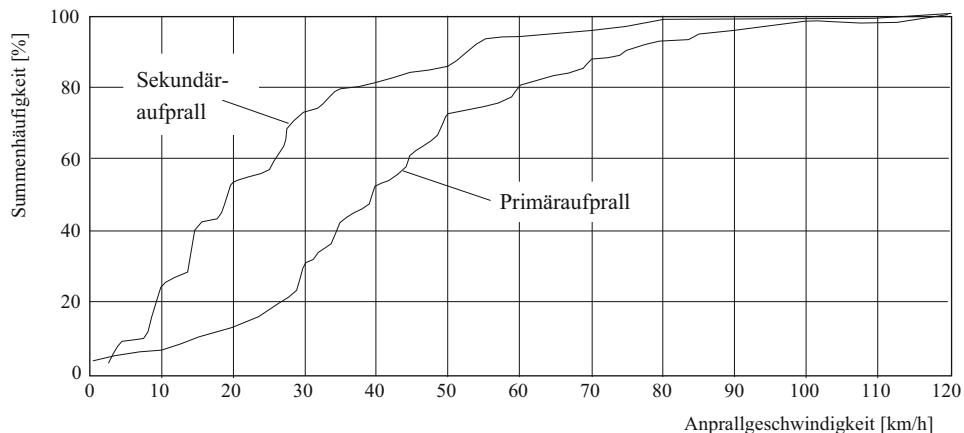


Abb. 3.29 Summenhäufigkeit der Anprallgeschwindigkeiten von Motorrädern beim Primär- bzw. Sekundäraufprall. Stichprobe: 402 bzw. 143 InDepth-Fälle der MHH mit verletzten Motorradfahrern [Otte 98]

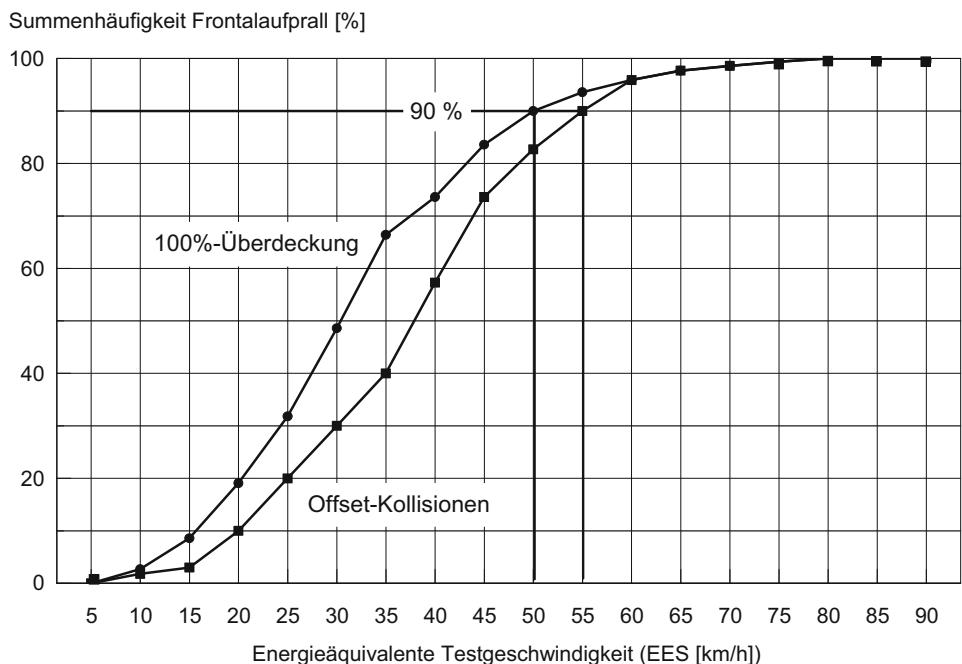


Abb. 3.30 Summenhäufigkeit der Unfallschwere EES beim Pkw-Frontalaufprall für zwei verschiedene Aufpralltypen (nur Unfälle mit Verletzten, nach Daimler 1990)

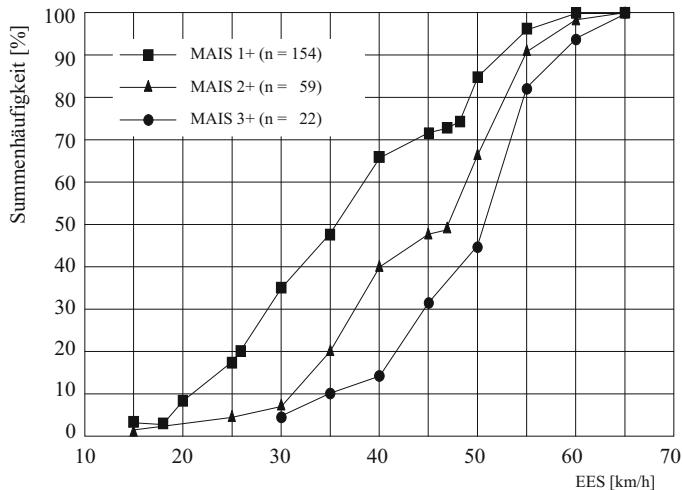


Abb. 3.31 Summenhäufigkeit der Unfallschwere EES für verschiedene Verletzungsschweren bei Pkw/Pkw-Frontalkollisionen mit Überdeckungsgraden kleiner 50 %, angegurtete Frontinsassen in MB-Fahrzeugen, $n = 235$ [Zeidler 97]

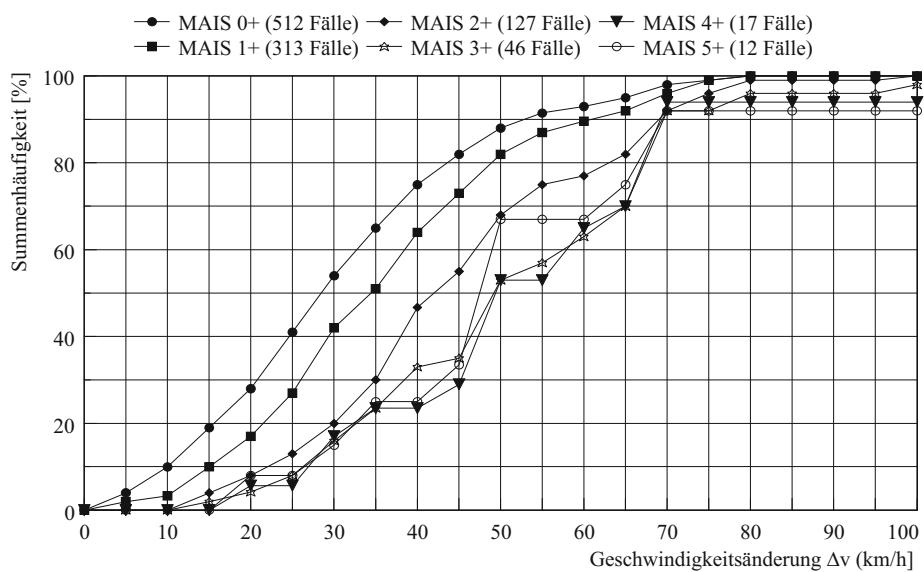


Abb. 3.32 Summenhäufigkeit der Unfallschwere Δv für Pkw-Fahrer mit verschiedenen Verletzungsschweren in Frontalkollisionen [Appel 99]

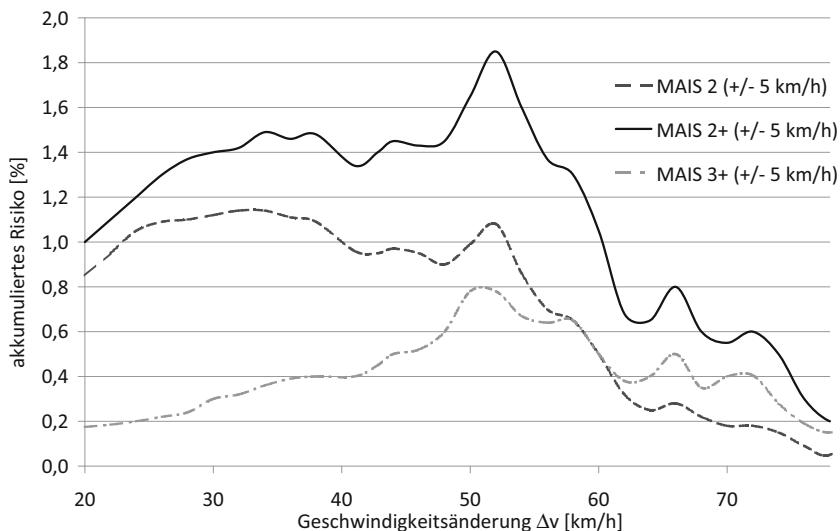


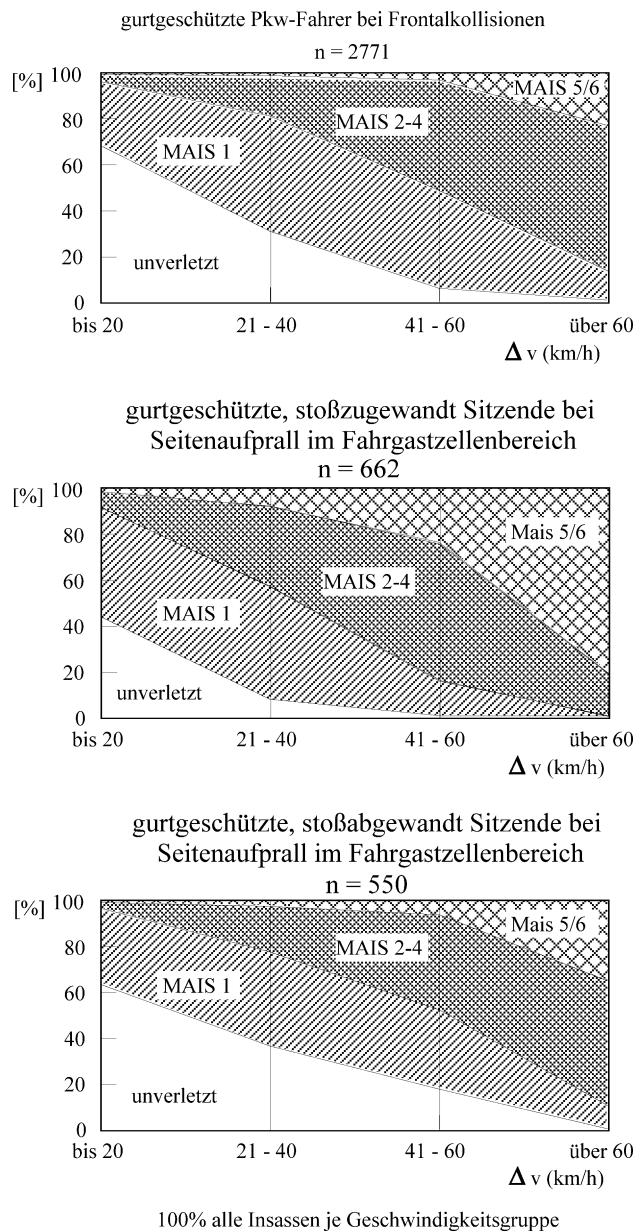
Abb. 3.33 Akkumuliertes Verletzungsrisiko unter Berücksichtigung der Exposition [Adolph 12]

Testverfahren. Für kleinere Verletzungsschweren liegen die Unfallschweren niedriger. So wird bei Pkw-Frontalkollisionen der Medianwert von 50 % bei Berücksichtigung aller Unfälle (MAIS 0+) bei einer Geschwindigkeitsänderung von 28 km/h und für Schwerverletzte (MAIS 3+) bei 49 km/h erreicht (Abb. 3.32).

Der Ansatz der Bestimmung der Testgeschwindigkeit auf Basis von Summengeschwindigkeiten setzt voraus, dass Insassen bei einer Testschwere, die geringer ist als die Gewählte, durch die höhere Testschwere geschützt werden. Sinnvoller scheint es zu sein, neben dem Risiko eine bestimmte Verletzungsschwere zu erleiden auch die Exposition bei der entsprechenden Geschwindigkeit zu berücksichtigen. In der Regel treten Unfälle im niedrigen Geschwindigkeitsbereich deutlich häufiger auf als bei höheren Geschwindigkeiten. In Abb. 3.33 ist die Kombination von Verletzungsschwere und Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit des Δv für Unfälle mit mehr als 75 % Überdeckung dargestellt. Es zeigt sich, dass ein Maximum bei ca. 52 km/h vorliegt. Bei Geschwindigkeitsänderungen über 55 km/h sinkt das Risiko deutlich.

Es folgen einige Abbildungen zu verschiedenen Korrelationen zwischen Geschwindigkeiten, Verletzungsschweren, Wurfweiten u.ä. Die Abb. 3.34 bezieht sich auf den Pkw-Frontal- und Seitenaufprall. Es stellt für jeweils vier Bereiche der Unfallschwere Δv die Anteile von Verletzungsschweren dar. Es ist beispielsweise zu erkennen, dass im Δv -Bereich von 41 bis 60 km/h tödliche Verletzungen bei Frontalkollisionen in etwa 2 % aller untersuchten Fälle dieses Geschwindigkeitsbereiches auftreten, bei Seitenkollisionen dagegen bei etwa 20 % der Fälle, wenn es sich um den stoßzugewandt Sitzenden handelt. Hieraus wird die weitaus größere Gefährdung durch den Seitenaufprall deutlich. Bei Pkw/Fußgängerkollisionen ist an Hand von gerichtsmedizinischen Untersuchungen

Abb. 3.34 Verletzungsschweren von Pkw-Insassen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsänderung Δv bei Frontal- und Seitenkollisionen (Verkehrsunfallforschung MH Hannover)



der Universität Heidelberg der in Abb. 3.35 dargestellte Zusammenhang von Kollisionsgeschwindigkeit mit Art und Schwere der Verletzungen ermittelt worden. Schwere Schädel-Hirnverletzungen infolge Kopfaufpralls treten bei Anfahrgeschwindigkeiten oberhalb von 30 km/h auf.

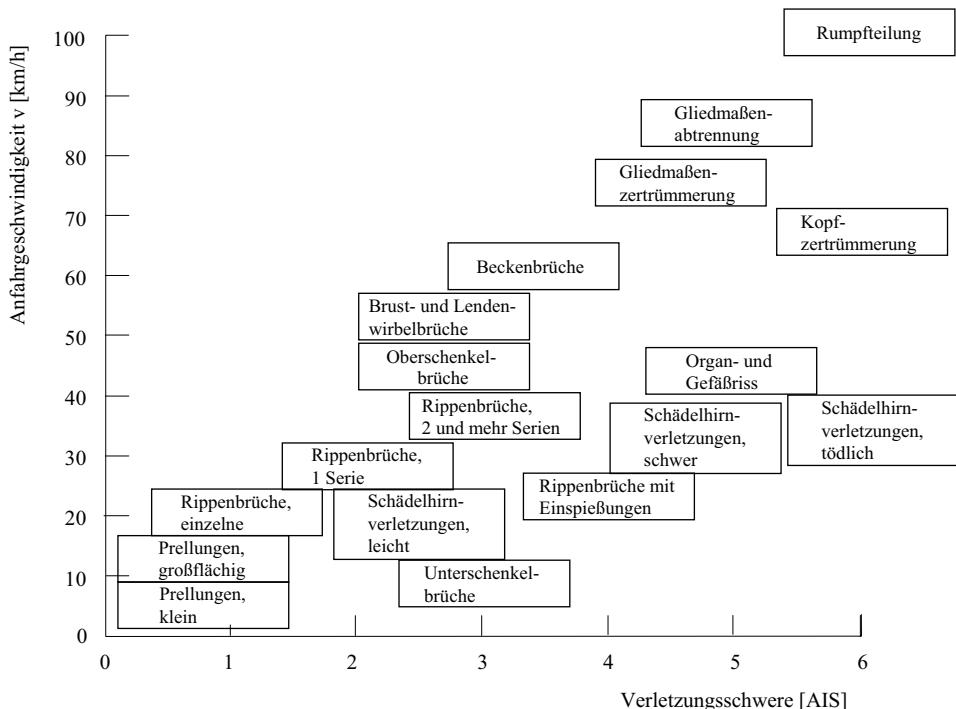


Abb. 3.35 Zusammenhang von Verletzungsschwere, Verletzungsart und Aufprallgeschwindigkeit bei Pkw/Fußgänger-Kollisionen [Appel 84/3]

In der Vergangenheit sind, insbesondere in den USA, Unfälle aufgetreten, bei denen der Airbag als solcher schwere oder sogar tödliche Verletzungen verursacht hat [Langwieder 01; Müller 10; NHTSA 08]. Die amerikanische Gesetzgebung hat darauf mit einer Ergänzung zum Standard FMVSS 208 reagiert, die airbaginduzierte Verletzungen auch bei geringer Unfallschwere und bei OOP-Situationen bei kleinen Insassen, einschließlich Kinder, verhindern soll.

Die realen Wurfweiten der von Pkw angefahrenen Fußgänger und Radfahrer hängen u. a. von der Aufprallstelle am Fahrzeug ab. Abbildungen 3.36 und 3.37 zeigen hierzu an Hand realer Unfälle ermittelte Ergebnisse der Unfallforschung an der MHH. Abbildung 3.38 beschreibt neuere Versuchsergebnisse zu den Wurfweiten von Fahrrädern und den darauf sitzenden Dummys, wenn das Fahrrad im Vollstoß von einem Pkw seitlich getroffen wird.

Die Abb. 3.39 und 3.40 beziehen sich auf die Deformationslängen und die daraus ermittelten Steifigkeiten der Frontstrukturen gängiger Pkw, die in Crashtests auf eine OUB bzw. ODB ermittelt wurden. Die Überdeckungen und die Aufprallgeschwindigkeiten waren 100 % und 48 km/h beim Test nach FMVSS 208 sowie 100 % und 56 km/h beim US-NCAP-Test. Beim Euro NCAP Test fährt das Testfahrzeug mit 40 % Überdeckung und

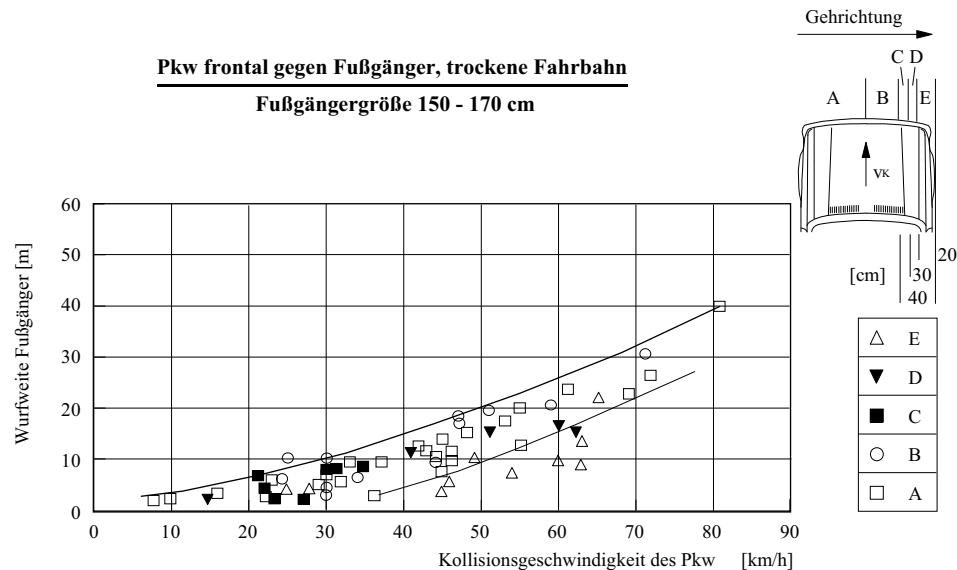


Abb. 3.36 Wurfweiten von Fußgängern mit einer Körpergröße von 150 bis 170 cm in Abhängigkeit von der Kollisionsgeschwindigkeit des Pkw, unterschieden nach der Anprallstelle an der Pkw-Front. Stichprobe: 60 InDepth-Fälle [Otte 89]

64 km/h gegen die deformierbare Barriere. Gemäß Delannoy et al. [Delannoy 05] wird das Deformationselement von allen heutigen Fahrzeugen komplett durchschlagen, so dass für die Ermittlung des Deformationswegs für Euro NCAP Tests die 540 mm Tiefe der Testbarriere von dem aus Integration ermittelten Weg abgezogen wurde. Die Deformationslängen sind bei den Tests mit voller Überdeckung bei höherer Geschwindigkeit (US-NCAP) ca. 10 bis 20 cm größer als bei geringerer Geschwindigkeit (FMVSS 208). Bei den Offset-Tests (Euro NCAP) ist wiederum eine ca. 10 bis 20 cm größere Deformationslänge gegenüber den US-NCAP-Tests zu erkennen. Dies ist einerseits auf die Beaufschlagung von nur einer Seite des Fahrzeugs als auch auf die höhere Geschwindigkeit zurückzuführen. Bei letzterem ist jedoch zu beachten, dass bei der Deformation des Crashelements bereits Energie abgebaut wird und die zu absorbierende Energie nicht entsprechend der höheren Crashgeschwindigkeit steigt. Werden die Kräfte vereinfacht als Produkt von Masse und Verzögerung berechnet und ferner eine lineare Kraft/Weg-Kennung angenommen, dann ergeben sich bei allen Tests Steifigkeiten zwischen ca. 600 und 1600 kN/m. Eine eindeutige Zunahme von Deformationen und Steifigkeiten mit der Fahrzeugmasse ist kaum festzustellen. Bei einer bestimmten Fahrzeugmasse schwanken Deformationen und damit Steifigkeiten um bis zu mehr als 100 %. Bemerkenswert ist, dass die Steifigkeiten in den Tests mit 40 % Überdeckung vergleichbar mit denen mit voller Überdeckung sind. Es ist davon auszugehen, dass durch die größere Deformation Deformationszonen mit höherem Kraftniveau aktiviert werden.

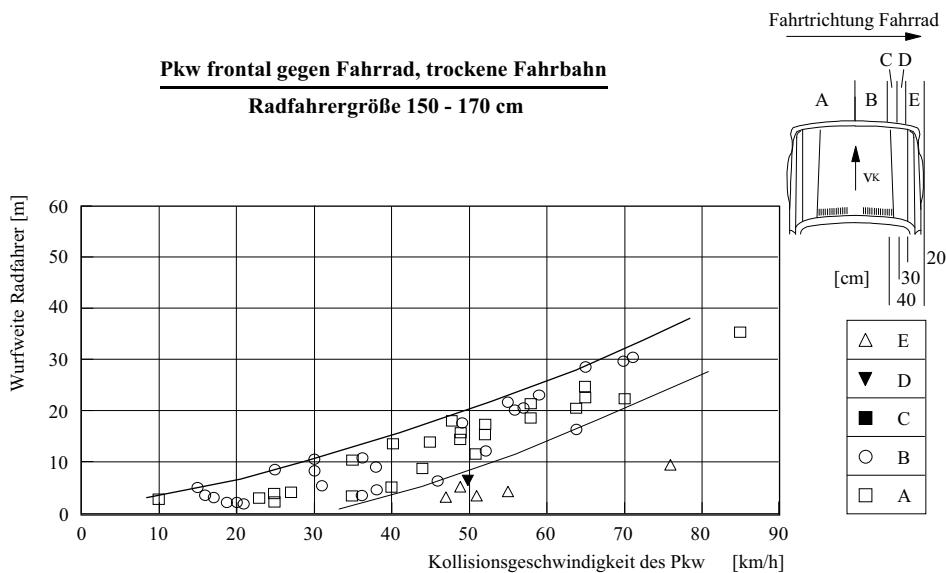
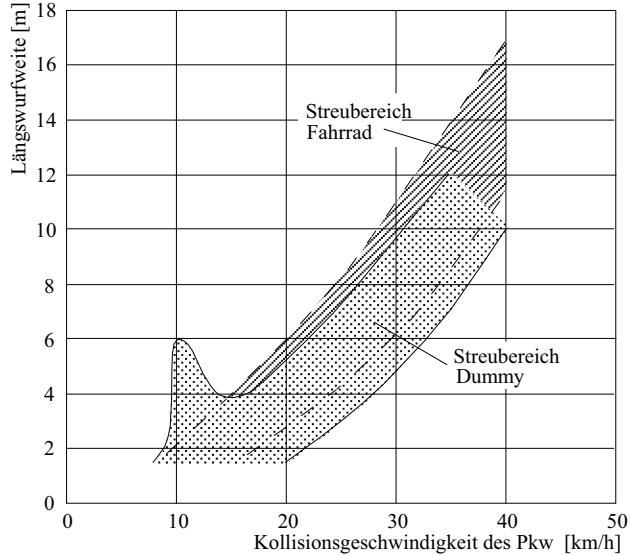


Abb. 3.37 Wurfweiten von Radfahrern mit einer Körpergröße von 150 bis 170 cm in Abhängigkeit von der Kollisionsgeschwindigkeit des Pkw, unterschieden nach der Anprallstelle an der Pkw-Front. Stichprobe: 56 InDepth-Fälle [Otte 89]

Abb. 3.38 Wurfweiten des Dummies und des Fahrrades beim seitlichen Vollstoß eines Pkw gegen ein Fahrrad mit darauf sitzendem Dummy. Eingrenzung der Einzelwerte nach [Wegner 00/1, 00/2]



Sicherheitstests sollen einerseits möglichst einfach und nachvollziehbar sein, andererseits sollen sie die Unfallrealität möglichst gut wiedergeben. Die Unfallrealität wird durch die Unfallforschung beschrieben. Der heutige Stand der Testverfahren, gesetzlich vorge-

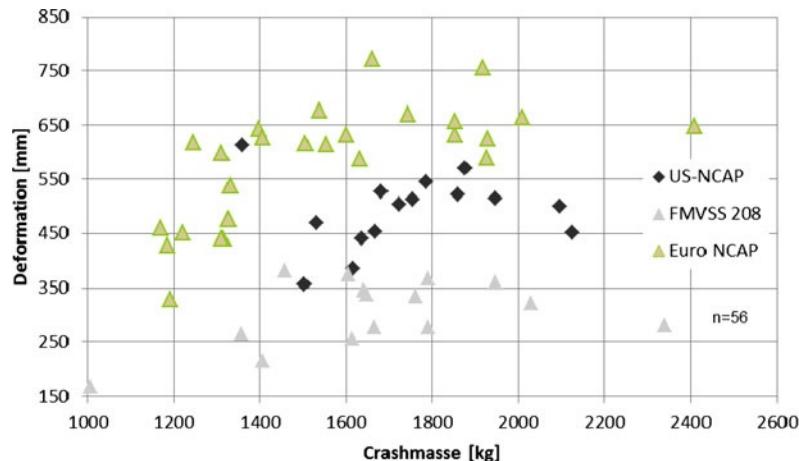


Abb. 3.39 Deformationslängen von Pkw als Funktion der Crash-Masse bei unterschiedlichen Frontalcrash-Bedingungen [NHTSA 12]

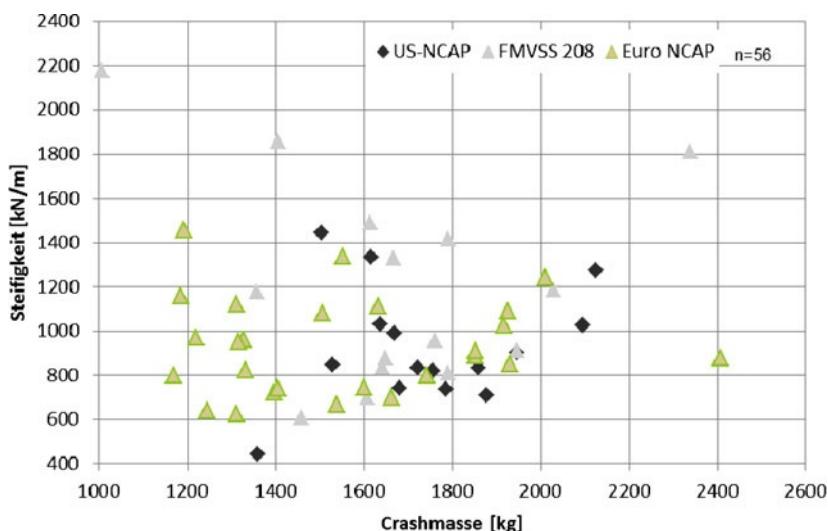
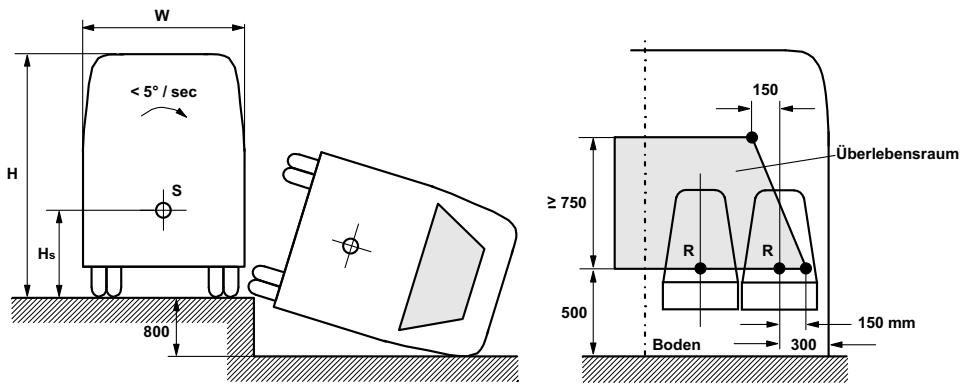


Abb. 3.40 Frontsteifigkeiten von Pkw als Funktion der Crash-Masse [NHTSA 12]

schrieben, seitens des Gesetzgebers in Vorbereitung oder von Dritten zur Information der Öffentlichkeit durchgeführt, ist in den Tab. 3.6, 3.7 und 3.8 dargestellt. Auf die Vielzahl von Vorschriften, die der amerikanische Gesetzgeber zur Vermeidung von Airbagverletzungen erlassen hat, kann hier nicht eingegangen werden. Diese sind in einer Ergänzung zum Standard FMVSS 208 im Jahre 2002 als „Final Rule“ erlassen worden. Im Mittelpunkt stehen hierbei Kinder, aber auch Erwachsene, die in sog. OOP-Situationen (Out of Position) von



Forderung: Keine Eindringung des Dachbereiches in den Überlebensraum beim Umstürzen
(R Sitzreferenzpunkt)

Abb. 3.41 Gesetzlich vorgeschriebener Umsturzversuch für Reisebusse zur Überprüfung der Dachfestigkeit (ECE-R 66)

der Wucht des sich öffnenden Airbags getroffen werden. Von Anfang 1999 bis zum Ende 1999, also innerhalb eines Jahres, wurden in den USA durch den Airbag 146 Personen getötet, davon die Mehrzahl Kinder [NHTSA 99; Mao 01].

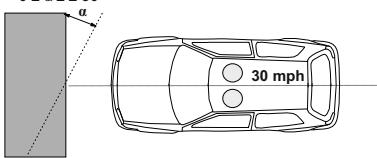
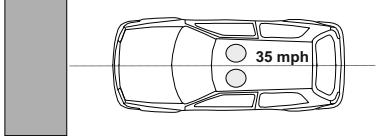
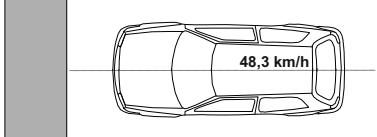
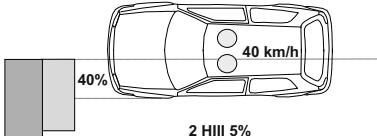
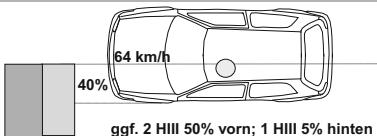
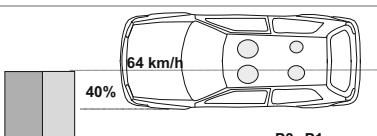
Der Strukturtest für Reisebusse (Abb. 3.41) verlangt, dass bei dem Umkippen auf das Dach ein bestimmter Überlebensraum erhalten bleibt, das Dach also nicht zu weit eingedrückt wird.

Das Testverfahren zur Überprüfung ausreichender Nachgiebigkeiten beim Fußgängeranprall gemäß EEVC WG17 (Abb. 3.42) wurde zunächst im kleineren Umfang als freiwillige Selbstverpflichtung der Autoindustrie und anschließend in Phasen im Rahmen EG 78/2009 mit Übergangszeiträumen bis 2019 umgesetzt. Aktuell wird ein geänderter Beinimpaktor diskutiert.

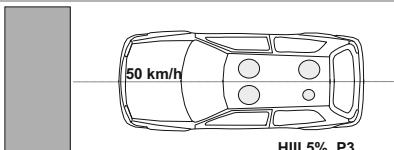
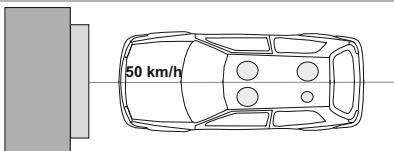
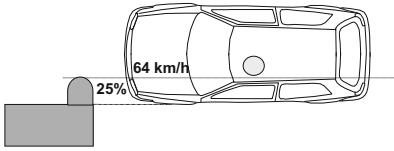
In Tab. 3.8 sind einige Ergebnisse der Unfall- und Sicherheitsforschung zu Toleranzgrenzen des lebenden Menschen und daraus abgeleiteten Schutzkriterien beim Dummy zusammengestellt. Ohne im Einzelnen auf die äußerst umfangreiche Literatur, u. a. [SAE J885] einzugehen, ist der Tab. 3.9 zu entnehmen, ob es sich um eine Belastungsgrenze des Menschen oder um ein zu einem Testverfahren gehöriges Schutzkriterium handelt. Toleranzgrenzen entsprechen etwa einer Verletzungsschwere AIS 4, sie werden in aufwendiger Weise über Tierversuche, Leichenversuche, Freiwilligenversuche, Verfahren der statistischen Biomechanik – unter Inkaufnahme biologischer Streubreiten – ermittelt und ständig verbessert. Schutzkriterien entsprechen etwa einer Verletzungsschwere AIS 3, sie sind bei den gesetzlich vorgeschriebenen Tests einzuhalten.

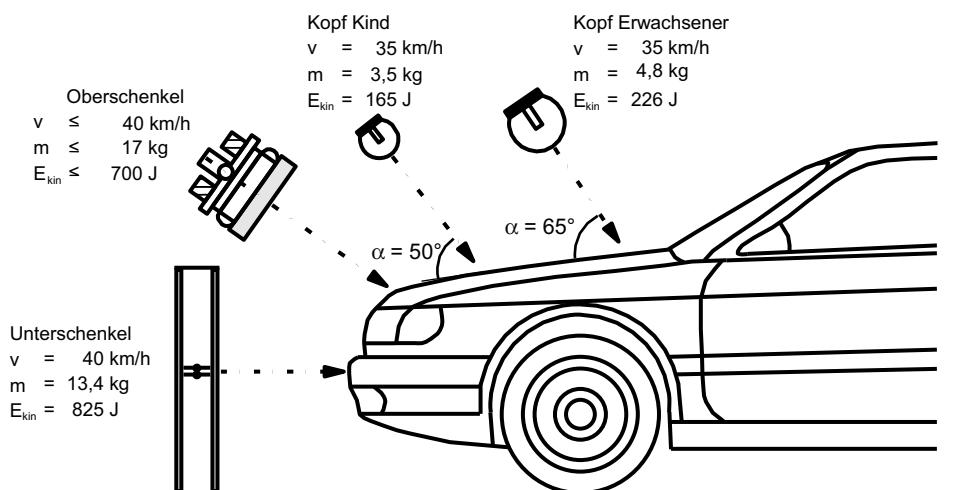
Die aus den menschlichen Toleranzgrenzen abgeleiteten Schutzkriterien, die bei den jeweils vorgeschriebenen Dummym im Frontal- und Seitentest einzuhalten sind, sind auszugsweise in der Tab. 3.8 sowie den Abb. 3.43 und 3.44 angegeben.

Tab. 3.6 Übersicht über die Crashtests für den Frontalaufprall (Dummy Hybrid III 50 % für Erwachsene, Dummy P1 1/2 und P3 für Kinder im Alter von 1 1/2 und 3 Jahren – ab 2013 werden P1 1/2 und P3 durch Q1 1/2 und Q3 1/2 ersetzt, Stand Januar 2013)

Testverfahren Frontalaufprall	Hindernis Aufprallwinkel	Überdeckung Geschwind.	Gesetz Anwendung
	ODB 0°	40 % 56 km/h	ECE-R 94 TRIAS 47-4 GB 20913-2007 AIS-098/F ADR 73/00
	ODB 0°	100 % 56 km/h	FMVSS 208 nicht-gesetzlich: US-NCAP JNCAP KNCAP
	ODB 0°	100 % 48,3 km/h	ECE-R 12 Lenkanlagentest
	ODB 0°	40 % 40 km/h	FMVSS 208
	ODB 0°	40 % 64 km/h	nicht-gesetzlich: USA IIHS JNCAP C-NCAP KNCAP
	ODB 0°	40 % 64 km/h	nicht-gesetzlich: Euro NCAP Latin NCAP ANCAP

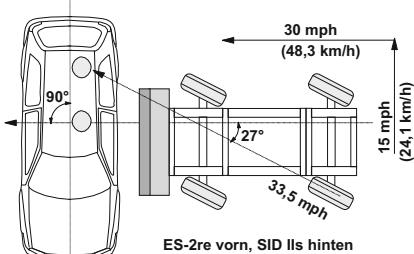
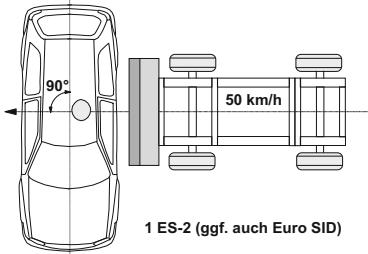
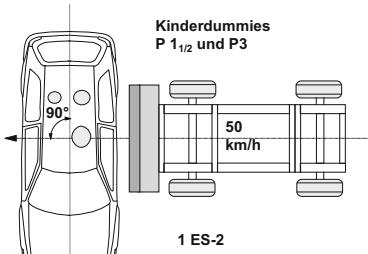
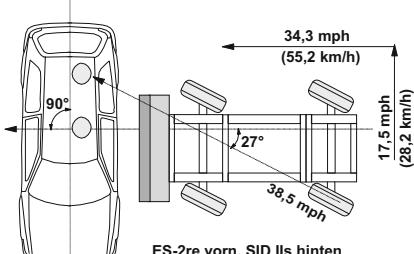
Tab. 3.6 (Fortsetzung)

Testverfahren Frontalaufprall	Hindernis Aufprallwinkel	Überdeckung Geschwind.	Gesetz Anwendung
	OUB 0°	100 % 50 km/h	nicht-gesetzlich: C-NCAP
	ODB 0°	100 % 50 km/h	nicht-gesetzlich: Vorschlag für Überarbeitung der ECE R94
	OUB 0°	25 % 64 km/h	nicht-gesetzlich: IIHS Small Overlap Test Prozedur

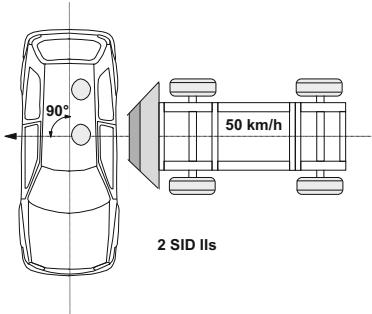
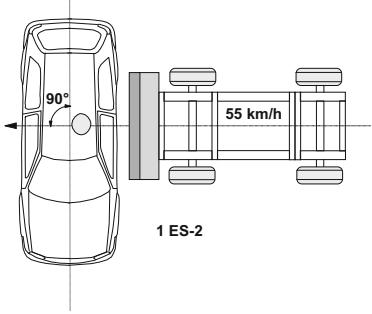
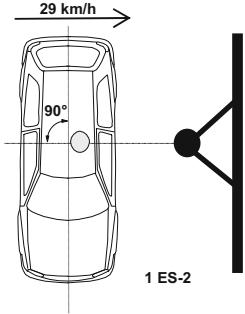
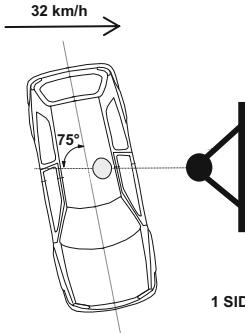
**Abb. 3.42** Komponenten-Testverfahren mit Impaktoren für die Pkw/Fußgänger-Kollision nach EEVC-WG17 [EEVC 98] mit Anpassungen gemäß EG 78/2009

Auf weitere, in der neuen US-Gesetzgebung zum Standard FMVSS 208 vorgeschriebene Verletzungskriterien kann hier nicht näher eingegangen werden. Zu nennen sind beispielsweise: HIC₁₅ für das dreijährige Kind kleiner 570, Brusteindrückung kleiner 76, 50, 42 mm je nach Stoßrichtung und Rückhaltesystem.

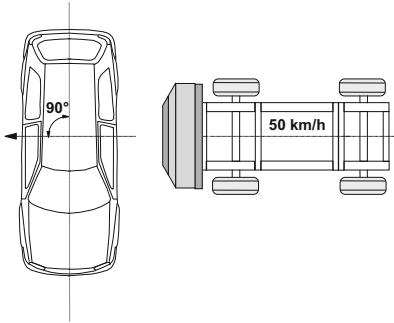
Tab. 3.7 Übersicht über die Crashtests für den Seitenaufprall (P1 1/2 und P3 Kinderdummy für das Alter von 1 1/2 und 3 Jahren – ab 2013 werden P1 1/2 und P3 durch Q1 1/2 und Q3 ersetzt, Stand Januar 2013)

Testverfahren Seitenaufprall	Hindernis Aufprallwinkel	Überdeckung Geschwind.	Gesetz Anwender
	BDB mit 1368 kg aus 63° Barriere über Boden 279 mm	33,5 mph (≈ 54 km/h, entspricht $V_{\text{barriere},\text{längs}} \approx 48,3 \text{ km/h}$ und $V_{\text{Fzg.},\text{längs}} \approx 24,1 \text{ km/h}$)	FMVSS 214
	BDB mit 950 kg aus 90°, Barriere über Boden 300 mm	50 km/h	ECE-R 95 TRIAS 47-3-2000 GB 20071-2006 AIS-099/F KMVSS 102 ADR 72/00 nicht-gesetzlich: C-NCAP ANCAP
	BDB mit 950 kg aus 90°, Barriere über Boden 300 mm	50 km/h	nicht-gesetzlich: Euro NCAP
	BDB mit 1368 kg aus 63° Barriere über Boden 279 mm	38,5 mph (≈ 62 km/h, entspricht $V_{\text{barriere},\text{längs}} \approx 55,2 \text{ km/h}$ und $V_{\text{Fzg.},\text{längs}} \approx 28,2 \text{ km/h}$)	nicht-gesetzlich: US-NCAP

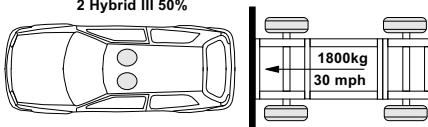
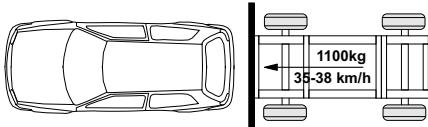
Tab. 3.7 (Fortsetzung)

Testverfahren Seitenaufprall	Hindernis Auf-prallwinkel	Überdeckung Geschwind.	Gesetz Anwender
	BDB mit 1500 kg aus 90° Barriere über Boden 379 mm	50 km/h	nicht-gesetzlich: USA IIHS
	BDB mit 950 kg aus 90°, Barriere über Boden 300 mm	55 km/h	nicht-gesetzlich: JNCAP KNCAP
	Pfahl	29 km/h	nicht-gesetzlich: Euro NCAP KNCAP ANCAP
	Pfahl 75°	32 km/h	nicht-gesetzlich: US NCAP

Tab. 3.7 (Fortsetzung)

Testverfahren Seitenaufprall	Hindernis Aufprallwinkel	Überdeckung Geschwind.	Gesetz Anwender
	BDB mit 1300 kg aus 90° Barriere über Boden 300 mm	50 km/h	nicht-gesetzlich: EEVC Vorschlag für Überarbei- tung ECE R95 und vermutlich zukünftiges Euro NCAP Seitenaufpralltest- verfahren

Tab. 3.8 Übersicht über die Crashtests für den Heckaufprall (Stand Januar 2013)

Testverfahren Heckaufprall	Hindernis Aufprallwinkel	Überdeckung Geschwind.	Gesetz Anwender
2 Hybrid III 50% 	BUB mit 1800 kg	100 % 48,3 km/h	FMVSS 301
	BUB mit 1100 kg	100 % 35–38 km/h	ECE-R 34

Im Bereich der Frontalaufprallkompatibilität zwischen Fahrzeugen, die bisher im Wesentlichen als ein Problem von unterschiedlichen Steifigkeiten leichterer und schwerer Fahrzeuge bzw. unterschiedlicher Massen verstanden wurden, zeigen neueste Forschungsergebnisse, dass der sogenannten geometrischen Kompatibilität eine entscheidende Bedeutung zukommt [FIMCAR 11; Johannsen 11]. Unter geometrischer Kompatibilität wird verstanden, dass die Crashlasten bei beiden Unfallpartnern in Bereiche mit ausreichender Energieaufnahmekapazität eingeleitet werden. Das bedeutet, dass die Crashstrukturen in allen Fahrzeugen etwa auf gleicher Höhe liegen müssen und dass die Kräfte über eine möglichst große Fläche verteilt werden. Aufgrund ähnlicher Ergebnisse haben sich Autohersteller im Jahr 2003 darauf geeinigt, SUV und Pick-Ups/Leicht-Lkw (Light Truck Vehicle, LTV) für den amerikanischen Markt so zu bauen, dass relevante Strukturen dieser Fahrzeuge im Bereich der Crashstrukturen von Pkw liegen [Barbat 05; O'Reilly 03]. Diese Selbstverpflichtung wurde bis spätestens September 2009 voll umgesetzt. 2011 veröffentlichte IIHS, dass diese Selbstverpflichtung die „Aggressivität“ von SUV auf das Niveau von normalen Pkw der gleichen Masse gesenkt [Teoh 11]. Für LTV konnte die „Aggressivität“

Europa ECE R94		USA FMVSS 208			
		HIII 50%ile		HIII 5%ile	
		48 km/h gegurtet	48 km/ ungegurtet	32 – 40 km/h ungegurtet	alle Lastfälle
Kopfbeschleunigungskriterium	1000 (HPC)				
Kopfbeschleunigung a_{res3ms}	80 g				
Halsverletzungskriterium	Kraft-Zeitverlauf	700 (HIC15)	1000 (HIC 36)	700 (HIC15)	700 (HIC15)
Hals Extensionsmoment	57 Nm				
Deformation Brustbein	50 mm				
Brust VC	1 m/s				
Oberschenkel-längskraft	Kraft-Zeit-Verlauf	60 g	60 g	60 g	60 g
Knieverschiebung	15 mm				
Unterschenkel-längskraft	8 kN	63 mm	76,2 mm	63 mm	52 mm
Tibia Index	1,3	Oberschenkel-längskraft	10 kN	10 kN	6,8 kN

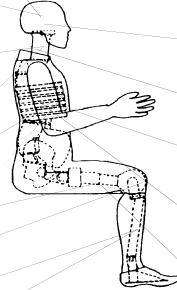


Abb. 3.43 Schutzkriterien am Hybrid III-Dummy beim Frontalaufprall (Stand Januar 2013)

Europa ECE R95		USA FMVSS 214	
		ES-2re	SID IIs
Kopfbeschleunigungskriterium	1000 (HPC)	Kopfbeschleunigungskriterium	1000 (HIC36)
Rippeneindrückung RDC	42 mm	Rippeneindrückung RDC	44 mm
Brust VC	1 m/s	Abdomenkraft ΣAPF	2,5 kN
Abdomenkraft ΣAPF	2,5 kN	LWS Beschleunigung max	60 g
Schambeinfugenkraft PSPF	6 kN	Σ Beckenkräfte	5,525 kN
		Schambeinfugenkraft PSPF	6 kN

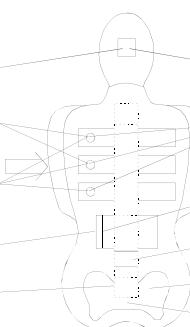


Abb. 3.44 Schutzkriterien am Euro-SID, ES-2, ES-2re und SID IIs Dummy beim Seitenaufprall (FMVSS 214 auch seitlicher Pfahlaufprall) (Stand Januar 2013)

tät“ ebenfalls deutlich gesenkt werden, sie bleib jedoch noch oberhalb der gleichschwerer Pkw. In Europa wird aktuell diskutiert, zusätzlich zum Off-set Test einen Test mit voller Überdeckung einzuführen. In diesem Test sollte neben den Dummymesswerten auch die Lage der Fahrzeugcrashstrukturen bewertet werden, um eine geometrische Kompatibilität gesetzlich zu verlangen [Johannsen 12/1].

Obwohl davon ausgegangen wurde, dass Probleme mit der Fahrgastzellensteifigkeit insbesondere bei leichteren Fahrzeugen auftreten, konnte mit Fahrzeugen, die ECE Regelung R94 erfüllen kein Zusammenhang mit dem Massenverhältnis nachgewiesen werden [FIM-CAR 11]. Die Verletzungswahrscheinlichkeit ist jedoch in leichteren Fahrzeugen größer, was aufgrund des fehlenden Zusammenhangs mit Fahrgastzellenintrusionen auf die größere Geschwindigkeitsänderung im leichten Fahrzeug aufgrund der Impulserhaltung zurückgeführt wurde.

Tab. 3.9 Mechanische Belastungsgrenzen des Menschen unter stoßartiger Belastung [Seiffert 85]

Körperteil	Mechanische Größe	Belastungsgrenzen
Ganzer Körper	Beschleunigung $a_{x,\max}$	40...80 g
Gehirn	Beschleunigung a_x	40...45 g über 160...220 ms
	Beschleunigung $a_{x,\max}, a_{y,\max}$	100...300 g
		WSU-Kurve mit z. B. 60 g bei $t > 45$ ms
	HIC (Head Injury Criterion), HPC	1000 (Schutzkriterium)
	Rotatorische Beschleunigung	1800...7500 rad/s ²
Knöcherner Schädel, Stirn	Beschleunigung $a_{x,\max}, a_{y,\max}$, Stirnkraft	80...300 g je nach Größe der Stoßfläche 120...200 g, 4000...6000 N
Halswirbelsäule	Beschleunigung $a_{x,\max}$ (gemessen am Thorax)	30...40 g
	Beschleunigung $a_{y,\max}$ (gemessen am Thorax)	15...18 g
	Kraft F_x	1200...2600 N Scherbelastung
	Flexion α_{\max} (Neigung, vorwärts)	80°...100°
	Extension α_{\max} (Streckung, rückwärts)	80°...90°
	NIC (Neck Injury Criterion)	15 m ² /s ² (Schutzkriterium)
Thorax	Beschleunigung $a_{x,\max}$	40...60 g (für $t > 3$ ms) > 60 g (für $t < 3$ ms)
	Kraft F_x (äußere Kontaktkraft)	4000...8000 N
	Thorax-Kompression frontal D_x	7,6 cm
Becken, Oberschenkel	Kraft F_x	6400...12.500 N bei Krafteinleitung im Knie
	Beschleunigung $a_{y,\max}$	50...80 g (gemessen am Becken)
Schienbein	Kraft F_x (axial)	2500...5000 N
	Moment M_x (Biegung)	120...170 Nm

Während weltweit Fahrzeuge mit voller Überdeckung und/oder 40 % Off-set im Rahmen der gesetzlichen Tests und Verbrauchsschutztests überprüft werden, wird von verschiedenen Autoren auf ein hohes Verletzungsrisiko bei Unfällen mit kleiner Überdeckung hingewiesen [FIMCAR 11; Sherwood 09], der Anteil der Unfälle mit kleiner Überdeckung an allen Unfällen ist jedoch gering, siehe Abb. 3.45. Unter Unfällen mit kleiner Überdeckung werden Unfälle verstanden, bei denen die Hauptstrukturen nicht beaufschlagt werden, da die Überdeckung entweder an den Seiten oder in der Fahrzeugmitte bei schmalen Objekten zu gering ist. Infolge dessen, entwickelt IIHS eine Testprozedur für geringe Überdeckung [IIHS 12].

Bei eingeklemmten Insassen, die mit Hilfe der technischen Rettung versorgt werden müssen, überwiegen zeitkritische innere Verletzungen im Gegensatz zu Wirbelsäulenverletzungen [Johannsen 10]. Diese Erkenntnis ist für die Definition zukünftiger Rettungsstrategien wichtig.

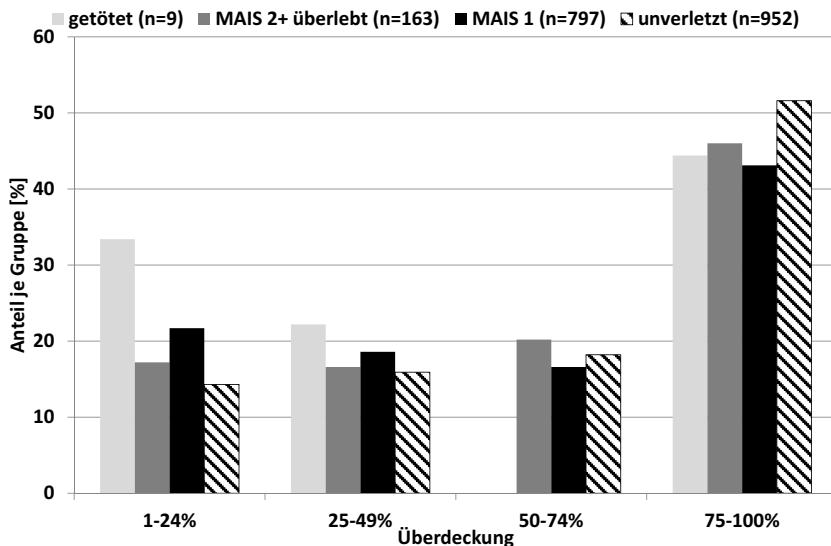


Abb. 3.45 Prozentualer Überdeckungsgrad bei Pkw mit Modelljahr 2000 oder später in Frontalaufprallen der Jahre 2000 bis 2011 [Otte 13]

Entgegen allgemeiner Vorurteile sind SUV im deutschen Unfallgeschehen nicht auffällig. Sie unterscheiden sich kaum in Bezug auf Unfallhäufigkeit und vorhergehendem Fehlverhalten von durchschnittlichen Pkw-Fahrern. Wenn es jedoch zu einem schweren Unfall mit Pkw kommt, zeigt sich ein vergleichsweise höheres Verletzungsrisiko im Standard-Pkw. Dieses wird im Wesentlichen auf unterschiedliche Massen und geometrische Inkompatibilität zurückgeführt [Malczyk 11]. Es muss jedoch auch berücksichtigt werden, dass aufgrund des starken Zuwachses der Neuzulassungen von SUV, das Durchschnittsalter dieser deutlich jünger ist, als bei Standard-Pkw. Der Einfluss des Fahrzeugalters unter anderem wurde von Richards et al. [Richards 10] untersucht. Hierbei stellte sich heraus, dass Insassen in einem neueren Pkw von einem älteren Unfallpartner profitieren, während das Verletzungsrisiko bei etwa gleichalten Pkw nicht vom Absolutalter der Fahrzeuge abhängen scheint.

Im Bereich der Kindersicherheit konnte für den Frontalaufprall und Überschlag nachgewiesen werden, dass die meisten schweren und tödlichen auf fehlerhafte Nutzung oder die Nichtbenutzung von Kindersitzen zurückgeführt werden kann [Lesire 11].

4.1 Kinematische Grundlagen

Die Bewegung eines Fahrzeuges in der Einlauf- und Auslaufphase kann annähernd als ebene Bewegung einer starren Scheibe mit drei Freiheitsgraden angesehen werden. Die Position wird durch die Angabe der Koordinaten zweier verschiedener körperfester Punkte oder durch die Angabe der Koordinaten eines körperfesten Punktes und eine Winkelangabe eindeutig festgelegt. Die Bewegung der starren Scheibe besteht aus seinen zeitlich nacheinanderfolgenden Positionen, siehe Abb. 4.1.

Bei der ebenen Bewegung einer starren Scheibe kann jede endliche oder differenziell kleine Positionsänderung nach Euler durch eine Drehung um eine feste Achse erreicht werden, welche senkrecht zur Bewegungsebene steht, siehe Abb. 4.2 [Szabo 66]. Der Schnittpunkt der Drehachse mit der Bewegungsebene wird bei endlichen Lageänderungen gemeinsamer Drehpol M_D genannt.

Um die ebene Bewegung einer starren Scheibe zu beschreiben, genügt es, die Bewegung zweier beliebiger, aber verschiedener Punkte A und B bzw. der Strecke AB zu kennen. Der Drehpol M_D muss sich auf der Mittelsenkrechten von A_1A_2 befinden, weil A_2 durch eine Drehung aus A_1 hervorgehen soll. Ebenso muss sich aber M_D auch auf der Mittelsenkrechten von B_1B_2 befinden, so dass der gemeinsame Drehpol M_D sich im Schnitt der Mittelsenkrechten von A_1A_2 und B_1B_2 befindet. Der Satz von Euler bedeutet auch, dass der Drehwinkel für alle Punkte der starren Scheibe gleich ist: $\varphi_A = \varphi_B = \varphi$.

Der gemeinsame Drehpol M_D als Schnittpunkt der Mittelsenkrechten von A_1A_2 und B_1B_2 wird bei infinitesimalen Lageänderungen der Schnittpunkt der Normalen der Bahnkurven von A und B . Dieser Punkt wird Momentanpol M genannt, siehe Abb. 4.3.

Für die Unfallrekonstruktion bedeutet dies z. B.: liegen in einem Zeitpunkt t_i die Reifenspuren von mindestens zwei Rädern A und B vor, so kann der Momentanpol M_i als Schnittpunkt der Normalen an diese Reifenspuren in den Punkten A_i und B_i bestimmt werden. Alle Punkte des starren Körpers drehen sich zu diesem Zeitpunkt mit derselben Winkelgeschwindigkeit ω_i um den Momentanpol M_i .

Abb. 4.1 Bewegung eines Fahrzeugs als starre Scheibe, Bahnkurve des Schwerpunktes

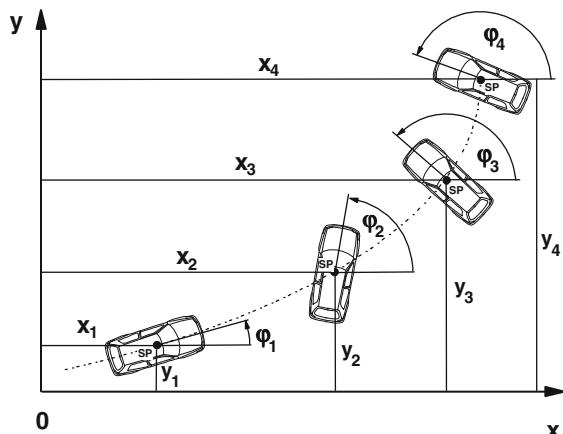
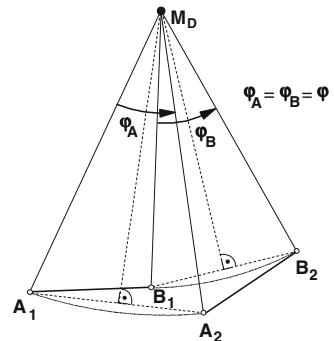


Abb. 4.2 Konstruktion des gemeinsamen Drehpols M_D für endliche Lageänderungen einer Scheibe [Szabo 66]



Die Geschwindigkeit v_{P_i} eines Punktes P_i zum Zeitpunkt t_i steht senkrecht auf der Strecke $M_i P_i$ und es gilt:

$$v_{P_i} = \omega_i \cdot \overline{M_i P_i} .$$

Insbesondere gilt für den Schwerpunkt S_i (S zur Zeit i):

$$v_{S_i} = \omega_i \cdot \overline{M_i S_i} .$$

Die Bahn der zeitlich aufeinanderfolgenden Momentanpole auf der festen Ebene (Straße) wird Rastpolbahn genannt. Auf der mit dem starren Körper verbundenen Ebene (Fahrzeug) zeichnen die zeitlich nacheinanderfolgenden Momentanpole die Gangpolbahn auf. Diese beiden Kurven berühren sich definitionsgemäß zum Zeitpunkt t_i in M_i , ohne sich gegeneinander zu verschieben, d. h. die Gangpolbahn rollt auf der Rastpolbahn ab, und die Berührpunkte entsprechen den Momentanpolen M_{i+1}, M_{i+2}, \dots . Jede ebene Bewegung kann somit auf das Abrollen einer beweglichen Kurve, der Gangpolbahn, auf einer festen Kurve, der Rastpolbahn, zurückgeführt werden [Szabo 66].

Der Momentanpol der Scheibe darf nicht mit dem Krümmungsmittelpunkt eines einzelnen Scheibenpunktes, z. B. der Reifenspur verwechselt werden. Der Krümmungsmittel-

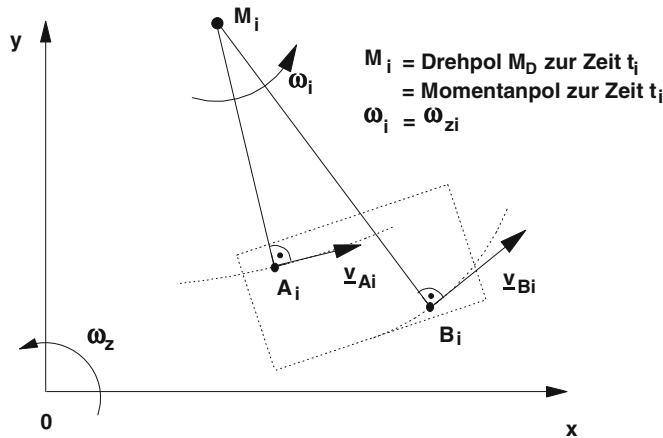


Abb. 4.3 Bestimmung des Momentanpols M_i zum Zeitpunkt t_i

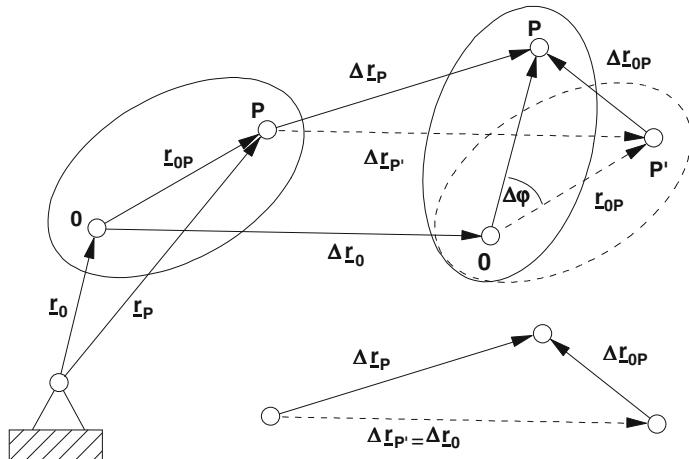


Abb. 4.4 Allgemeine Bewegung eines starren Körpers: Translation und Rotation

punkt ergibt sich als Schnittpunkt zweier benachbarter Normalen an die Bahnkurve eines Punktes. Bei stationärer Kreisfahrt fallen alle Krümmungsmittelpunkte mit dem Momentanpol zusammen.

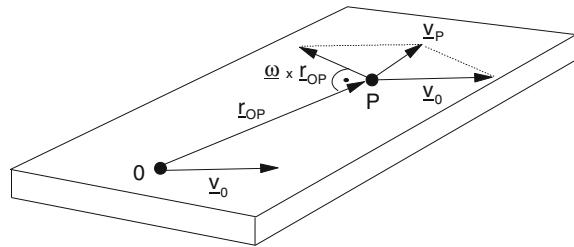
Die allgemeine Bewegung einer starren Scheibe kann auf die Translation eines Punktes (z. B. Schwerpunkt) und die Drehbewegung des Körpers um diesen Punkt zurückgeführt werden. In Abb. 4.4 ist diese Überlegung mit endlichen Verschiebungen dargestellt.

Es gilt:

$$\underline{r}_P = \underline{r}_O + \underline{r}_{OP}$$

$$\Delta \underline{r}_P = \Delta \underline{r}_O + \Delta \underline{r}_{OP} .$$

Abb. 4.5 Geschwindigkeitszustand der ebenen Bewegung einer Scheibe



Da wegen der Starrheit der Scheibe der Abstand der beiden Punkte O und P unveränderlich ist, kann die Änderung von r_{OP} nur als Drehung um eine durch O gehende Achse gedeutet werden.

Für infinitesimale Längenänderungen bedeutet das:

$$dr_P = dr_O + dr_{OP} = dr_O + d\varphi \times r_{OP} .$$

Das ist die berühmte Eulersche Formel, nach der jede unendlich kleine Verschiebung eines Punktes sich aus einer Verschiebung (dr_O) und einer Drehung ($d\varphi \times r_{OP}$) zusammensetzen lässt [Szabo 66]. Die Division durch die zugehörige infinitesimal kleine Zeitänderung (dt) führt zu den beschreibenden Eulerschen Formel:

$$v_P = v_O + \omega \times r_{OP} .$$

Besondere Bedeutung für die Dynamik und Stoßrechnung hat der Schwerpunkt als Bezugspunkt:

$$v_P = v_S + \omega \times r_{SP} .$$

Der Geschwindigkeitszustand einer starren Scheibe wird also vollständig durch den Geschwindigkeitsvektor eines beliebigen Bezugspunktes, den invarianten Winkelgeschwindigkeitsvektor sowie den Verbindungsvektor vom Bezugspunkt zum betrachteten Punkt beschrieben. Für die ebene Bewegung ist die Überlagerung in Abb. 4.5 dargestellt [Koob 86].

4.2 Crashkinematik, Crashpulse, Stoßziffer (Stoffgesetze)

4.2.1 Crashkinematik, Deformationskennungen

Für die Kraftrechnung werden die Deformationskennungen (allgemeiner: Stoffgesetze) der beteiligten Fahrzeuge benötigt. Diese können entweder experimentell im Crashversuch oder, über FEM-Simulationen, rechnerisch ermittelt werden. Mit zunehmender Bedeutung kann für anspruchsvolle Rekonstruktionen die rechnerische Struktur-Simulation auf verschiedenen Differenzierungsniveaus integraler Bestandteil der Unfallrekonstruktion sein.

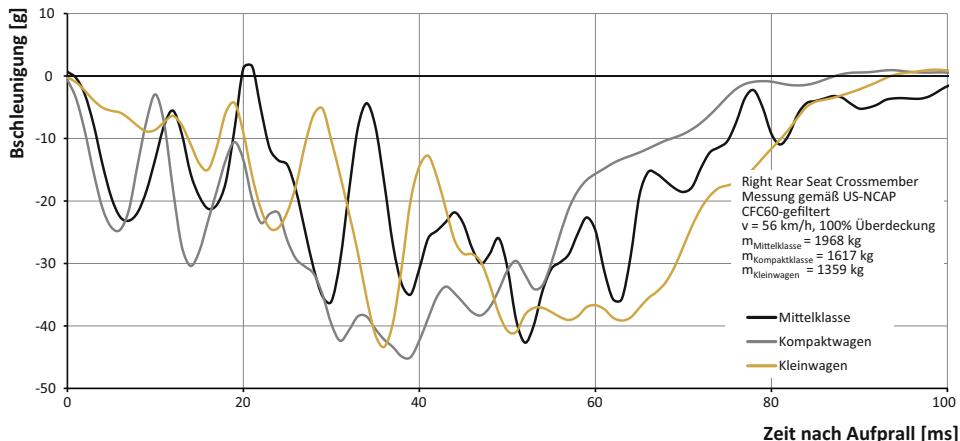


Abb. 4.6 Gemessene Beschleunigungs-Zeit-Verläufe unterschiedlich großer und schwerer Pkw [NHTSA 2012]

Bei Crashversuchen werden im einfachsten Fall die Stoßkräfte aus den an der Fahrgastzelle gemessenen Beschleunigungs-Zeit-Verläufen unter der Annahme einer konstanten, starren Fahrzeugmasse, also eines einfachen Feder-Masse-Ersatzsystems, ermittelt. In Abb. 4.6 sind die gemessenen Beschleunigungsverläufe unterschiedlich großer und schwerer Fahrzeuge beim Aufprall gemäß US-NCAP gezeigt. Näherungsweise lassen sich die Verläufe durch ein Trapez wiedergeben, siehe Abb. 4.7. Unter Vorgabe der Anfangsbedingungen ($x=0$ und $\dot{x}=v_0$) kann durch Integration Geschwindigkeit und (Deformations-) Weg in Abhängigkeit von der Zeit erhalten werden. Die kinematischen Beziehungen zwischen Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg lauten allgemein:

$$x = \int_{(t)} \dot{x} dt + x_0 \quad \dot{x} = \frac{dx}{dt}$$

$$\dot{x} = \int_{(t)} \ddot{x} dt + \dot{x}_0 \quad \ddot{x} = \frac{d\dot{x}}{dt} .$$

In [Appel 98] werden die o. g. Integral- und Differenzialbeziehungen zusammen mit der Insassenbewegung als Flächen bzw. Steigungen dargestellt und daraus Schlussfolgerungen für Sicherheitsauslegungen gezogen. Es ist in der Abb. 4.7 Folgendes zu erkennen:

- die (zeitbezogen) mittleren Verzögerungen des harten Fahrzeugs sind mit ca. 27 g gegenüber 18 g deutlich höher als die des weichen Fahrzeugs;
- infolgedessen ist die Crashdauer mit ca. 60 ms gegenüber 90 ms deutlich kleiner;

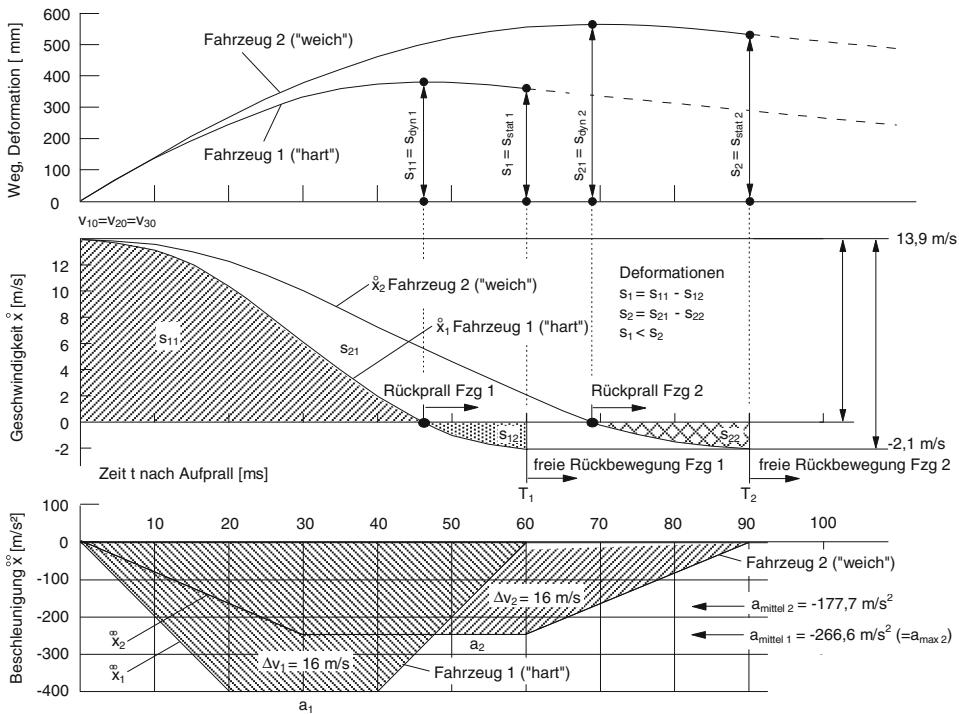


Abb. 4.7 Idealisierte Beschleunigungs-Zeit-Verläufe eines harten und eines weichen Pkw beim 50 km/h-Wandaufprall. Durch Integration gewonnene Verläufe von Geschwindigkeit und Weg (Restitutionskoeffizient $k = 0,15$)

- die mittleren Kräfte sind beim harten Fahrzeug mit ca. 331.830 N höher als beim weichen Fahrzeug mit 286.560 N. Das ist der höheren Verzögerung bzw. dem kürzeren Deformationsweg geschuldet;
- es ergibt sich mit dem gemessenen Beschleunigungsverlauf und der gemessenen Anfangsgeschwindigkeit ein deutlicher Rückprall, der Restitutionskoeffizient (Stoßziffer) k (siehe Abschn. 4.4.2 und 4.4.7) errechnet sich zu 0,15. Wegen der Teilelastizität der Fahrzeugstruktur beträgt also die Geschwindigkeitsänderung Δv beim Barrierenaufprall etwa das 1,15-fache der Aufprallgeschwindigkeit (hier 58 km/h gegenüber 50 km/h). Ein Wert von $k = 0,10$ bis $0,20$ ist unter diesen Crashbedingungen realistisch. Bei höheren Aufprallgeschwindigkeiten, bei Offset-Kollisionen und beim Pfahlaufprall wird der Stoß plastischer, d. h. k geht gegen Null;
- der elastische Anteil beim Rückprall ergibt für die Deformationen den Unterschied zwischen dynamischer (maximaler) und statischer (bleibender) Verformung;
- EES (hier 49,4 km/h) bezieht sich nicht auf die dynamische, sondern auf die bleibende (statische) Verformung und ist infolgedessen kleiner als Δv und auch v_0 .

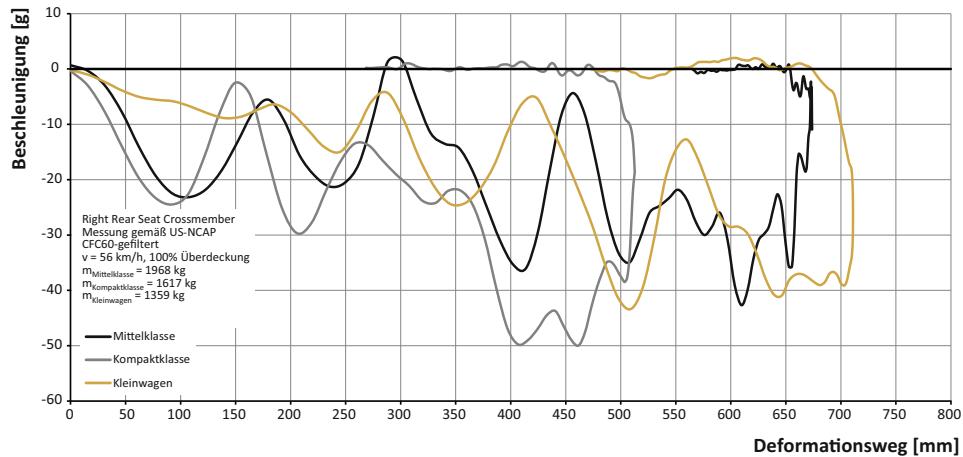


Abb. 4.8 Beschleunigungs-Weg-Verläufe unterschiedlich großer und schwerer Pkw, gewonnen aus den zugehörigen gemessenen Beschleunigungs-Zeit-Verläufen in Abb. 4.7 [NHTSA 2012]

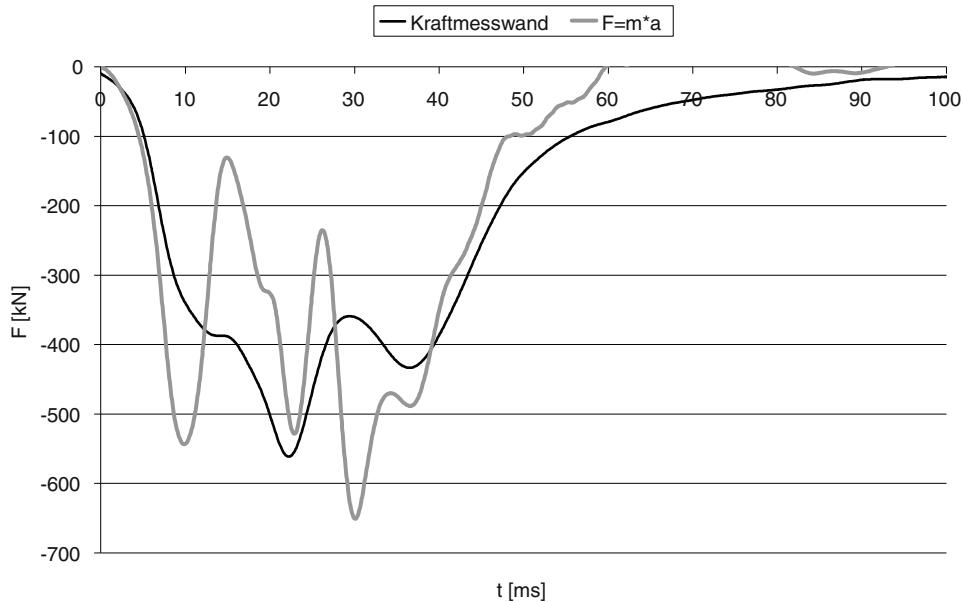


Abb. 4.9 Vergleich des Kraftzeitverlaufs gemäß Kraftmesswandsummenkraft und aus der Fahrzeugbeschleunigung ermittelten Gesamtkraft

Unter Elimination der Zeit kann der Zusammenhang $\ddot{x}(x)$ zwischen Beschleunigung und Weg erhalten werden. In Abb. 4.8 sind diese Verläufe für die drei Fahrzeuge aus Abb. 4.7 dargestellt. Durch Multiplikation der Beschleunigung mit der als konstant ange-

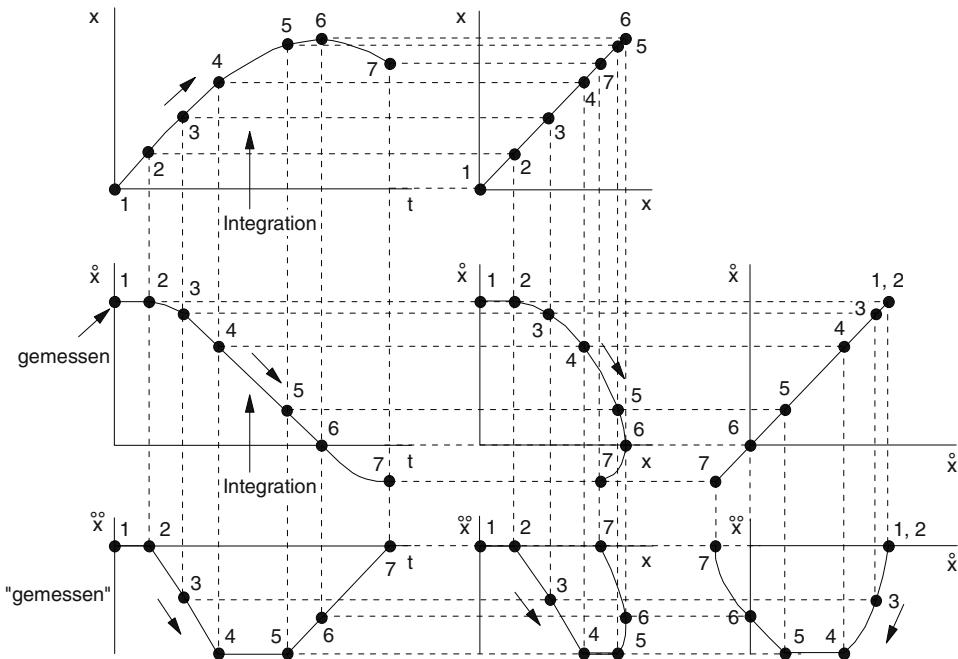


Abb. 4.10 Idealisierter Wandaufprall eines Fahrzeugs. Die sechs kinematischen Diagramme zur Übertragung des gemessenen zeitabhängigen Beschleunigungsverlaufes auf alle anderen x -, \dot{x} -, \ddot{x} -, t -Kombinationen

nommenen Crashmasse würden sich die Stoßkräfte (Strukturkräfte, Deformationskräfte)

$$F(t) = m_{\text{Crash}} \cdot \ddot{x}(t) \quad \text{bzw.} \quad F(x) = m_{\text{Crash}} \cdot \ddot{x}(x) \quad \text{mit} \quad m_{\text{Crash}} = \text{konst.}$$

ergeben. Wie z. B. Abb. 3.12 zu entnehmen ist, wirkt die Kraft auf das Fahrzeug in negativer x -Richtung, womit die Beschleunigung negativ, d. h. die Verzögerung positiv ist.

Tatsächlich kann die Masse bei einem Fahrzeugunfall nicht als konstant angenommen werden, da sich die bewegte Masse um die Masse der Komponenten, die bereits zum Stillstand gekommen sind, reduziert, siehe Abb. 4.9.

Der Integrationsprozess über der Zeit und der nachfolgende Eliminationsprozess der Variablen t und x ist in Abb. 4.10 anhand eines idealisierten Verlaufes grafisch gezeigt. So können mit den sog. „sechs kinematischen Diagrammen“ alle möglichen Kombinationen von x , \dot{x} , \ddot{x} und t ermittelt werden. Für überschlägige, anschauliche Betrachtungen mag diese Vorgehensweise nicht nur theoretisch, sondern auch praktisch nützlich sein, auch wenn heute Rechner diese Prozesse schnell erledigen.

Eine zweite und wirklichkeitsnähere Möglichkeit, beim Aufprall auf die OUB die Crashkräfte und damit die Kraft-Deformations-Kennungen zu ermitteln, geht unter Beibehaltung des einfachen Feder-Masse-Systems von der Überlegung aus, dass die effektive Masse

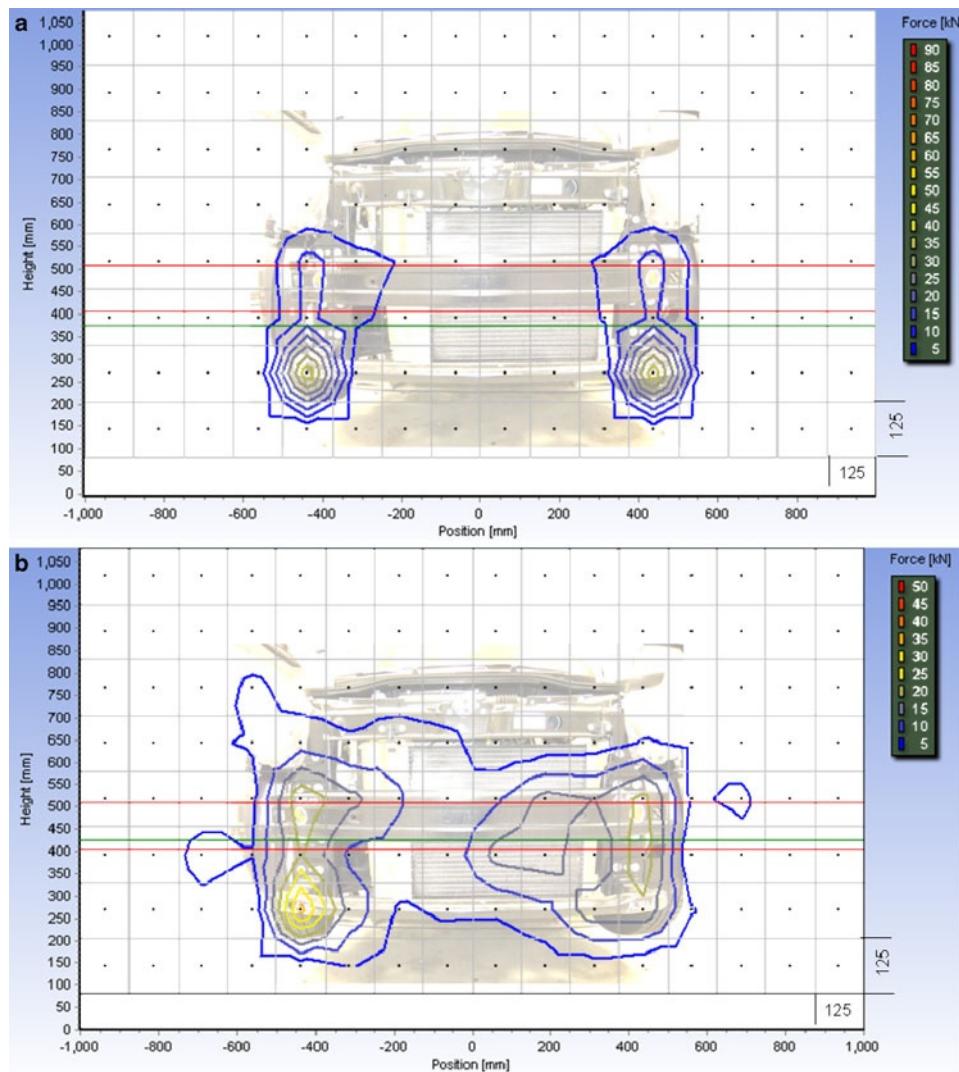


Abb. 4.11 Lastverteilung zu relevanten Zeitpunkten gemessen an einer Kraftmesswand in OUB Test (a) und 100 % Überdeckung ODB Test (b) Quelle Hintergrundbild [BASt 12]

nicht konstant sein kann, sondern mit fortschreitender Deformation bzw. Zeit nach Crashbeginn variabel sein muss.

$$F(t) = m_{\text{eff}}(t) \cdot \ddot{x}(t) \quad \text{bzw.} \quad F(x) = m_{\text{eff}}(x) \cdot \ddot{x}(x)$$

Zu Beginn des Crashes ist sie Null, da ein elastischer Kraftaufbau erfolgt, am Ende des Crashes ist nur noch die Fahrzeugmasse wirksam, die nicht bereits (wie z. B. der Frontmo-

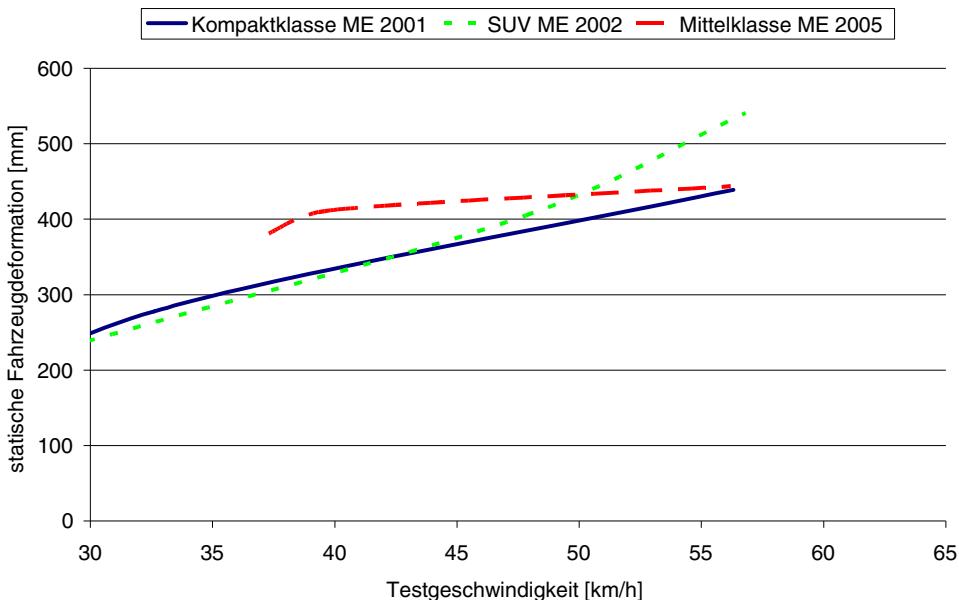


Abb. 4.12 Zusammenhang zwischen Fahrzeugdeformation und Aufprallgeschwindigkeit verschiedener Pkw beim Frontalaufprall gegen eine OUB [NHTSA 2012]

tor) an der Barriere anliegt. Bei mittleren Deformationswegen muss die effektive Masse daher ein Maximum haben. In der Praxis macht es Schwierigkeiten, den Verlauf der effektiven Masse sicher vorherzubestimmen, weshalb diese Möglichkeit der Ermittlung der Kraft-Deformationskennungen i. Allg. nicht angewendet wird.

Die dritte Möglichkeit, die zeit- oder wegabhängigen Deformationskennungen einer Fahrzeugfront zu erhalten, ist die Benutzung einer Kraftmesswand, die direkt vor oder hinter der OUB angebracht wird. Beim Aufprall werden die auf die Messwand wirkenden Kräfte mit piezoelektrischen oder piezoresistiven Aufnehmern gemessen. Eine Aufteilung in Segmente erlaubt die differenzierte Bestimmung der Teilkräfte nach Baugruppen des Vorderwagens (siehe Abb. 4.11a). Messtechnisch ist das Verfahren der Kraftmessungen allerdings sehr aufwendig. Während die Kraftmessung bei der OUB ausschließlich Strukturen anzeigt, die direkten Kontakt zur Kraftmesswand haben, werden durch die Verwendung eines Deformationselementes auch etwas weiter zurück liegende Strukturen sichtbar gemacht (siehe Abb. 4.11b).

Die vierte Möglichkeit zur (bauteilspezifischen) Bestimmung der Crashkräfte ist heute durch die Anwendung von FEM-Rechnung auf schnellen Rechnern gegeben. Doch bleibt diese rechnerische Ermittlung bisher Aufgaben im Rahmen der Fahrzeugentwicklung vorbehalten.

Abbildung 4.12 zeigt die statische, bleibende Fahrzeugdeformation in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit gegen eine OUB mit voller Überdeckung der Fahrzeugfront.

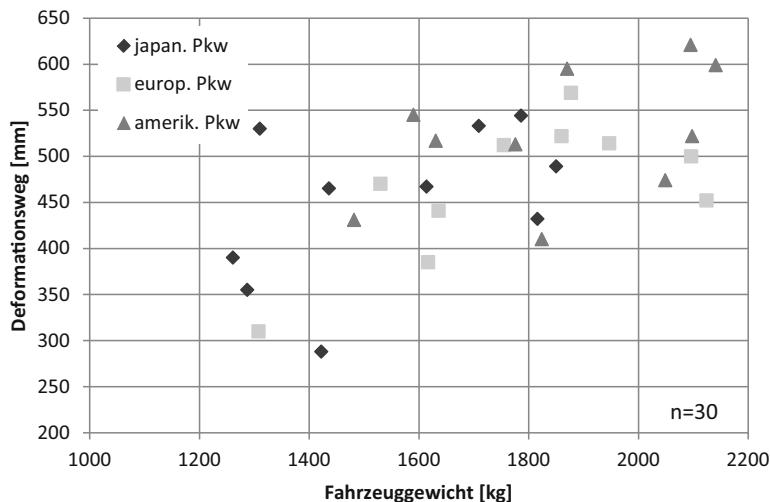


Abb. 4.13 Zusammenhang zwischen Deformationslänge und Fahrzeuggewicht beim Frontalaufprall nach US-NCAP [NHTSA 2012]

Es ergibt sich der erwartete Anstieg der statischen Deformation mit der Aufprallgeschwindigkeit. In Abb. 4.13 sind die bleibenden Deformationen beim Wandaufprall mit 56 km/h für verschiedene Fahrzeuge dargestellt. Die meisten heutigen Fahrzeuge haben trotz sehr unterschiedlicher Massen und Längen nur geringe Unterschiede in den Deformationswegen (400 bis 600 mm). Das Deformationsverhalten verändert sich bei einer Kollision mit einem anderen Fahrzeug oder gegen eine deformierbare Barriere.

4.2.2 Stoßziffer

Der Stoß ist gekennzeichnet durch sehr große Kräfte, die innerhalb sehr kleiner Zeiten wirken. Das zeitliche Integral der Stoßkraft bleibt endlich, es wird Stoßantrieb P genannt, siehe Abb. 4.14.

In der Stoßrechnung hat sich die Einführung der Stoßziffer k (Restitutionskoeffizient) bewährt. Sie ist als Verhältnis der Stoßantriebe in der Restitions- und Kompressionsphase definiert:

$$k = \frac{\int_{t_u}^{t'} F dt}{\int_t^{t'} F dt} = \frac{P_{\text{Restitution}}}{P_{\text{Kompression}}} \quad \begin{aligned} k &= 1 && \text{Stoß vollkommen elastisch} \\ 1 \geq k \geq 0 & && \text{Stoß unelastisch, teilplastisch} \\ k &= 0 && \text{Stoß vollkommen unelastisch, plastisch.} \end{aligned}$$

Abb. 4.14 Verlauf der Stoßkraft über der Stoßdauer bei elastischem (a) und elastisch-plastischem (b) Strukturverhalten der stoßenden Massen bzw. Fahrzeuge (t_u Zeitpunkt der maximalen Stoßkraft, d. h. des maximalen Impulsaustausches)

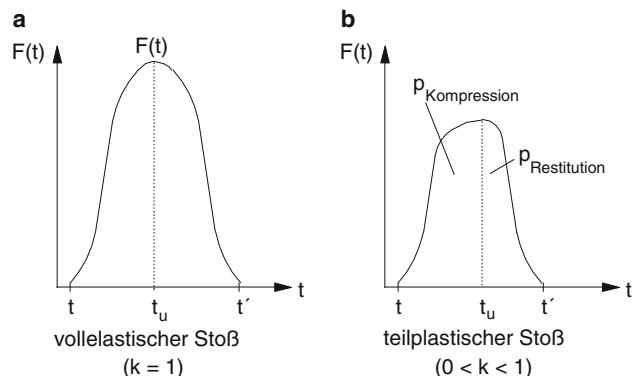
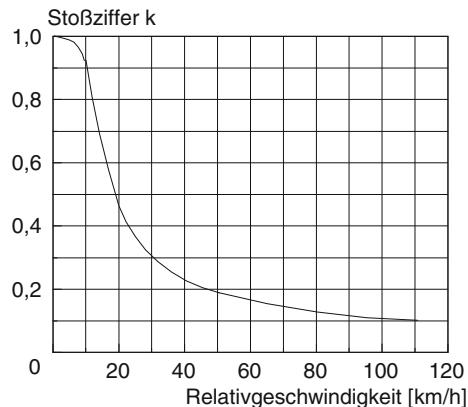


Abb. 4.15 Qualitativer Zusammenhang zwischen der Stoßziffer k und der Stoßgeschwindigkeit beim Frontalaufprall von Pkw gegen die OUB



Die Stoßziffer beschreibt pauschal mit einer Zahl die Materialeigenschaften, das Stoffgesetz der Kollisionskontrahenten. Sie ist darüber hinaus von deren konstruktiver Gestaltung sowie von der Art des Stoßes (Richtung, Geschwindigkeit) abhängig. Beim zentralen Stoß zweier Kugeln ergeben sich z. B. folgende, allein materialabhängige Stoßziffern:

- Holz – Holz, $k = 0,5$
- Stahl – Stahl, $k = 0,8$
- Glas – Glas, $k = 0,94$.

Beim Frontalaufprall von Pkw auf die ebene undeformierbare Wand (OUN) ist die Stoßziffer stark abhängig von der Aufprallgeschwindigkeit, siehe Abb. 4.15. Entsprechend dem unterschiedlichen Deformationsverhalten des Vorderwagens ist der Stoß nahezu elastisch bei kleinen und nahezu plastisch bei hohen Aufprallgeschwindigkeiten. Bei der (rechnergestützten Vorwärts-)Rekonstruktion von Pkw-Kollisionen mittels Stoßrechnung wird die Stoßziffer zunehmend als Eingangs- oder Kontrollgröße herangezogen.

4.3 Kraftrechnung

Bei der technischen Unfallrekonstruktion kommt es darauf an, den Unfallablauf, d. h. die Bewegungen der Unfallkontrahenten räumlich und zeitlich zu ermitteln. Dazu bieten sich zunächst die Methoden und Grundgesetze der klassischen Mechanik an, z. B. in Form des Schwerpunktsatzes und des Drallsatzes. Notwendig ist die Kenntnis und die Einführung der Stoffgesetze, die z. B. als Kraft-Weg-Kennungen vorliegen können. Bei der sogenannten synthetischen Methode (Gegensatz: analytische Methode) ist zwischen äußeren und inneren sowie eingeprägten und Reaktionskräften zu unterscheiden [Szabo 66, 72; Gummert 86], siehe Abb. 4.16. Unter Elimination der Schnittkräfte liefern Schwerpunkt- und Drallsatz, angesetzt für jeden einzelnen Körper, die Bewegungsgleichungen, deren Integration zusammen mit den Anfangsbedingungen zu Geschwindigkeiten und Wegen führt. In Abgrenzung zur später behandelten „Stoßrechnung“ anhand von „Stoßgleichungen“ soll diese Methode „Kraftrechnung“ anhand von „Kraftgleichungen“ genannt werden.

Innere Kräfte werden nach dem Schnittprinzip freigelegt, sie wirken zwischen den einzelnen Teilen des Systems und treten nur paarweise auf; alle anderen Kräfte sind äußere Kräfte. Solche Kräfte, die nur durch Einschränkungen in der Bewegungsfreiheit des Systems verursacht werden, sind Reaktionskräfte, alle anderen sind eingeprägte Kräfte. Letztere sind von physikalischen Konstanten abhängig, z. B. der Erdbeschleunigung g oder dem Gleitreibungsbewert μ .

In Abb. 4.17 werden am Beispiel von zwei verbundenen Scheiben die unterschiedlichen Kräfte dargestellt. Es bedeuten:

- $F_{(a)e}$ Äußere eingeprägte Kraft:
z. B. Gewichtskraft, Federkraft bei äußerer Federung, Gleitreibungskraft.
- $F_{(a)R}$ Äußere Reaktionskraft (wirkt zwischen System und Umgebung):
z. B. Führungskraft, Zwangskraft, Haftkraft.

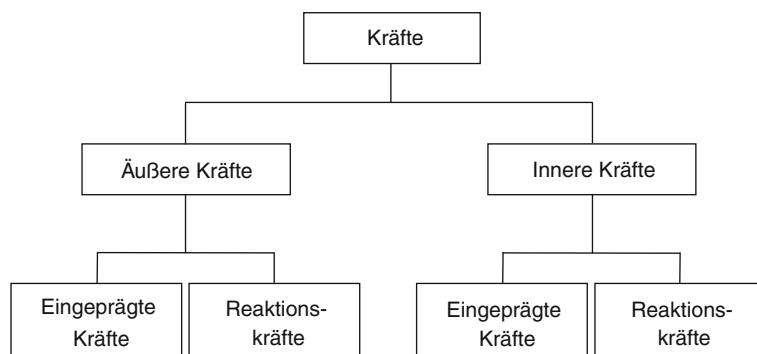
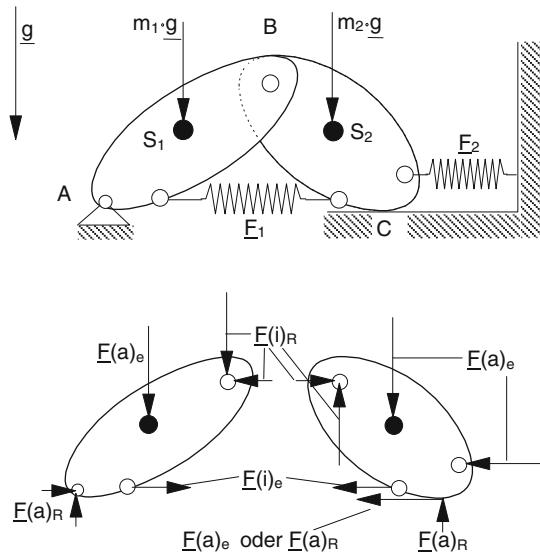


Abb. 4.16 Einteilung von Kräften

Abb. 4.17 Beispiele zum Schnittprinzip



- $\underline{F}_{(i)e}$ Innere eingeprägte Kraft (wirkt zwischen verschiebbaren Punkten):
z. B. Federkraft bei innerer Federung, magnetische Kraft.
- $\underline{F}_{(i)R}$ Innere Reaktionskraft (wirkt zwischen unverschiebbaren Punkten):
z. B. Zwangskraft, Haftkraft, Gelenkkraft.

Beim Aufstellen der Kraftgleichungen sind die unbekannten Verschiebungen (und damit auch Geschwindigkeiten und Beschleunigungen) ebenso wie die unbekannten Reaktionskräfte in ihrer Wirkrichtung in beliebiger Richtung im Ersatzmodell einzutragen. Bei „falsch“ gewählte Richtung ergibt die Rechnung ein negatives Vorzeichen. Anfangsgrößen (z. B. v_0) oder eingeprägte Kräfte (z. B. Reibungskräfte) müssen unbedingt so in ihrer Richtung eingetragen werden, wie sie im angenommenen Koordinaten- bzw. Ersatzsystem real wirken. Es sei hier bereits darauf hingewiesen, dass das Gleiche für die Stoßrechnung gilt. Stoßantriebe sind innere oder äußere Reaktionen, können daher in ihrer Richtung zunächst beliebig angenommen werden, siehe auch Abschn. 4.7.4. Allerdings ist die Reibungskomponente eines Stoßantriebes eine eingeprägte Kraftgröße, ist also entgegengesetzt zur zunächst unbekannten Tangential-Relativgeschwindigkeit in das Ersatzsystem einzutragen.

4.3.1 Schwerpunktsatz

Bei Betrachtung eines beliebigen Massenelements der Masse dm eines starren Körpers ergibt sich das Newtonschen Grundgesetz:

$$\int dm \frac{d^2}{dt^2} \underline{r}(t) = \int d\underline{F}.$$

Wird die Masse als zeitlich konstant angesehen, so gilt für die linke Seite der Gleichung:

$$\int dm \frac{d^2}{dt^2} \underline{r}(t) = \frac{d^2}{dt^2} \int \underline{r}(t) dm.$$

Für die rechte Seite gilt, da die inneren Kräfte sich aufheben:

$$\int d\underline{F} = \underline{F}_{(a)} \quad (\text{Resultierende der äußeren Kräfte}).$$

Mit Einführung des Gesamtmpulses

$$\underline{I} = \int \underline{v} dm$$

lässt sich die Gleichung in folgender, als Impulssatz bezeichneter Form schreiben:

$$\frac{d}{dt} \int \underline{v} dm = \frac{d}{dt} \underline{I} = \underline{F}_{(a)}.$$

Ist \underline{r}_S der Vektor des Schwerpunktes, so gilt definitionsgemäß:

$$\frac{d^2}{dt^2} \int \underline{r}(t) dm = \frac{d}{dt} \int \underline{v}(t) dm = \frac{d^2}{dt^2} (\underline{r}_S \cdot m).$$

Daraus folgt das Newtonsche Grundgesetz in der Form des Schwerpunktsatzes:

$$\frac{d^2}{dt^2} (\underline{r}_S \cdot m) = \frac{d}{dt} (m \cdot \underline{v}_S) = m \cdot \underline{a}_S = \underline{F}_{(a)}.$$

Der Schwerpunkt eines Körpers bewegt sich so, als ob alle äußeren Kräfte (eingeprägte und Reaktionskräfte) in diesem Punkt angreifen würden. Die Schwerpunktbewegung eines Körpers kann deshalb auch durch die Bewegung seines Schwerpunktes als „Punktmasse“ beschrieben werden.

4.3.2 Drallsatz

Bei vektorieller Multiplikation des Schwerpunktsatzes für ein Massenelement mit dem Ortsvektor der Massenelemente bzw. der äußeren Kräfte $\underline{r} = \underline{r}(t)$, ergibt sich nach Integration über den gesamten Körper

$$\frac{d}{dt} \int \underline{r} \times dm \cdot \underline{v} = \int \underline{r} \times d\underline{F}.$$

Mit den Einführungen

$$\begin{aligned} \int \underline{r} \times dm \cdot \underline{v} &= \underline{D} && \text{Drall oder Drehimpulsvektor des Körpers} \\ \int \underline{r} \times d\underline{F} &= \underline{M}_{(a)} && \text{resultierender Momentenvektor der äußeren Kräfte.} \end{aligned}$$

Ergibt sich der Drallsatz bzw. Momentensatz in der Form:

$$\frac{d\underline{D}}{dt} = \underline{M}_{(a)}.$$

Das Moment aller am Körper angreifenden äußeren Kräfte ist gleich der zeitlichen Änderung des Drehimpuls- oder Drallvektors. Der Drehimpulsvektor ist gleich dem Produkt aus Trägheitstensor mal Winkelgeschwindigkeitsvektor. Der Drallsatz in der obigen Form gilt sowohl für einen raumfesten Bezugspunkt als auch für den beliebig bewegten Schwerpunkt als Bezugspunkt. Der Drehimpuls des starren Körpers für einen Bezugspunkt ohne translatorische Geschwindigkeit (raumfester Drehpunkt) lautet:

$$\underline{v} = \underline{\omega} \times \underline{r}$$

$$\underline{D}_0 = \int \underline{r} \times (\underline{\omega} \times \underline{r}) dm = \underline{\underline{\Theta}}_0 \cdot \underline{\omega}.$$

$\underline{\underline{\Theta}}_0$ ist der Massenträgheitstensor bezüglich dem Punkt 0.

Wird der beliebig bewegte Schwerpunkt als Bezugspunkt gewählt, so behält der Drallsatz seine einfache Form:

$$\underline{M}_{S(a)} = \frac{d\underline{D}_S}{dt}; \quad \underline{D}_S = \underline{\underline{\Theta}}_S \cdot \underline{\omega}.$$

Allgemein berechnet sich das Produkt einer 3×3 -Matrix mit einem Vektor wie folgt [Dubbel 97]:

$$\underline{\underline{A}} \cdot \underline{b} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} \cdot b_1 + a_{12} \cdot b_2 + a_{13} \cdot b_3 \\ a_{21} \cdot b_1 + a_{22} \cdot b_2 + a_{23} \cdot b_3 \\ a_{31} \cdot b_1 + a_{32} \cdot b_2 + a_{33} \cdot b_3 \end{bmatrix}.$$

Für den Drehimpuls einer ebenen Scheibe gilt somit, bezogen auf einen festen Drehpunkt O:

$$\underline{D}_0 = \underline{\underline{\Theta}}_0 \cdot \underline{\omega}_z \text{ mit } \omega_x = \omega_y = 0 \text{ und } \Theta_{xz} = \Theta_{zx} = 0, \Theta_{yz} = \Theta_{zy} = 0.$$

Ausgeschrieben:

$$\underline{D}_0 = \begin{vmatrix} \Theta_{xx} & \Theta_{xy} & 0 \\ \Theta_{xy} & \Theta_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \Theta_{zz} \end{vmatrix}_0 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \Theta_{zz0} \cdot \omega_z \end{pmatrix}$$

$\Theta_{zz0} = \int r^2 dm$ ist das Massenträgheitsmoment, bezogen auf den Punkt 0.

Die Kraftgleichungen für die ebene Scheibe bei einem festen Drehpunkt 0 oder beliebig bewegten Schwerpunkt S lauten:

$$m \cdot \ddot{x}_S = \sum_i F_{xi} \quad m \cdot \ddot{y}_S = \sum_i F_{yi} \quad \Theta_{Szz} \cdot \ddot{\varphi} = \sum_i M_{S,zi}.$$

Für die ebene Betrachtung wird vereinfachend gesetzt: $\Theta_{Szz} = \Theta_S$.

4.4 Stoßrechnung

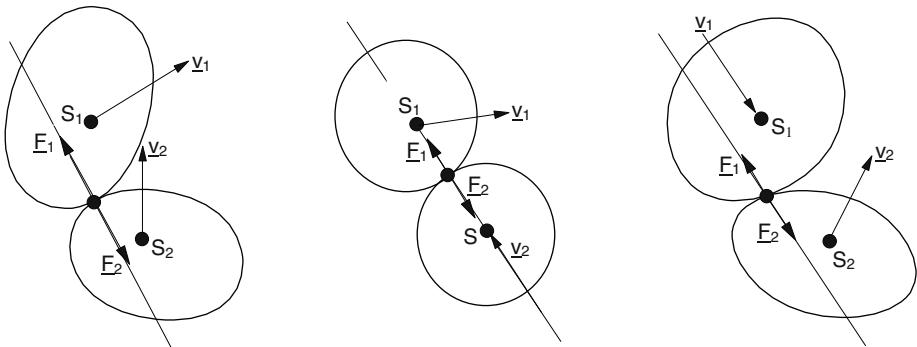
Während die Kraftrechnung von den Kraftgleichungen als Differenzialgleichungen 2. Ordnung ausgeht, bezieht sich die Stoßrechnung auf die erste Zeitintegration der Kraftgleichungen. Dadurch wird zwar die mühsame Berücksichtigung des Stoffgesetzes mit den kontinuierlich wirkenden Kräften umgangen und durch den pauschalen, einfach zu handhabenden Stoßantrieb ersetzt. Aber der Informationsverlust muss durch Annahmen und Hypothesen, die richtig sein können, aber nicht richtig sein müssen, ausgeglichen werden.

Gegenübergestellt unterscheiden sich Kraft- und Stoßrechnung wie folgt:

- Kraftrechnung:
Kraftgleichungen (Schwerpunktsatz, Drallsatz), Stoffgesetze, Kraft-Weg-Kennungen, Bewegungsgleichungen kontinuierlicher Vorgang;
- Stoßrechnung:
Stoßgleichungen (Impulssatz, Drehimpulssatz), Annahmen, Hypothesen, Geschwindigkeitsgrößen vor und nach dem Stoß, diskontinuierlicher Vorgang.

4.4.1 Stoßarten

Die für die Stoßrechnung benötigten Stoßarten werden unterteilt in zentrisch und exzentrisch, gerade und schief, siehe Abb. 4.18. Die Angabe der Stoßart bezieht sich auf einzelne Körper, nicht auf Konfigurationen mehrerer Körper. Dabei bedeuten:



Körper 1: exzentrisch, schief
Körper 2: exzentrisch, schief

Körper 1: zentrisch, schief
Körper 2: zentrisch, gerade

Körper 1: exzentrisch, gerade
Körper 2: exzentrisch, schief

Abb. 4.18 Beispiele für verschiedene Stoßarten (Kraftvektor \underline{F} und Vektor des Stoßantriebes \underline{P} haben die gleiche Richtung)

- zentrisch, exzentrisch: Lage des Schwerpunktes zur Richtung des Stoßantriebes
- gerade, schief: Richtung des Geschwindigkeitsvektors des Schwerpunktes vor dem Stoß zur Richtung des Stoßantriebes.

4.4.2 Stoßtheorien

Historisch gesehen lassen sich zwei Stoßtheorien unterscheiden:

Stoßtheorie nach Hertz und Saint Venant

Das Ziel der Theorie des Stoßes elastischer Körper ist die Ermittlung des zeitlichen Ablaufes der Stoßkräfte und der Stoßdauer während des Stoßvorganges mit Hilfe der Hookeschen Deformationsgesetze. Dabei gilt die Annahme, dass die nach der „Theorie der Härte“ ermittelte statische Abplattung auch für den Stoßvorgang gilt, d. h. dass die Stoßzeit groß gegenüber der Stoßwellenzeit ist. Diese Theorie liefert teilweise widersprüchliche Ergebnisse [Szabo 72].

Stoßtheorie nach Galilei, Huygens und Newton

Das Ziel dieser Stoßtheorie ist nicht die Ermittlung der Stoßkraft und ihres zeitlichen Ablaufes, sondern der Geschwindigkeit am Ende des Stoßvorganges aus der Geschwindigkeit beim Stoßbeginn. Es werden die folgenden Annahmen zu Grunde gelegt:

- Die Stoßdauer ist sehr kurz, die Stoßkräfte sind sehr groß.
- Alle äußeren Kräfte sind gegenüber der Stoßkraft klein und deshalb vernachlässigbar.
- Das Zeitintegral der Stoßkraft $\int \underline{F} dt = \underline{P}$ bleibt endlich.
- Die kinematische Konfiguration bleibt während des Stoßes erhalten.

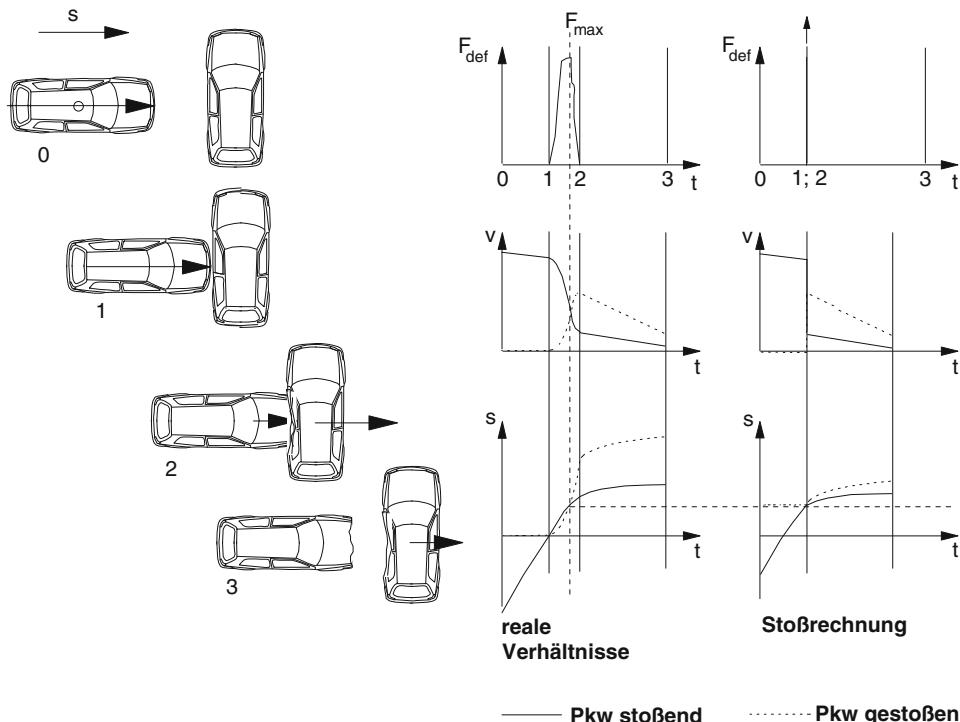


Abb. 4.19 Einschränkungen der Stoßrechnung im Vergleich zu einem realen Unfall (nach [Burg 81], überarbeitet)

- e) Die Änderungen der Geometrie der Körper (Scheiben) durch die Deformation während des Stoßes werden in der Rechnung nicht berücksichtigt.

Die zweite, die sog. klassische Stoßtheorie, hat sich durchgesetzt und bildet heute die Grundlage der Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion [Szabo 72; Gummert 86]. Bei der Stoßrechnung werden die Stoßkontrahenten als ein System mit inneren Kräften betrachtet. Für die Fahrzeug-Fahrzeugkollision liegt das auf der Hand. Beim Aufprall gegen ein festes Hindernis (Wand, Pfahl) kann die Stoßkraft auch als äußere Reaktionskraft behandelt werden. Äußere eingeprägte Kräfte infolge Reibung oder Erdbeschleunigung sind klein gegenüber den Stoßkräften; sie werden daher vernachlässigt. Der über die sehr kurze Stoßdauer auftretende Kraftvektor verursacht eine sprunghafte Veränderung der Impulse. Im Gegensatz zur Rechnung mit Bewegungsgleichungen (Kraftrechnung) entstehen bei der Rechnung mit den Stoßgleichungen während der sehr kleinen Stoßzeit Unstetigkeiten in den Kraft-, Geschwindigkeits- und den Weg-Zeit-Verläufen, siehe Abb. 4.19. Da für den Ansatz der Stoßgleichungen nur eine einzige momentane Stellung der Fahrzeuge ausgewählt werden kann, ist es wichtig, diese Stoßstellung sorgfältig und „richtig“ festzulegen. Prinzipiell ist der Zeitpunkt und die Stellung zu wählen, in dem bzw. in der die größten

Kräfte wirken, also der Hauptimpuls ausgetauscht wird. Keinesfalls ist dies der Zeitpunkt der ersten oder letzten Berührung.

4.4.3 Ergänzungshypothesen

Für die Anwendung der klassischen Stoßtheorie und ihre Erweiterung vom elastischen, geraden, zentrischen Stoß auf den nichtelastischen, schießen, exzentrischen Stoß sind zusätzliche Annahmen, Hypothesen notwendig. Andernfalls bleibt bei der Berechnung die Zahl der Gleichungen kleiner als die Zahl der Unbekannten. Die wichtigsten dieser sogenannten Ergänzungshypothesen sind

- Stoßzahlhypothese nach Newton [Szabo 72]

Es wird eine zahlenmäßige Annahme über die Stoßziffer k gemacht. Die Stoßziffer k (siehe Abschn. 4.4.7) beschreibt das elastisch-plastische Verhalten der Stoßkontrahenten beim verhakten Stoß in Richtung des Stoßantriebes bzw. beim Gleitstoß in Richtung der Stoßnormalen. Der Grenzfall des elastischen Stoßes ist durch $k = 1$, der des plastischen Stoßes durch $k = 0$ gekennzeichnet.

- Richtungshypothese [Marquard 62]

Der Stoßantrieb liegt in Richtung der Relativgeschwindigkeit der Schwerpunkte zum Zeitpunkt der Erstberührung und wird als unabhängig von der Gestalt der Körper an der Anstoßstelle betrachtet. Die Richtungshypothese kann nicht allgemein gültig sein, da ansonsten Geometrie und Stoffeigenschaften an der Berührstelle ohne Einfluss wären.

- Verhakungshypothese [Slibar 66]

Für den Fall, dass der Stoßantrieb innerhalb des Reibungskegels $P_T \leq \mu \cdot P_N$ liegt, ist die tangentiale Relativgeschwindigkeit zwischen den Stoßkontrahenten gleich Null. Diese Hypothese wird bei den grafischen Rekonstruktionsverfahren (implizit) zu Grunde gelegt.

- Gleithypothese [Böhm 68]

Falls sich die Verhakungstheorie bei der Rechnung als nicht tragfähig erweist oder der Kollisionsablauf offensichtlich gleitend ist, wird $P_T = \mu \cdot P_N$ gesetzt. Bei der Gleithypothese besteht oft die Schwierigkeit in der Festsetzung der Normal- bzw. der Tangentialebene und der Annahme des Reibbeiwertes μ . Diese Hypothese ist heute Grundlage der Vorwärtsrechnung (siehe Abschn. 5.1.2 und 5.3) bei Gleitstößen. Rechnergestützte Verfahren machen es heute möglich, viele Varianten in kurzer Zeit durchzurechnen.

Grundsätzlich ist zu der Richtungs-, Verhakungs- und Gleithypothese anzumerken, dass die Richtung des Stoßantriebsvektors nicht nur von der Topologie und der Eingangskinematik der Kollisionskörper abhängen kann, sondern auch von den Form-, Struktur- und Werkstoffeigenschaften im Berührungs-, Kontakt-, Durchdringungsbereich abhängen muss. Ein gleichzeitiges Vorschreiben von Verhakung einerseits und Stoßantriebsrichtung andererseits führt zu Widersprüchen und ist im Allgemeinen unzulässig.

4.4.4 Impulssatz

Ein Körper mit der Masse m erfährt einen Stoß, wenn sich sein Geschwindigkeitszustand in einem sehr kurzen Zeitabschnitt sprunghaft ändert, während seine Lage unverändert bleibt. Unter Annahme einer unveränderlichen Masse während des Stoßes ergibt sich aus dem Schwerpunktsatz durch Integration über die sehr kleine Stoßdauer $\Delta t = t' - t$

$$\int_{v_s}^{v'_s} d(m \cdot \underline{v}_S) = \int_t^{t'} \underline{F} dt \Rightarrow m \cdot \underline{v}'_S - m \cdot \underline{v}_S = \int_t^{t'} \underline{F} dt.$$

Mit:

$$m \cdot \underline{v}'_S = \underline{I}' \quad \text{Impuls des Körpers nach dem Stoß}$$

$$m \cdot \underline{v}_S = \underline{I} \quad \text{Impuls des Körpers vor dem Stoß}$$

$$\int_t^{t'} \underline{F} dt = \underline{P} \quad \text{Stoßantrieb des Körpers}$$

schreibt sich der Impulssatz für den Körper:

$$\underline{I}' - \underline{I} = \underline{P},$$

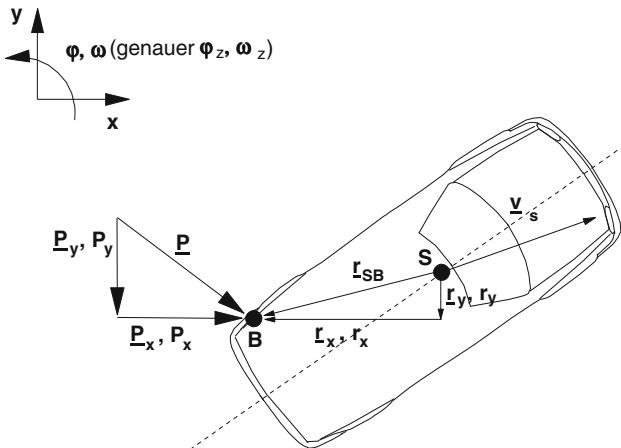
d.h. die Einwirkung des Stoßantriebes verursacht die Änderung des Impulses. Es ist zu beachten, dass sich der Impuls eines Körpers allein aus seiner Gesamtmasse und seiner Schwerpunktsgeschwindigkeit ergibt. Des Weiteren gilt, dass Impuls und Stoßantrieb gerichtete Größen, Vektoren sind und dass daher eigentlich von Impulsvektor und Stoßantriebsvektor, entsprechend Schwerpunkts-Geschwindigkeitsvektor und Kraftvektor, gesprochen werden muss. Der Kollisionsort KO ist bekannt oder muss angenommen werden.

4.4.5 Drehimpulssatz

Analog zum Impulssatz gilt der Drehimpulssatz für plötzliche Änderungen der Rotationsgeschwindigkeit.

$$\frac{d\underline{D}_S}{dt} = \sum_i \underline{M}_{Si} = \underline{M}_S \quad (\text{Drallsatz}).$$

Abb. 4.20 Stoßantrieb an der ebenen Scheibe ($B = K = KO$)



Nach Integration über die Stoßdauer $\Delta t = t' - t$ ergibt sich mit $D_S = \underline{\underline{\Theta}} \cdot \underline{\omega}$ ($\underline{\underline{\Theta}} = \text{konst.}$)

$$D'_S - D_S = \underline{\underline{\Theta}} \cdot \underline{\omega}' - \underline{\underline{\Theta}} \cdot \underline{\omega} = \int_t^{t'} \underline{M}_S dt$$

$$\int_t^{t'} \underline{M}_S dt = \int_t^{t'} (\underline{r} \times \underline{F}_a) dt = \underline{r} \times \underline{P}$$

$$\underline{\underline{\Theta}} \cdot \underline{\omega}' - \underline{\underline{\Theta}} \cdot \underline{\omega} = \underline{r} \times \underline{P}.$$

Das zeitliche Integral des Momentes der an dem starren Körper angreifenden Kräfte ist das auf den Körperschwerpunkt bezogene Moment des Stoßantriebes, der im Berührpunkt B wirkt. Die Änderung des Drehimpulsvektors D_S ist gleich der Summe der Momente aller äußeren Stoßantriebe. Das Produkt $r \times P$ wird Drehstoß genannt.

4.4.6 Stoßgleichungen für die ebene Scheibe

Abgesehen von wissenschaftlichen Untersuchungen und besonders aufwendigen Rekonstruktionen, z. B. im Rahmen von Produkthaftungsfällen in den USA, wird in der Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion fast immer nur das zweidimensionale Problem (Abb. 4.20) betrachtet. Bei Pkw-Unfällen wird also nur die auf die Straßenebene projizierte Bewegung der Pkw betrachtet, Nick-, Wank- und Vertikalbewegungen werden vernachlässigt. Der Pkw wird also nicht als dreidimensionaler Körper, sondern als zweidimensionale Scheibe behandelt. Die ebene Bewegung wird durch drei Lagekoordinaten beschrieben, üblicherweise die Schwerpunktverschiebungen x_S , y_S und den Drehwinkel φ .

Impulssatz für die ebene Scheibe:

$$m \cdot \underline{v}'_S - m \cdot \underline{v}_S = \underline{P},$$

daraus folgen für die ebene Bewegung *zwei skalare* Gleichungen (zu den Vorzeichen von P_x und P_y siehe auch Abschn. 4.8):

$$\begin{aligned} m \cdot v'_{Sx} - m \cdot v_{Sx} &= +P_x \\ m \cdot v'_{Sy} - m \cdot v_{Sy} &= -P_y \quad (\text{Vorzeichen!}) . \end{aligned}$$

Drehimpulssatz für die ebene Scheibe:

$$\underline{D}'_S - \underline{D}_S = \underline{r}_{SB} \times \underline{P};$$

In Komponentenschreibweise lauten die Vektoren $\underline{r}_{SB} = \begin{pmatrix} -r_x \\ -r_y \\ 0 \end{pmatrix}$, $\underline{P} = \begin{pmatrix} P_x \\ -P_y \\ 0 \end{pmatrix}$.

Das äußere oder vektorielle Produkt zweier Vektoren berechnet sich allgemein zu [Dubbel 97]:

$$\underline{a} \times \underline{b} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 \cdot b_3 - a_3 \cdot b_2 \\ -(a_1 \cdot b_3 - a_3 \cdot b_1) \\ a_1 \cdot b_2 - a_2 \cdot b_1 \end{bmatrix}.$$

Daraus folgt hier:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Theta_{Sz} \cdot \omega'_z - \Theta_{Sz} \cdot \omega_z \end{bmatrix} = \underline{r}_{SB} \times \underline{P} = \begin{bmatrix} -r_x \\ -r_y \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_x \\ -P_y \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (-r_x) \cdot (-P_y) - (-r_y) \cdot (+P_x) \end{bmatrix}.$$

Dabei ist r ein beliebiger Verbindungsvektor vom Schwerpunkt S zur Wirkungslinie von P (z. B. r_{SB}). Für den Drehimpulssatz ergibt sich damit also eine skalare Gleichung, die anschaulich auch direkt anhand von Abb. 4.20 hätte ablesen werden können:

$$\Theta_{Sz} \cdot (\omega'_z - \omega_z) = P_y \cdot r_x + P_x \cdot r_y .$$

Zu den Festlegungen der Vorzeichen von P_x und P_y siehe auch Abschn. 4.8.

4.4.7 Gerader zentrischer Stoß zweier Scheiben

Die Stoßziffer soll am Beispiel des geraden zentralen Stoßes zweier Scheiben veranschaulicht werden, siehe Abb. 4.21. Gegeben seien die Schwerpunktgeschwindigkeiten v_1 und v_2 sowie die Massen m_1 und m_2 , gesucht seien die Schwerpunktgeschwindigkeiten v_1' und

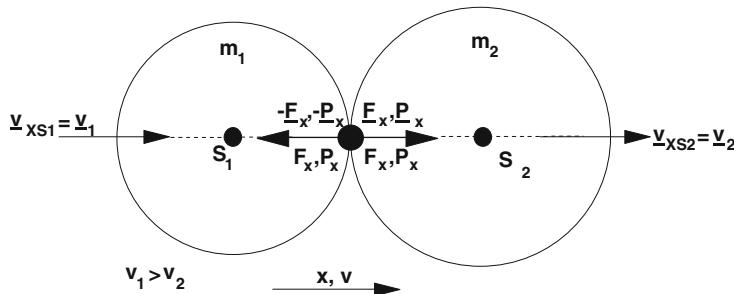


Abb. 4.21 Gerader zentrischer Stoß zweier Scheiben

v_2' nach dem Stoß. Interessant ist hier lediglich die Bewegungsrichtung x , insofern kann das Problem als eindimensionales Problem von Massenpunkten behandelt werden. Die Stoßkräfte bzw. die Stoßantriebe sind nach dem Prinzip von *actio = reactio* gleich groß entgegengesetzt, ihre Richtung kann, da Reaktionskräfte, beliebig angesetzt werden.

Die Impulssätze für die Scheiben 1 und 2 in x -Richtung (y -Richtung und Drehrichtung entfallen) lauten:

$$m_1 \cdot (v'_1 - v_1) = - \int F_x dt = -P_x$$

$$m_2 \cdot (v'_2 - v_2) = \int F_x dt = +P_x .$$

Durch Addition der beiden Gleichungen ergibt sich der Impulserhaltungssatz, siehe Abschn. 4.4.8:

$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = m_1 \cdot v'_1 + m_2 \cdot v'_2 = (m_1 \cdot m_2) \cdot v_{SGes} .$$

Es verbleiben somit zwei Gleichungen für drei Unbekannte $v_1' = v_{1x}'$, $v_2' = v_{2x}'$ und P_x . Als dritte Gleichung wird die Stoßzahlhypothese von Newton herangezogen, es werden also die Stoßziffer k und damit das elastoplastische Verhalten beim Stoß vorgegeben:

$$k = \frac{P_{Rest}}{P_{Komp}} = \frac{\int\limits_{t_u}^{t'} F dt}{\int\limits_t^{t_u} F dt} .$$

Der Kompressions- und der Restitutionsstoßantrieb lauten:

$$\begin{aligned} m_1 \cdot (v_{1u} - v_1) &= -P_{Komp} & m_1 \cdot (v'_1 - v_{1u}) &= -P_{Rest} \\ m_2 \cdot (v_{2u} - v_2) &= +P_{Komp} & m_2 \cdot (v'_2 - v_{2u}) &= +P_{Rest} . \end{aligned}$$

Aus den beiden ersten Gleichungen ergibt sich mit $v_u = v_{1u} = v_{2u}$ durch Addition die gemeinsame Geschwindigkeit während der größten Annäherung (und der größten Stoßkraft):

$$v_u = \frac{(m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2)}{m_1 + m_2} .$$

Durch Einsetzen der Teilstoßantriebe in die Definitionsgleichung der Stoßzahl und Elimination der „Umkehrgeschwindigkeit“ v_u lässt sich die Formel für den k -Faktor in eine für die Anwendung wichtige und anschauliche Form bringen:

$$k = -\frac{v'_1 - v'_2}{v_1 - v_2} = -\frac{v'_2 - v'_1}{v_2 - v_1}.$$

Die Stoßziffer k ist also das negative Verhältnis der Relativgeschwindigkeiten nach und vor dem Stoß der beteiligten Massenpunkte. Verallgemeinernd ist festzustellen, dass die Stoßziffer beim Stoß zwischen Scheiben oder Körpern das negative Verhältnis der Relativgeschwindigkeiten an dem Berührpunkt in Normalenrichtung des Stoßantriebes ist. Die gesuchten Auslaufgeschwindigkeiten können jetzt mit Hilfe der Stoßziffer und der Einlaufgeschwindigkeiten ausgedrückt werden:

$$v'_1 = v_1 - \frac{m_2 \cdot (1 + k)}{m_1 + m_2} \cdot (v_1 - v_2) \quad v'_2 = v_2 + \frac{m_1 \cdot (1 + k)}{m_1 + m_2} \cdot (v_1 - v_2).$$

Damit folgt für den Stoßantrieb:

$$P_x = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot (1 + k) \cdot (v_1 - v_2).$$

Es ist unbedingt notwendig, in dem „Ersatzsystem“ einer Stoßkonfiguration (z. B. Abb. 4.21) positive Koordinaten (hier x) festzulegen. Abhängig von den vorgegebenen Größen (z. B. Massen) sind die Ergebnisse (v'_1, v'_2) dann positiv oder negativ. P_x ist wegen $v_1 > v_2$ positiv, wirkt also wie in Abb. 4.21 angezeigt wird. Wäre P_x mit umgekehrtem Vorzeichen in Abb. 4.21 so eingezeichnet worden, dass er einem „Zugantrieb“ entspricht, wäre das Ergebnis negativ gewesen, d. h. der Pfeil hätte real in anderer Richtung gezeigt.

Während des Stoßes (zwischen t und t') weisen die Geschwindigkeiten Unstetigkeiten auf. Während des Ein- und des Auslaufes sind die Geschwindigkeiten (je nach Abbremsung oder Beschleunigung) kontinuierlich veränderlich.

Die Geschwindigkeitsänderungen Δv_1 und Δv_2 für die beiden Scheiben errechnen sich zu

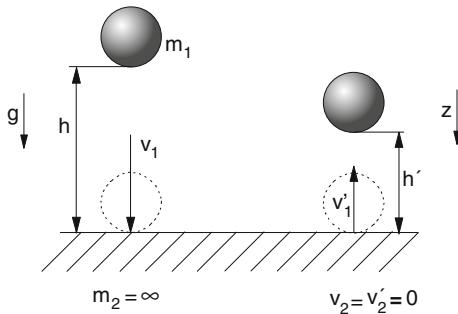
$$\Delta v_1 = v'_1 - v_1 = -\frac{m_2 \cdot (1 + k)}{m_1 + m_2} \cdot (v_1 - v_2)$$

$$\Delta v'_2 = v'_2 - v_2 = \frac{m_1 \cdot (1 + k)}{m_1 + m_2} \cdot (v_1 - v_2),$$

d. h. die Geschwindigkeitsänderung Δv_1 wächst mit

- der Relativgeschwindigkeit $v_{\text{rel}} = v_1 - v_2$,
- dem elastischen Anteil,
- der Masse m_2 des Kollisionskontrahenten.

Abb. 4.22 Freier Fall einer Kugel auf eine Unterlage ($m_2 = \infty$, $v_2 = v_2' = 0$) und Rückprall



Die Restitutionsziffer k lässt sich anschaulich beim Rückprall von einer Unterlage, Wand o. ä. darstellen, Abb. 4.22. Die Geschwindigkeiten (v_1, v_1') beziehen sich auf den Zeitpunkt des Aufpralls. In den eingezzeichneten oberen Lagen der Kugel sei die Geschwindigkeit gerade Null, da die kinetische Energie in potenzielle Energie umgesetzt wurde.

Aus dem Energiesatz folgt:

$$\begin{aligned} v_1 &= \sqrt{2 \cdot g \cdot h} && \text{Aufprallgeschwindigkeit (positiv, da in } z\text{-Richtung)} \\ v_1' &= -\sqrt{2 \cdot g \cdot h'} && \text{Abprallgeschwindigkeit (negativ, da gegen } z\text{-Richtung)} . \end{aligned}$$

Für die Stoßzahl ergibt sich:

$$k = \frac{v_1'}{v_1} = \sqrt{\frac{h'}{h}} \quad (\text{immer positiv, wenn keine Durchdringung erfolgt}) .$$

Demnach beträgt die Geschwindigkeitsänderung beim Aufprall:

$$\Delta v = v_1' - v_1 = -(1 + k) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (\text{negativ, da gegen } z\text{-Richtung}) .$$

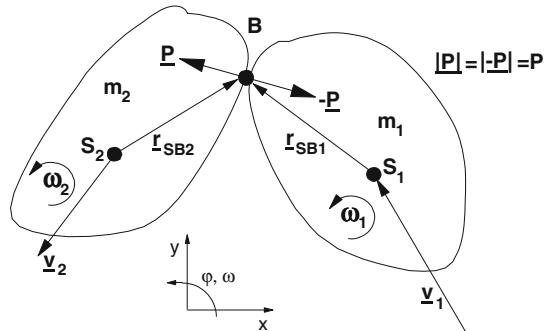
In Übertragung auf den Fahrzeug-Wandaufprall heißt das, die Stoßzahl k kann leicht aus dem Verhältnis von Rückprall- zu Aufprallgeschwindigkeit ermittelt werden. Betragen die Geschwindigkeiten z. B. $-9,6$ und $+64,0$ km/h, so ist $k = 0,15$ und $\Delta v = -73,4$ km/h.

Formal können auch „Durchdringungsstöße“ mit einer dann negativen Stoßziffer beschrieben [Zeman 01] und entsprechende Rechnungen durchgeführt werden. Den ursprünglichen Gedanken von Newton bei der Einführung der Stoßtheorie widerspricht allerdings diese formale Deutung der Stoßziffer.

4.4.8 Schiefer exzentrischer Stoß zweier Scheiben

In Abb. 4.23 ist der allgemeine Fall einer Kollision zweier ebener Scheiben (Fahrzeuge) dargestellt. Die Stoßantriebe können als Reaktionsgrößen in beliebiger Richtung angesetzt

Abb. 4.23 Schiefer exzentrischer Stoß zweier Scheiben



werden, wobei aber *actio = reactio* zu beachten ist. Die Impuls- und Drehimpulssätze lauten:

$$\begin{aligned}\underline{I}'_1 - \underline{I}_1 &= m_1 \cdot (\underline{v}'_1 - \underline{v}_1) = -\underline{P} & \underline{v}_1 \equiv \underline{v}_{S1} \\ \underline{I}'_2 - \underline{I}_2 &= m_2 \cdot (\underline{v}'_2 - \underline{v}_2) = +\underline{P} & \underline{v}_2 \equiv \underline{v}_{S2} \\ \underline{D}'_{S1} - \underline{D}_{S1} &= \underline{\Theta}_{S1} \cdot (\underline{\omega}'_1 - \underline{\omega}_1) = \underline{r}_{SB1} \times (-\underline{P}) \\ \underline{D}'_{S2} - \underline{D}_{S2} &= \underline{\Theta}_{S2} \cdot (\underline{\omega}'_2 - \underline{\omega}_2) = \underline{r}_{SB2} \times (+\underline{P}) .\end{aligned}$$

Durch Addition der beiden Impulssätze folgt der „Impulserhaltungssatz“:

$$\underline{I}'_1 + \underline{I}'_2 = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 ,$$

Anschaulich bedeutet der Impulserhaltungssatz, dass der Gesamtimpuls, also die Geschwindigkeit des Gesamtschwerpunktes, nach Größe und Richtung beim Stoß erhalten bleibt. Als innere Kraftgröße kann sich der Stoßantrieb nicht auf die Bewegung des Gesamtschwerpunktes auswirken. Eine entsprechende Erhaltung gilt nicht für den Drehimpuls.

Falls die Schwerpunktseinlaufgeschwindigkeiten als Vektoren, die Eingangsrehgeschwindigkeiten und die Massen der beiden Scheiben gegeben sind, stellen Impuls- und Drehimpulsgleichungen sechs Gleichungen für die folgenden acht Unbekannten dar:

$$v'_{1x}, v'_{1y}, v'_{2x}, v'_{2y}, w'_1, w'_2, P_x \text{ und } P_y .$$

Die fehlenden beiden Gleichungen müssen aus Ergänzungshypothesen abgeleitet werden. Beispiele dafür sind, wenn *N* die Normalenrichtung und *T* die Tangentenrichtung im Berührpunkt *B* bedeuten:

- siebte Gleichung aus der Newtonschen Stoßzahlhypothese:

$$k = \frac{v'_{B2N} - v'_{B1N}}{v_{B1N} - v_{B2N}} = -\frac{v'_{B2N} - v'_{B1N}}{v_{B2N} - v_{B1N}} ,$$

- achte Gleichung aus der Verhakungshypothese (Haftstoß):

$$\underline{v}'_{B1T} = \underline{v}'_{B2T} \quad \text{für} \quad P_T \leq \mu \cdot P_N \quad (\text{Kontrolle nach Berechnung})$$

- oder achte Gleichung aus der Gleithypothese (Gleitstoß):

$$P_T = \mu \cdot P_N$$

mit der Schwierigkeit der Bestimmung des Reibwertes ($0,6 \leq \mu \leq 1,4$) nach [Böhm 68]

- oder achte Gleichung aus der Richtungshypothese (fixierte Stoßrichtung):

$$P \parallel \underline{v}_{\text{rels}} \quad \text{bzw.} \quad P \parallel \underline{v}_{\text{relB}}$$

- oder siebte und achte Gleichung aus der Verhakungshypothese:

$$\underline{v}'_{1B} = \underline{v}'_{2B}: \quad \underline{v}'_{1Bx} = \underline{v}'_{2Bx} \quad \underline{v}'_{1By} = \underline{v}'_{2By}.$$

Die Anwendung der Stoßrechnung verlangt also die Einführung von realitätsnahen Ergänzungshypothesen. Ersetzt werden können diese durch Zusatzbedingungen wie z. B. die Vorgabe der Einlaufrichtungen. Davon machen üblicherweise die grafischen Rekonstruktionsverfahren Gebrauch. Beim klassischen Antriebs-Balanceverfahren und davon abgeleiteten Verfahren wird über die Art des Stoßes (gleitend, verhakt, k -Wert) keine Aussage gemacht bzw. benötigt. Gleitstöße sind also beispielsweise eingeschlossen, soweit sie mit den Basisvoraussetzungen für die Anwendung der Stoßtheorie (Erhaltung der kinematischen Konfiguration während des Stoßes, siehe Abschn. 4.4.2) in Einklang zu bringen sind bzw. gebracht werden können.

Bei der Verhakungshypothese ist von Vorteil, dass die Richtungen x und y nicht mit den gewählten Richtungen T und N übereinstimmen müssen. Die Bestimmung der Richtungen T und N ist nämlich in vielen Fällen schwierig bzw. unmöglich, ist aber heute bei der Anwendung der computergestützten Vorwärts-Stoßrechnung im Falle von Gleitstößen erforderlich. Bei Schräkgollisionen mit Leitplanken ist die Festlegung der Normal- und Tangentialrichtung des Stoßantriebes einfach.

4.5 Arbeitssatz (Energiesatz)

4.5.1 Arbeitssatz für starre Körper

Die Bewegung eines starren Körpers wird zwischen den Lagen A (Anfang) und E (Ende) verfolgt. Sie wird als Überlagerung der Translationsbewegung des Schwerpunktes und der Rotationsbewegung um den Schwerpunkt behandelt. Erstere wird durch den Schwerpunktssatz, zweite durch den Drallsatz beschrieben.

Bei Multiplikation des Schwerpunktsatz

$$\underline{F}_a = m \cdot \frac{d\underline{v}_S}{dt}$$

skalar mit der Verschiebung

$$d\underline{r}_S = \underline{v}_S \cdot dt ,$$

ergibt sich:

$$\underline{F}_a \cdot d\underline{r}_S = m \cdot \frac{d\underline{v}_S}{dt} \cdot \underline{v}_S \cdot dt = m \cdot \underline{v}_S \cdot d\underline{v}_S = d \left[\frac{m \cdot \underline{v}_S^2}{2} \right] .$$

Die linke Seite der Gleichung stellt den differenziellen Arbeitsbetrag dar, den die Resultierende $F_{(a)}$ der äußeren Kräfte längs der Schwerpunktverschiebung $d\underline{r}_S$ während der Zeitanänderung dt leistet. Die rechte Seite ist die Änderung der kinetischen Energie der Translationsbewegung des Schwerpunktes. Durch Integration längs des Schwerpunktweges folgt:

$$\int_A^E \underline{F}_a \cdot d\underline{r}_S = \frac{m}{2} \cdot (\underline{v}_E^2 - \underline{v}_A^2) = (E_E - E_A)_{\text{trans}} .$$

Die Arbeit der äußeren Kräfte, die auf den Körper bei der Bewegung von A nach E wirken, ist gleich der Änderung an translatorischer kinetischer Energie.

Betrachten wir nun die Rotationsbewegung um den Schwerpunkt und multiplizieren deshalb den Drallsatz

$$\underline{M}_S = \frac{d}{dt} (\Theta \cdot \underline{\omega}) = \Theta \frac{d\underline{\omega}}{dt}$$

skalar mit dem Verdrehungsvektor

$$d\underline{\varphi} = \underline{\omega} \cdot dt ,$$

so ergibt sich:

$$\underline{M}_{S(a)} \cdot d\underline{\varphi} = \underline{\Theta} \cdot \frac{d\underline{\omega}}{dt} \cdot \underline{\omega} \cdot dt = \underline{\Theta} \cdot \underline{\omega} \cdot d\underline{\omega} = d \left[\frac{\underline{\Theta} \cdot \underline{\omega}^2}{2} \right] .$$

Die linke Seite stellt – in Analogie zur Translation – den differenziellen Arbeitsbetrag infolge der Wirkung der äußeren Momente $M_{S(a)}$ unter dem Verdrehungsvektor $d\underline{\varphi}$ dar. Die rechte Seite beschreibt die differenzielle Änderung der kinetischen Energie der Rotationsbewegung des Körpers um den Schwerpunkt. Durch Integration über den Verdrehwinkel folgt für die ebene Bewegung:

$$\int_A^E \underline{M}_S \cdot d\underline{\varphi} = \frac{\Theta}{2} \cdot (\underline{\omega}_E^2 - \underline{\omega}_A^2) = (E_E - E_A)_{\text{rot}} .$$

Die Arbeit der äußeren Momente, die – bezogen auf den Schwerpunkt – bei der Drehung des Körpers von A nach E wirken, ist gleich dem Zuwachs an rotatorischer kinetischer Energie.

Entscheidend für die spätere Rückrechnung der Schwerpunktgeschwindigkeit und der Winkelgeschwindigkeit unmittelbar nach dem Stoß aus den Auslaufbewegungen (Schwerpunktweg, Drehwinkel zwischen den Positionen A und E) ist die Tatsache, dass die Arbeitssätze für die Translation und Rotation *getrennt* gelten, falls der Schwerpunkt als Bezugspunkt gewählt wird.

Selbstverständlich gilt auch die Überlagerung, die sich durch Addition der abgeleiteten Teilarbeitssätze ergibt:

$$\begin{aligned}(A_{\text{trans}} + A_{\text{rot}})|_A^E &= E_E - E_A \\ &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{SE}^2 + \frac{1}{2} \cdot \Theta_S \cdot \omega_E^2 - \left(\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{SA}^2 + \frac{1}{2} \cdot \Theta_S \cdot \omega_A^2 \right).\end{aligned}$$

Es sei darauf hingewiesen, dass bei den äußeren Kräften $F_{(a)}$ und Momenten $M_{S(a)}$ nur die eingeprägten Kraftgrößen eingehen, da die Reaktions-Kraftgrößen definitionsgemäß keine Arbeit bei der Bewegung leisten,

- die äußeren Kraftgrößen nicht, da ihre Angriffspunkte sich nicht verschieben,
- die inneren Kraftgrößen nicht, da sich wegen $\text{actio} = \text{reactio}$ die Arbeitsbeträge aufheben.

4.5.2 Arbeitssatz für deformierbare Körper im statischen Gleichgewicht

Wir betrachten hier nicht die im vorigen Abschnitt behandelte Starrkörperbewegung, sondern das statische Gleichgewicht von deformierbaren Körpern, bei denen gegenseitige Verschiebungen der Körperpunkte möglich sind. Dann folgt aus dem Prinzip der virtuellen Verrückungen [Szabo 72] für die Differenziale

$$\delta A_{(\text{a,eing})} = \delta W$$

und durch Integration

$$A_{(\text{a,eing})} = W.$$

Die Arbeit $A_{(\text{a,eing})}$ der äußeren eingeprägten Kräfte, die bei der „unendlich langsam“ Verformung auftreten, ist gleich der Verformungsarbeit $W = W_{\text{Def.}}$

Es ist anzumerken, dass die bei Fahrzeugkollisionen durch „Stoßkräfte“ verursachten Fahrzeugdeformationen und Verformungsarbeiten nicht mit den Annahmen der Stoßtheorie:

- Stoßkräfte sind Reaktionskräfte,
- es treten keine Deformationen an den beteiligten Körpern auf,

verträglich sind. Die über der Deformation veränderlichen Kontaktkräfte sind in Realität (Kraftrechnung) keine Reaktionskräfte, sondern eingeprägte Kräfte. Die Betrachtungen zum Arbeitssatz gelten allgemein und unterliegen nicht den Einschränkungen der Stoßtheorie.

4.5.3 Arbeitssatz allgemein

Für die Bewegung von deformierbaren Körpern zwischen den Lagen A (Anfang) und E (Ende) ergibt sich durch Überlagerung von Starrkörperbewegung mit „statischem“ Deformationsvorgang der Arbeitssatz in allgemeiner Form:

$$A|_A^E = E_E - E_A + W|_A^E .$$

Dabei sind:

$A|_A^E$: Arbeit der äußeren Kräfte und Momente auf dem Weg von A nach E

E_E : Kinetische Energie im Zustand E (Endzustand der Betrachtung)

E_A : Kinetische Energie im Zustand A (Anfangszustand der Betrachtung)

$W|_A^E$: Deformationsarbeit, Formänderungsarbeit auf dem Weg von A nach E .

Der Arbeitssatz ist nicht als Teil der Stoßtheorie aufzufassen, sondern liefert Zusatzbedingungen zu den Gleichungen der Stoßtheorie (Impulssatz, Drehimpulssatz).

4.5.4 Arbeitssatz für den Wandaufprall eines Fahrzeugs

Für den Aufprall eines Fahrzeugs gegen die feste Wand möge gelten:

- zentraler, gerader Stoß
- Aufprallgeschwindigkeit v ($v = v_S$)
- Rückprallgeschwindigkeit v' ($v' = v_S'$)
- Masse des Fahrzeugs m .

Die äußere Arbeit $A|_A^E$ der äußeren Kräfte (Kontaktkräfte) ist Null, da die Wand starr sein soll. Also lautet der Arbeitssatz

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v'^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + W \\ \Rightarrow W &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v^2 - v'^2) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \cdot (1 - k^2) \quad \text{mit} \quad k = -\frac{v'}{v} . \end{aligned}$$

A bezeichnet bei diesem Vorgang den Zustand unmittelbar vor dem Aufprall, E den Zustand unmittelbar danach. Der formale Widerspruch, dass Stoßkräfte als Reaktionskräfte in

der Stoßtheorie keine Arbeit leisten können, als Deformationskräfte und damit eingeprägte Kräfte in der Realität aber Deformationsarbeit leisten, muss hingenommen werden.

4.5.5 Arbeitssatz für die gerade, zentrische Kollision zweier Fahrzeuge

Es wird angenommen, dass es sich um je einen zentralen, geraden Stoß für beide Fahrzeuge handelt (siehe Abb. 4.22). Dabei kann von einer Front-Heck-, Front-Seite- oder Front-Front-Kollision ausgegangen werden. Die Fahrzeuge tragen die Indizes 1 und 2, die Geschwindigkeiten vor (v_i) und nach der Kollision (v'_i) beziehen sich auf die Schwerpunkte.

Da hier keine äußeren Kräfte einwirken (z. B. Reifenkräfte werden vernachlässigt), entfällt auch die Arbeit der äußeren Kräfte, und der Arbeitssatz wird zum Energieerhaltungssatz:

$$\begin{aligned} 0 &= E_E - E_A + W|_A^E \\ \Rightarrow W|_A^E &= W_{\text{Def}} = E_A - E_E \\ \Rightarrow W|_A^E &= \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v_1^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v_1'^2 - \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot v_2'^2 = W_{\text{Def}} . \end{aligned}$$

Für die Kollisionsphase gilt also der Energiesatz in der Form

$$E_1 + E_2 = E'_1 + E'_2 + W_{\text{Def}} .$$

Durch Einsetzen der Auslaufgeschwindigkeiten, die allein aus dem Impulssatz und der Newtonschen Stoßzahlhypothese folgen, siehe Abschn. 4.4.7, ergibt sich nach einigen Umformungen:

$$\begin{aligned} W_{\text{Def}} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot (v_1 - v_2)^2 \cdot (1 - k^2) \\ \Rightarrow W_{\text{Def}} &= \frac{1}{2} \cdot m_{\text{ers}} \cdot v_{\text{rel}}^2 \cdot (1 - k^2) . \end{aligned}$$

Beim zentrischen, geraden Zusammenstoß zweier Körper bestimmt sich die Energie-dissipation allein aus den Massen, der relativen Kollisionsgeschwindigkeit und dem Restitutionskoeffizienten. Beim elastischen Stoß ($k = 1$) ist keine bleibende Deformationsenergie vorhanden.

Bei einem exzentrischen, schießen Stoß erfahren die Stoßkontrahenten nicht nur eine Änderung ihrer Translationsgeschwindigkeit, sondern auch eine Änderung ihrer Rotationsgeschwindigkeit:

$$W_{\text{Def}} = E_{1\text{trans}} + E_{2\text{trans}} + E_{1\text{rot}} + E_{2\text{rot}} - (E'_{1\text{trans}} + E'_{2\text{trans}} + E'_{1\text{rot}} + E'_{2\text{rot}}) .$$

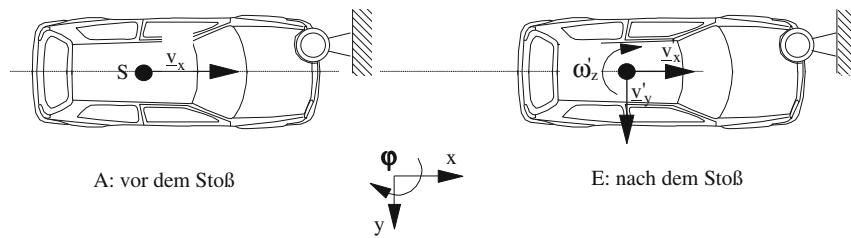


Abb. 4.24 Exzentrischer Pfahlaufprall als Stoßvorgang (keine Lageänderung beim Stoß)

4.5.6 Arbeitssatz für den exzentrischen Aufprall eines Fahrzeugs auf einen starren Pfahl

Verglichen werden die Zustände unmittelbar vor und nach dem Aufprall, siehe Abb. 4.24. Die Arbeit der äußeren Stoßkraft ist auch hier Null, da keine Verschiebungen am starren Pfahl auftreten. Also lautet der Arbeitssatz

$$\begin{aligned} A|_A^E &= 0 = E_E - E_A + W|_A^E \\ \Rightarrow W|_A^E &= W_{\text{Def}} = E_A - E_E \\ \Rightarrow W|_A^E &= \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_x^2 - \left(\frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_x'^2 + v_y'^2) + \frac{1}{2} \cdot \Theta_S \cdot \omega_z'^2 \right). \end{aligned}$$

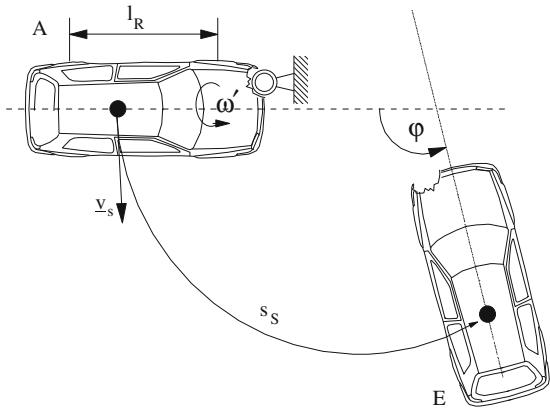
Neben den Auslaufbewegungen sind nach Unfällen oft die Fahrzeugdeformationen und damit die Verformungsarbeiten als wichtige „Anknüpfungstatsachen“ oder „Spuren“ bekannt oder hinreichend genau abschätzbar. Der auf den Aufprallvorgang bezogene Arbeitssatz kann dann als Zusatzbedingung, als Ergänzungshypothese in die Rekonstruktionsansätze der Stoßmechanik einbezogen werden.

4.5.7 Arbeitssatz für die Auslaufbewegung nach dem Stoß

Von besonderer Bedeutung für die Unfallrekonstruktion ist der Arbeitssatz für die Auslaufbewegung nach dem Stoß (A) bis in die Endlage (E) bzw. Ruhelage. Denn in der Regel kann davon ausgegangen werden, dass gesicherte Spuren dieser Bewegung nach einem Unfall vorhanden und aufgenommen worden sind.

Abbildung 4.25 beschreibt die Situation der Auslaufbewegung nach einem exzentrischen Pfahlaufprall. Der Arbeitssatz kann, wie bewiesen, in einen translatorischen und einen rotatorischen Anteil aufgespalten werden, wenn der Schwerpunkt als Bezugspunkt gewählt wird. Als äußere Kräfte wirken Reibungskräfte über die Reifen auf das Fahrzeug. Diese sind der Bewegung entgegengerichtet, also ist die Arbeit der äußeren Kräfte negativ. Vereinfachend wird üblicherweise angenommen, dass die Reibkraft gleichförmig über den

Abb. 4.25 Schematische Darstellung der Auslaufbewegung nach dem Pfahlaufprall



Auslaufweg wirkt. Der Arbeitssatz für die Translationsbewegung lautet dann:

$$\begin{aligned} A_{\text{trans}}|_A^E &= (E_E - E_A)_{\text{trans}} \\ \Rightarrow -m \cdot g \cdot \mu \cdot s_S &= 0 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v'_S{}^2, \end{aligned}$$

d. h.

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v'_S{}^2 = m \cdot g \cdot \mu \cdot s_S.$$

Hieraus ergibt sich der Betrag der Schwerpunktgeschwindigkeit nach dem Stoß, die Richtung folgt üblicherweise aus dem Spurenbild der Reifen:

$$v'_S = \sqrt{2 g \mu s_S}.$$

Für die Rotationsbewegung folgt aus dem Arbeitssatz:

$$\begin{aligned} A_{\text{rot}}|_A^E &= (E_E - E_A)_{\text{rot}} \\ \Rightarrow -\frac{1}{2} \cdot m \cdot g \cdot \mu \cdot l_R \cdot \varphi &= 0 - \frac{1}{2} \cdot \Theta_S \cdot \omega'^2, \end{aligned}$$

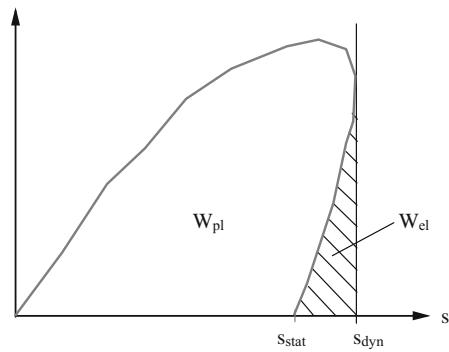
d. h.

$$\frac{1}{2} \cdot \Theta_S \cdot \omega'^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot g \cdot \mu \cdot l_R \cdot \varphi.$$

Daraus ergibt sich die Winkelgeschwindigkeit des Fahrzeugs unmittelbar nach dem Stoß. Diese ist übrigens invariant, d. h. für jeden Punkt des Fahrzeugs gleich:

$$\omega' = \sqrt{\frac{mg\mu l_R \varphi}{\Theta_S}} \quad (\text{mit } l_R \text{ Radstand des Fahrzeuges}).$$

Abb. 4.26 Kraft-Weg-Diagramm beim Fahrzeugaufprall gegen die OUB



4.5.8 Berechnung der Stoßziffer für einen Wandaufprall

Beim Aufprall eines Fahrzeugs auf eine ortsfeste, undeformierbare Barriere (OUN) mit der Anfangsgeschwindigkeit v wird ein Kraft-Weg-Verlauf gemäß Abb. 4.26 gemessen.

Nach Erreichen der maximalen (dynamischen) Deformation tritt eine Rückwärtsbewegung (Rückprall) auf, bis nach Lösen des Fahrzeugs von der Barriere eine kleinere (= statische) Deformation verbleibt. Es gilt der Arbeitssatz:

$$\begin{aligned} A|_{s=0}^{s_{\text{dyn}}} &= E_{s_{\text{dyn}}} - E_{s=0} + W|_{s=0}^{s_{\text{dyn}}} \\ 0 &= 0 - E + W_{\text{pl}} + W_{\text{el}} \\ A|_{s_{\text{dyn}}}^{s_{\text{stat}}} &= E_{s_{\text{stat}}} - E_{s_{\text{dyn}}} + W|_{s_{\text{dyn}}}^{s_{\text{stat}}} \\ 0 &= E' - 0 - W_{\text{el}} . \end{aligned}$$

Somit gilt:

$$\begin{aligned} W_{\text{pl}} &= W|_{s=0}^{s_{\text{stat}}} = E - E' = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v^2 - v'^2) \\ W_{\text{el}} &= -W|_{s_{\text{dyn}}}^{s_{\text{stat}}} = E' = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v'^2 \\ W_{\text{pl}} + W_{\text{el}} &= W|_{s=0}^{s_{\text{dyn}}} = E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 . \end{aligned}$$

Die kinetische Energie vor dem Stoß wird beim Aufprall in Verformungsenergie als Summe von plastischem und elastischem Energieanteil umgesetzt, siehe Abb. 4.26. Beim Rückprall wird der elastische Anteil der Verformungsenergie wieder in kinetische Energie verwandelt. Für die Stoßziffer folgt daraus:

$$\begin{aligned} k &= \frac{-v_{\text{Rückprall}}}{v_{\text{Aufprall}}} = -\frac{v'}{v} \\ &= \sqrt{\frac{E'}{E}} = \sqrt{\frac{W_{\text{el}}}{W_{\text{pl}} + W_{\text{el}}}} . \end{aligned}$$

4.6 Anwendungsbeispiele zur Kraftrechnung

4.6.1 Physikalisches Pendel

Für das physikalische Pendel nach Abb. 4.27 wird der Drallsatz einmal auf den Schwerpunkt und einmal auf den (körper- und raumfesten) Aufhängepunkt bezogen.

a) Bezugspunkt ist der Schwerpunkt S:

$$m \cdot \ddot{x}_S = F_x$$

$$m \cdot \ddot{y}_S = F_y - m \cdot g$$

$$\Theta_S \cdot \ddot{\varphi} = -F_x \cdot r_S \cdot \cos \varphi - F_y \cdot r_S \cdot \sin \varphi$$

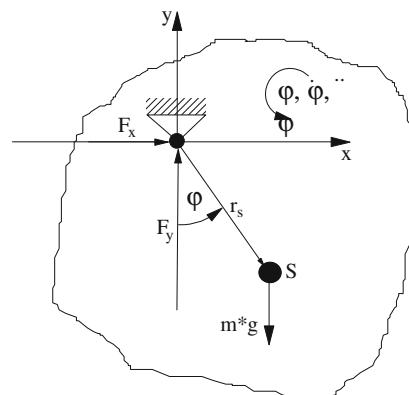
$$x_S = r_S \cdot \sin \varphi \quad \dot{x}_S = r_S \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi \quad \ddot{x}_S = r_S(\ddot{\varphi} \cdot \cos \varphi - \dot{\varphi}^2 \cdot \sin \varphi)$$

$$y_S = -r_S \cdot \cos \varphi \quad \dot{y}_S = r_S \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin \varphi \quad \ddot{y}_S = r_S(\ddot{\varphi} \cdot \sin \varphi + \dot{\varphi}^2 \cdot \cos \varphi)$$

$$\Theta_S = i^2 \cdot m \quad (\text{mit } i \text{ Trägheitsradius})$$

Durch Elimination der Auflagerkräfte F_x und F_y folgt die Bewegungsgleichung für das physikalische Pendel, vorzugsweise ausgedrückt in der Lagekoordinate φ . Einfacher und direkt können die Bewegungsgleichung gewonnen werden, wenn der Drallsatz auf den raum- und körperfesten Drehpunkt 0 bezogen wird:

Abb. 4.27 Physikalisches Pendel (Aufhängung und Schwerpunkt in der x - y -Ebene)



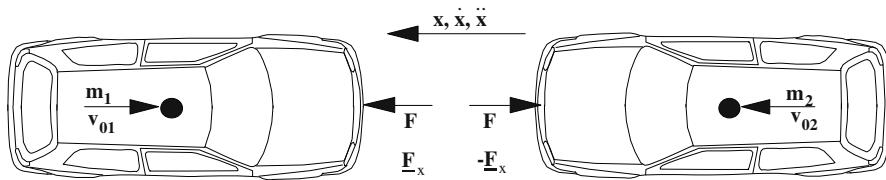


Abb. 4.28 Frontalkollision zweier Fahrzeuge (gerader, zentrischer Stoß)

b) Bezugspunkt ist der Aufhängepunkt 0:

$$m \cdot \ddot{x}_S = F_x$$

$$m \cdot \ddot{y}_S = F_y - m \cdot g$$

$$\Theta_0 \cdot \ddot{\varphi} = -m \cdot g \cdot r_S \cdot \sin \varphi \quad \text{mit } \Theta_0 = m \cdot (i^2 + r_S^2)$$

$$\ddot{\varphi} + \frac{r_S}{i^2 + r_S^2} \cdot g \cdot \sin \varphi = 0 .$$

Der Term

$$\frac{i^2 + r_S^2}{r_S}$$

wird „reduzierte Pendellänge“ l_R genannt, da die Gleichung

$$\ddot{\varphi} + \frac{g}{l_R} \cdot \sin \varphi = 0$$

die Bewegungsgleichung eines Fadenpendels der Länge l_R darstellt. Aus dem physikalischen Pendel ist damit ein mathematisches Pendel geworden: die gesamte Masse ist in einem Massenpunkt konzentriert und mit dem Drehpunkt durch einen masselosen Faden der Länge l_R verbunden.

Für den Stoß auf eine drehbar gelagerte ebene Scheibe folgt daraus: Wird eine Scheibe im Abstand l_R von ihrem Drehpunkt angestoßen, so erfährt ihr Aufhängepunkt keinen Reaktionsstoß. Den Anstoßpunkt, bei dem keine derartigen Reaktionskräfte auftreten, wird Stoßmittelpunkt genannt.

4.6.2 Frontalkollision zweier Fahrzeuge

Gegeben seien die Massen und die Einlaufgeschwindigkeiten zweier frontal kollidierender Fahrzeuge, siehe Abb. 4.28. Die Kraft-Weg-Kennungen der Frontstrukturen beider Fahrzeuge beim Wandaufprall mögen vollplastisch und linear mit den jeweiligen Steifigkeiten c_1 und c_2 verlaufen.

a) Berechnung der Steifigkeiten:

Bei einem Wandaufprall mit einer Einlaufgeschwindigkeit von $v = v_{01}$ sei der zurückgelegte Weg $x = x_w$. Wird bei Annahme einer linearen Deformationskennung den Arbeitssatz angewendet, so ergibt sich

$$\frac{1}{2}m \cdot v_{01}^2 = \frac{1}{2}c_1 \cdot x_{1w}^2 .$$

Daraus ergeben sich für c_1 und c_2 der beiden Fahrzeuge:

$$c_1 = m_1 \cdot \frac{v_{01}^2}{x_{1w}^2} \quad c_2 = m_2 \cdot \frac{v_{02}^2}{x_{2w}^2} .$$

Da es sich bei der oben angenommenen Konstellation um eine Reihenschaltung zweier Steifigkeiten handelt, kann eine Ersatzsteifigkeit angenommen werden:

$$c_{ers} = \frac{c_1 \cdot c_2}{c_1 + c_2} .$$

b) Herleitung der Zeitverläufe für $x_1(t)$, $\dot{x}_1(t)$ und $\ddot{x}(t)$:

Nach Anwendung des Schnittprinzips, lässt sich das dynamische Kräftegleichgewicht an den beiden Fahrzeugen aufstellen:

Schwerpunktsatz, dynamisches Kräftegleichgewicht

$$m_1 \cdot \ddot{x}_1 - F = 0 \quad m_2 \cdot \ddot{x}_2 + F = 0$$

Stoffgesetz

$$F = c_{ers} \cdot (x_2 - x_1) .$$

Damit ergibt sich:

$$m_1 \cdot \ddot{x}_1 + c_{ers} \cdot x_1 - c_{ers} \cdot x_2 = 0$$

$$m_2 \cdot \ddot{x}_2 - c_{ers} \cdot x_1 + c_{ers} \cdot x_2 = 0 .$$

In Matrix-Form bedeutet das

$$\begin{vmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{vmatrix} \cdot \ddot{\underline{x}} + \begin{vmatrix} c_{ers} & -c_{ers} \\ -c_{ers} & c_{ers} \end{vmatrix} \cdot \underline{x} = \underline{0} ; \quad \underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} .$$

$$\underline{M} \cdot \ddot{\underline{x}} + \underline{C} \cdot \underline{x} = \underline{0} .$$

Wie zu erwarten, ergibt sich die Differenzialgleichungen eines Zweimassenschwingers. Diese gelten allerdings nur, solange an der Kontaktstelle Druckkräfte übertragen werden. Der Lösungsansatz für diese Differenzialgleichungen lautet:

$$\underline{x} = \underline{x}_0 \cdot e^{j\omega t} \quad \ddot{\underline{x}} = -\underline{x}_0 \cdot \omega^2 \cdot e^{j\omega t} .$$

Da keine äußeren Kräfte wirken, ergeben sich zwei homogene Gleichungen für die Bestimmung des Eigenvektors \underline{x}_0 . In Matrizenform:

$$(\underline{\underline{C}} - \omega^2 \cdot \underline{\underline{M}}) \cdot \underline{x}_0 = \underline{0} .$$

Dieses homogene Gleichungssystem hat nur dann eine nichttriviale Lösung, wenn die Koeffizientendeterminante zu Null wird.

$$|\underline{\underline{C}} - \omega^2 \cdot \underline{\underline{M}}| = 0 .$$

Die Eigenwerte sind dann

$$\omega_1^2 = 0 \quad \omega_2^2 = c_{\text{ers}} \frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2} = \frac{c_{\text{ers}}}{m_{\text{ers}}}$$

mit der Ersatzmasse

$$m_{\text{ers}} = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} .$$

Die zugehörigen Eigenvektoren bestimmen sich zu

$$(\underline{\underline{C}} - \omega_1^2 \cdot \underline{\underline{M}}) \cdot \underline{x}_{01} = \underline{0} \Rightarrow \underline{x}_{01} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$(\underline{\underline{C}} - \omega_2^2 \cdot \underline{\underline{M}}) \cdot \underline{x}_{02} = \underline{0} \Rightarrow \underline{x}_{02} = \begin{bmatrix} -m_2/m_1 \\ 1 \end{bmatrix} .$$

Die allgemeine Lösung der Differenzialgleichung lautet, siehe Abb. 4.29:

$$\underline{x} = \underline{x}_{01}(A_1 + B_1 \cdot t) + \underline{x}_{02}(A_2 \cdot \cos \omega_2 \cdot t + B_2 \cdot \sin \omega_2 \cdot t)$$

$$\dot{\underline{x}} = \underline{x}_{01} \cdot B_1 + \underline{x}_{02} \cdot (-A_2 \cdot \omega_2 \cdot \sin [\omega_2 \cdot t] + B_2 \cdot \omega_2 \cdot \cos [\omega_2 \cdot t]) .$$

Die Konstanten folgen aus den Anfangsbedingungen. Es ist zu beachten, dass die Beträge der gegebenen Anfangsgeschwindigkeiten v_{01} und v_{02} über das zugehörige Vorzeichen so einzusetzen sind, dass sich die reale Wirkungsrichtung ergibt. Es sei hier auf den Abschn. 4.8 verwiesen, in dem die Vorzeichenfestlegung von gesuchten und gegebenen Größen unterschieden wird.

$$\begin{aligned} \underline{x}(t=0) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \dot{\underline{x}}(t=0) &= \begin{bmatrix} \dot{x}_{01} \\ \dot{x}_{02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -v_{01} \\ v_{02} \end{bmatrix} \\ A_1 = A_2 = 0 & & B_1 &= \frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot (-v_{01} - v_{02}) + v_{02} \\ & & B_2 &= -\frac{m_1}{m_1 + m_2} \cdot \frac{-v_{01} - v_{02}}{\omega_2} . \end{aligned}$$

Die allgemeine Lösung der Differenzialgleichungen ist also, siehe Abb. 4.29:

$$\begin{aligned}\underline{x}(t) &= \left[\frac{-m_1}{m_1 + m_2} \cdot (v_{01} + v_{02}) + v_{02} \right] \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot t \\ &\quad + \left[\frac{-m_1}{m_1 + m_2} \cdot \frac{v_{01} + v_{02}}{\omega_2} \right] \cdot \begin{bmatrix} m_2/m_1 \\ -1 \end{bmatrix} \cdot \sin [\omega_2 \cdot t] \\ \dot{\underline{x}}(t) &= \left[\frac{-m_1}{m_1 + m_2} \cdot (v_{01} + v_{02}) + v_{02} \right] \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \\ &\quad + \left[\frac{-m_1}{m_1 + m_2} \cdot (v_{01} + v_{02}) \right] \cdot \begin{bmatrix} m_2/m_1 \\ -1 \end{bmatrix} \cdot \cos [\omega_2 \cdot t] \\ \ddot{\underline{x}}(t) &= \left[\frac{-m_1}{m_1 + m_2} \cdot \omega_2 \cdot (v_{01} + v_{02}) \right] \cdot \begin{bmatrix} -m_2/m_1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \sin [\omega_2 \cdot t].\end{aligned}$$

($t_{E,p}$ = Ende der Stoßdauer bei vollplastischem Stoß)

c) Berechnung der Geschwindigkeitsänderungen und der maximalen Beschleunigungen:

$$\begin{aligned}\Delta v_1 &= v'_1 - (-v_{01}) = v_1(t_{E,p}) + v_{01} \\ \Delta v_2 &= v'_2 - v_{02} = v_2(t_{E,p}) - v_{02}\end{aligned}$$

1. Vollplastischer Stoß (Stoßdauer entspricht einem Viertel einer hypothetischen Vollschwingung)

$$\text{Stoßdauer: } t_{E,p} = \frac{T}{4} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m_{ers}}{c_{ers}}} = \frac{\pi}{2 \cdot \omega_2}$$

$$\Delta v_{1,p} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot (v_{01} - v_{02}) \quad (\text{positiv})$$

$$\Delta v_{2,p} = \frac{-m_1}{m_1 + m_2} \cdot (v_{01} - v_{02}) \quad (\text{negativ}).$$

2. Vollelastischer Stoß (Stoßdauer entspricht einer Hälfte einer hypothetischen Vollschwingung). Hier verdoppeln sich Stoßdauer und Geschwindigkeitsänderungen.

Stoßdauer:

$$t_{E,e} = \frac{T}{2} = \frac{\pi}{\omega_2}$$

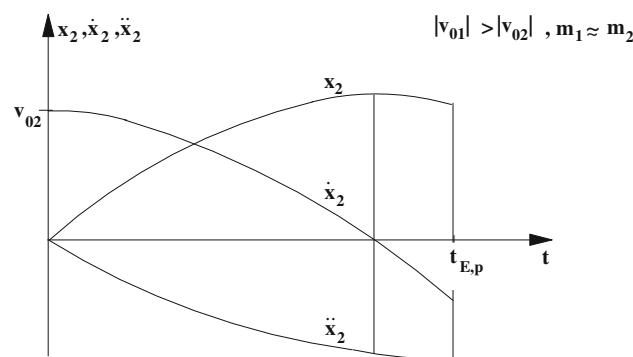
$$\Delta v_{1,e} = \frac{2 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot (v_{01} - v_{02}) \quad \Delta v_{2,e} = \frac{-2 \cdot m_1}{m_1 + m_2} \cdot (v_{01} - v_{02}).$$

- d) Verhältnis der Beschleunigungen:

$$\frac{\ddot{x}_1}{\ddot{x}_2} = -\frac{m_2}{m_1}.$$

Die Beschleunigungen verhalten sich umgekehrt proportional zu den Massen.

Abb. 4.29 Zeitlicher Verlauf für die Bewegungsgrößen von Fahrzeug 2 ($t_{E,p}$ = Ende der Stoßdauer bei vollplastischem Stoß)



e) Verhältnis der Geschwindigkeitsänderungen:

$$\frac{\Delta v_1}{\Delta v_2} = - \frac{m_2}{m_1}.$$

Die Verhältnisse von Beschleunigungen und Geschwindigkeitsänderungen gelten sowohl für die plastische als auch für die elastische Berechnung. Daraus folgt: Beschleunigungen und Geschwindigkeitsänderungen verhalten sich umgekehrt proportional zu den Massen. Bei einer Kollision erfährt also das leichtere Fahrzeug die höhere Verzögerung bzw. Geschwindigkeitsänderung und bei masseproportionalen Steifigkeiten die größeren Intrusionen und die größeren äußeren Deformationen. Damit sind die Insassen des kleineren Fahrzeuges den höheren Verzögerungen, Geschwindigkeitsänderungen, Kräften und Verletzungsrisiken ausgesetzt.

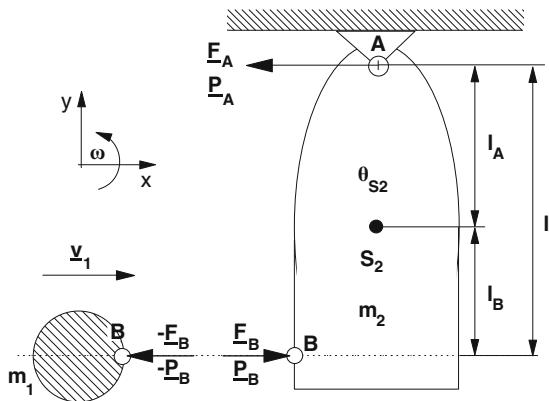
4.7 Anwendungsbeispiele zur Stoßrechnung

Vorauszuschicken ist hier, dass alle im Folgenden behandelten Beispiele im Sinne einer Vorwärtsrechnung (siehe Kap. 5) gehalten sind, d. h. dass die Kollisionsgeschwindigkeit als Eingangsgröße (Anfangsbedingung) vorgegeben wird und dass die Ausgangsgrößen nach dem Stoß gesucht werden. Angesichts der geschlossenen, formelmäßigen Lösungen kann leicht im Sinne einer Rückwärtsrechnung von den Ausgangs- auf die Eingangsgrößen geschlossen werden.

4.7.1 Exzentrischer Stoß gegen eine drehbar gelagerte Scheibe

Gegeben sei eine in A aufgehängte starre Scheibe mit der Masse m_2 , gegen die am Punkt B ein Massenpunkt der Masse m_1 mit der Geschwindigkeit v_1 stößt. Gesucht sind die Geschwindigkeiten nach dem Stoß, siehe Abb. 4.30.

Abb. 4.30 Exzentrischer Stoß gegen eine drehbar gelagerte Scheibe



Im vorliegenden Beispiel sind nur die Translation in x -Richtung und die Drehung ω_2 interessant, wenn vorausgesetzt wird, dass der Stoßantrieb in x -Richtung wirkt (Ergänzungshypothese nach Marquard). Die Stoßgleichungen lauten:

$$\begin{aligned} m_1 \cdot (v_{1x}' - v_{1x}) &= - \int F_B dt = -P_B \\ m_2 \cdot (v_{S2x}' - v_{S2x}) &= \int F_B dt - \int F_A dt = P_B - P_A \\ \Theta_{Az2} \cdot (\omega_2' - \omega_2) &= \int F_B \cdot (l_A + l_B) dt = P_B \cdot l . \end{aligned}$$

In y -Richtung wirkt kein Stoßantrieb und daher auch keine Auflagerkraft (Auflager-Stoßantrieb). Für das Trägheitsmoment gilt:

$$\Theta_{Az2} = \Theta_{Sz2} + m_2 \cdot l_A^2 .$$

Die Anfangsbedingungen sind:

$$v_{S2x} = 0 ; \quad \omega_2 = 0 ; \quad v_{1x} = v_1 .$$

Zusammenhang zwischen Translations- und Rotationsgeschwindigkeit:

$$v_{S2x}' = l_A \cdot \omega_2' .$$

Insgesamt sind drei Stoßgleichungen verfügbar bei vier verbleibenden Unbekannten:

$$v_{1x}' = v_1' , \omega_2' , P_A , P_B .$$

Die vierte Gleichung folgt aus der Stoßzahlhypothese:

$$k = -\frac{\omega_2' \cdot l - v_1'}{\omega_2 \cdot l - v_1} = \frac{\omega_2' \cdot l - v_1'}{v_1} .$$

Das führt zu dem folgenden Gleichungssystem:

v_1'	ω_2'	$P_{>A}$	P_B	=	1
m_1	0	0	1	=	$m_1 \cdot v_1$
0	$m_2 \cdot l_A$	1	-1	=	0
0	Θ_{Az2}	0	-1	=	0
-1	l	0	0	=	$k \cdot v_1$

Mit $l = l_A + l_B$ ergeben sich die folgenden Lösungen:

$$\begin{aligned}v_1' &= \frac{m_1 \cdot l^2 - k \cdot \Theta_{Az2}}{\Theta_{Az2} + m_1 \cdot l^2} \cdot v_1 \\ \omega_2' &= \frac{(1+k) \cdot m_1 \cdot l}{\Theta_{Az2} + m_1 \cdot l^2} \cdot v_1 \\ P_A &= \frac{(1+k) \cdot (\Theta_{Az2} - m_2 \cdot l \cdot l_A) \cdot m_1}{\Theta_{Az2} + m_1 \cdot l^2} \cdot v_1 \\ P_B &= \frac{(1+k) \cdot m_1 \cdot \Theta_{Az2}}{\Theta_{Az2} + m_1 \cdot l^2} \cdot v_1.\end{aligned}$$

Berechnung des Stoßmittelpunktes: Wenn der Stoßpunkt B zum Stoßmittelpunkt wird, so ist der Stoßimpuls in der Aufhängung $P_A = 0$.

$$(1+k) \cdot (\Theta_{Az2} - m_2 \cdot [l_A + l_B] \cdot l_A) \cdot m_1 = 0.$$

Damit ergibt sich für den Abstand des Stoßmittelpunktes B vom Aufhängepunkt A :

$$l = l_{AB} = \frac{\Theta_{Az2}}{m_2 \cdot l_A} > l_A = l_{AS}.$$

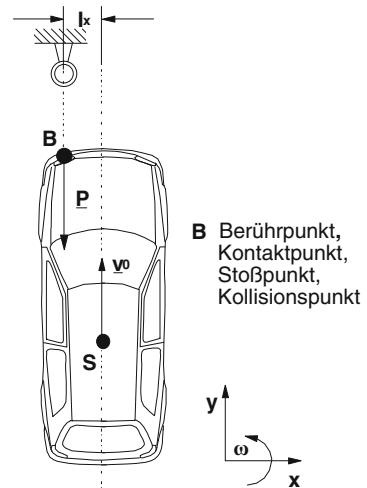
Beim Vergleich der Bewegungsgleichungen von mathematischen und physikalischen Pendel ist zu erkennen, dass die reduzierte Pendellänge des physikalischen Pendels gleich dem Abstand l_{AB} ist. Üblicherweise wird die reduzierte Pendellänge mit l_R bezeichnet, siehe Abschn. 4.6.1. Anschaulich bedeutet der Stoßmittelpunkt:

- Bei vorgegebenem Stoßmittelpunkt B entstehen keine Reaktionskräfte im Aufhängepunkt A , wenn die Fesselung im Abstand l_R von B erfolgt. Wird einen Hammer in A angefasst, so ergibt sich beim Schlag im Abstand l_R keinen Stoß in die Hand.
- Bei der freien, ungefesselten Scheibe würde sich A als Momentanpol der Drehbewegung einstellen.

Die maximale Höhenlage der Schwerpunktbewegung des Pendels liefert der Energiesatz:

$$\begin{aligned}\frac{1}{2} \cdot \Theta_{Az2} \cdot \omega_2'^2 &= m_2 \cdot g \cdot l_A \cdot (1 - \cos \alpha_{\max}) \\ \alpha_{\max} &= \arccos \left| 1 - \frac{\Theta_{Az2} \cdot \omega_2'^2}{2 \cdot m_2 \cdot g \cdot l_A} \right|.\end{aligned}$$

Abb. 4.31 Kollision Pkw-Baum: Betrachtung als gerader exzentrischer Stoß nach [Marquard 62]



Aus der Messung des Ausschlagwinkels α lässt sich damit über ω_2' auf die Geschwindigkeit der Masse m_1 schließen. Das ist das Prinzip des „ballistischen Pendels“.

4.7.2 Kollision Pkw-Baum

Gegeben:	m, Θ_S, v_0, k , Richtung des Stoßantriebes P , siehe Abb. 4.31
Annahme:	Stoßantrieb wirkt nur auf der y -Achse
Gesucht:	Bewegungszustand nach dem Stoß: v_{S_y}', ω'
Impulssatz (x -Richtung entfällt)	$m \cdot (v_{S_y}' - v_{S_y}) = -P$
Drehimpulssatz:	$\Theta_S \cdot (\omega_z' - \omega_z) = P \cdot l_x$
Stoßzahlhypothese:	$k = -\frac{(v_{S_y}' - \omega_z' \cdot l_x) - 0}{v_{S_y} - 0} = -\frac{v_{rel}'}{v_{rel}}$
Anfangsbedingungen:	$v_{Sx} = 0 \quad v_{Sy} = v_0 \quad w_z = 0$

Damit ergibt sich das folgende Gleichungssystem für v_{S_y}' , ω_z' und P :

	v_{S_y}'	ω_z'	P	=	1
I:	m	0	1	=	$m \cdot v_0$
II:	0	Θ_S	$-l_x$	=	0
III:	-1	l_x	0	=	$k \cdot v_0$
IV:	0	$l_x \cdot m$	1	=	$(1 + k) \cdot m \cdot v_0$
V:	0	$l_x^2 \cdot m + \Theta_S$	0	=	$(1 + k) \cdot l_x \cdot m \cdot v_0$

Rechenschritte für die Gleichungen IV und V: I + III $\cdot m$ IV $\cdot l_x$ + II

Aus diesem Gleichungsschema ermitteln sich die Lösungen zu:

$$\begin{aligned}\omega'_z &= \frac{(1+k) \cdot m \cdot l_x}{\Theta_S + m \cdot l_x^2} \cdot v_0 \quad (\text{immer positiv bei positivem } l_x) \\ v'_{sy} &= \frac{m \cdot l_x^2 - k \cdot \Theta_S}{\Theta_S + m \cdot l_x^2} \cdot v_0 \quad (\text{negativ bei kleinem } l_x \text{ und großem } k) \\ P &= \frac{(1+k) \cdot \Theta_S \cdot m}{\Theta_S + m \cdot l_x^2} \cdot v_0 \quad (\text{immer positiv}) .\end{aligned}$$

Aus der ersten Gleichung lässt sich durch Umstellung und durch Zuhilfenahme des Arbeitssatzes (siehe Abschn. 4.5.7) im Sinne einer Rückwärtsrechnung (siehe Abschn. 5.1.1) aus der Drehung $\varphi' = \varphi$ des Fahrzeuges nach der Kollision auf die Kollisionsgeschwindigkeit v_0 schließen:

$$v_0 = \frac{\Theta_S + m \cdot l_x^2}{(1+k) \cdot m \cdot l_x} \cdot \omega'_z \quad \omega'_z = \sqrt{\frac{mg\mu l_R \varphi}{\Theta_S}} .$$

Berechnung der kinetischen Energie nach dem Stoß:

$$E' = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v'_{sy}^2 + \frac{1}{2} \cdot \Theta_S \cdot \omega'_z^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 \cdot \frac{k^2 \cdot \Theta_S + m \cdot l_x^2}{\Theta_S + m \cdot l_x^2} .$$

Ermittlung der Deformationsenergie (Energieverlust):

$$W = E - E' = \frac{(1-k^2) \cdot \Theta_S \cdot m \cdot v_0^2}{2 \cdot (\Theta_S + m \cdot l_x^2)} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 \cdot (1-k^2) \cdot \tilde{\Theta}_{ers}$$

mit

$$\tilde{\Theta}_{ers} = \frac{\Theta_S}{\Theta_S + m \cdot l_x^2} .$$

Für $k = 0$ (vollplastischer Stoß) ergibt sich:

$$W = E - E' = \frac{\Theta_S \cdot m \cdot v_0^2}{2 \cdot (\Theta_S + m \cdot l_x^2)} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 \cdot \tilde{\Theta}_{ers} .$$

Für $k = 1$ (vollelastischer Stoß) ergibt sich:

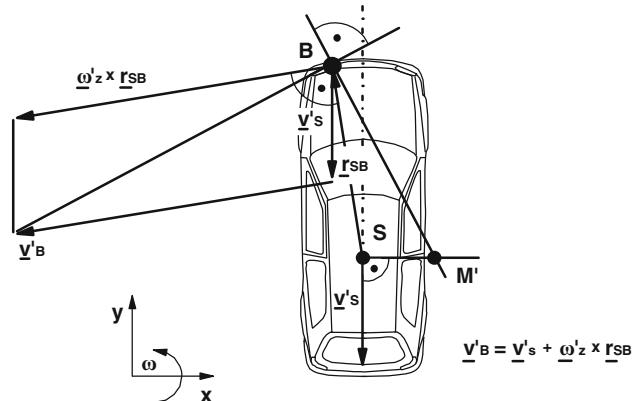
$$W = 0 \quad (E = E') .$$

In Tab. 4.1 sind Ergebnisse der Stoßrechnung dargestellt; dabei gilt näherungsweise:

$$\Theta_S = \left(\frac{l_R}{2}\right)^2 \cdot m .$$

Tab. 4.1 Stoßrechnung in Abhängigkeit verschiedener Eingangsgrößen

Eingangsparameter					Ausgangswerte		
l_R [m]	m [kg]	v_0 [m/s]	l_x [m]	k	v_{S_y}' [m/s]	ω' [1/s]	P [kg m/s]
2,0	1000	13	0,3	1	-10,85	7,16	23.850
2,0	1000	13	0,3	0	1,07	3,58	11.930
2,0	1000	13	0,3	0,1	-0,12	3,94	13.120
2,0	1000	20	0,3	0,1	-0,18	6,06	20.180
2,5	2000	13	0,3	0,1	-0,52	2,60	27.040
2,5	2000	13	0,5	0,1	0,67	3,95	24.660
2,5	2000	13	0,5	0,3	-1,57	4,66	29.140

Abb. 4.32 Konstruktion des Momentanpols bei einer Kollision Pkw-Baum nach der Hypothese Marquard (gerader exzentrischer Stoß)

Die grafische Konstruktion des Momentanpols M' der Geschwindigkeiten nach dem Stoß zeigt Abb. 4.32.

In der Realität wird der Baum bei B in die Fahrzeugstruktur eindringen, so dass sich das Fahrzeug nach dem Stoß um B dreht. Daher hat die Schwerpunktgeschwindigkeit nach dem Stoß auch eine Komponente in x -Richtung. Die Hypothese Marquards kann also für dieses Beispiel ungeeignet sein, da der Stoßantrieb nicht nur in y -Richtung wirkt. Die Abb. 4.33 zeigt das Beispiel Kollision Pkw-Baum mit der Annahme eines „tangential“ (in x -Richtung) verhakten Stoßes.

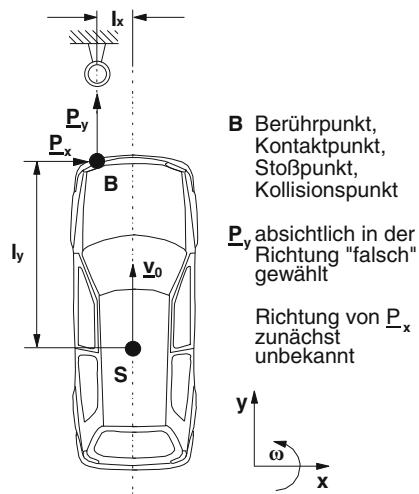
Gegeben: $m, \Theta_S, v_0, k, \omega = 0$,

Annahmen: Der Stoßantrieb hat auch eine Komponente in x -Richtung, k wirkt nur in y -Richtung,

Gesucht: Bewegungszustand nach dem Stoß, Komponenten des Stoßantriebes.

Abb. 4.33 Kollision Pkw-

Baum: B



Die Impulsgleichungen (Impulssatz, Drehimpulssatz), die Verhakungsgleichung und die Stoßzahlhypothese lauten:

$$\begin{aligned} m \cdot (v_{Sx}' - 0) &= P_x \\ m \cdot (v_{Sy}' - v_0) &= P_y \\ \Theta_S \cdot (\omega_z' - 0) &= -P_x \cdot l_y - P_y \cdot l_x \\ v_{Sx}' - \omega_z' \cdot l_y &= 0 \quad (\text{Verhakung in } x\text{-Richtung}) . \end{aligned}$$

Restitution wirke nur in y -Richtung:

$$k = -\frac{v_{By}' - v_{Pfahly}'}{v_{By} - v_{Pfahly}} = -\frac{(v_{Sy}' - \omega_z' \cdot l_x) - 0}{v_0 - 0} .$$

Damit ergibt sich das folgende Gleichungssystem:

	v_{Sx}'	v_{Sy}'	ω_z'	P_x	P_y	=	1
I	m	0	0	-1	0	=	0
II	0	m	0	0	-1	=	$m \cdot v_0$
III	0	0	Θ_S	l_y	l_x	=	0
IV	1	0	$-l_y$	0	0	=	0
V	0	-1	l_x	0	0	=	$k \cdot v_0$
VI	0	0	$l_y \cdot m$	-1	0	=	0
VII	0	0	$l_x \cdot m$	0	-1	=	$(1 + k) \cdot m \cdot v_0$
VIII	0	0	$l_x^2 \cdot m + \Theta_S$	l_y	0	=	$(1 + k) \cdot l_x \cdot m \cdot v_0$
IX	0	0	Θ_B	0	0	=	$(1 + k) \cdot l_x \cdot m \cdot v_0$

Satz von Steiner:

$$\Theta_B = \Theta_S + m \cdot (l_x^2 + l_y^2) .$$

Rechenschritte:

$$\text{VI: } I - IV \cdot m \quad \text{VII: } II + V \cdot m \quad \text{VIII: } III + VII \cdot l_x \quad \text{IX: } VIII + VI \cdot l_y .$$

Damit lauten die Lösungen:

$$\begin{aligned} v'_{Sx} &= \frac{(1+k) \cdot m \cdot l_x \cdot l_y}{\Theta_B} \cdot v_0 && (\text{positiv, solange } l_x \text{ und } l_y \text{ positiv}) \\ v'_{Sy} &= -k \cdot v_0 + \frac{m \cdot l_x^2}{\Theta_B} \cdot (1+k) \cdot v_0 && (\text{positiv oder negativ}) \\ \omega'_z &= \frac{(1+k) \cdot m \cdot l_x}{\Theta_B} \cdot v_0 && (\text{positiv, solange } l_x \text{ positiv}) \\ P_x &= \frac{(1+k) \cdot m \cdot l_x \cdot l_y}{\Theta_B} \cdot m \cdot v_0 && (\text{positiv für } l_x \text{ und } l_y \text{ positiv}) \\ P_y &= - \left(1 - \frac{m \cdot l_x^2}{\Theta_B} \right) \cdot (1+k) \cdot m \cdot v_0 && (\text{immer negativ}) . \end{aligned}$$

Auch hier lässt sich durch Umstellung der dritten Lösungsgleichung unter Ausnutzung des Arbeitssatzes (siehe Abschn. 4.5.7) im Sinne einer Rückwärtsrechnung allein vom Drehwinkel $\varphi' = \varphi$ auf die Kollisionsgeschwindigkeit v_0 schließen:

$$v_0 = \frac{\Theta_S + m \cdot (l_x^2 + l_y^2)}{(1+k) \cdot m \cdot l_x} \cdot \omega'_z \quad \omega'_z = \sqrt{\frac{mg\mu l_R \varphi}{\Theta_S}} .$$

Berechnung der kinetischen Energie nach dem Stoß:

$$E' = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 \cdot \left(\frac{m \cdot l_x^2}{\Theta_B} \cdot (1-k^2) + k^2 \right) .$$

Ermittlung der Deformationsenergie:

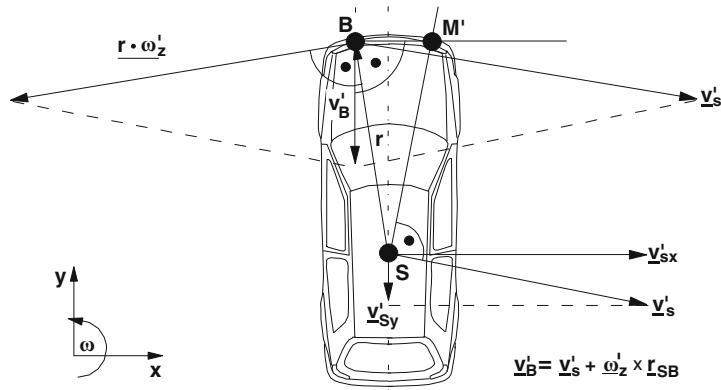
$$W = E - E' = \frac{(1-k^2) \cdot m \cdot v_0^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{m \cdot l_x^2}{\Theta_B} \right) .$$

In Tab. 4.2 werden beispielhaft Ausgangswerte der Stoßrechnung für unterschiedliche Eingangsparameter dargestellt.

Die grafische Konstruktion des Momentanpols M' der Geschwindigkeiten nach dem Stoß zeigt Abb. 4.34. Aus dem Vergleich der Ergebnisformeln und der Zahlenwerte in den Tabellen sowie der Lagen der Momentanpole M' kann erkannt werden, dass erhebliche

Tab. 4.2 Ergebnisse einer exemplarischen Stoßrechnung für verschiedene Parameter

Eingangsparameter						Ausgangswerte					
l_R [m]	m [kg]	v_0 [m/s]	l_y [m]	l_x [m]	k	v_{sx}' [m/s]	v_{sy}' [m/s]	ω' [1/s]	P_x [kgm/s]	P_y [kgm/s]	
2,0	1000	13	1,2	0,3	0	1,85	0,46	1,54	1850	-12.540	
2,0	1000	13	1,5	0,3	0,1	1,93	-0,92	1,28	1927	-13.910	
2,4	1000	13	1,5	0,5	0	2,63	0,88	1,75	2627	-12.920	
2,4	1000	13	1,5	0,5	1,0	5,25	-12,05	3,50	5254	-25.850	
2,4	1000	13	1,5	0,2	0,1	1,22	-1,22	0,81	1221	-15.020	
2,4	1000	20	1,5	0,5	0,1	4,12	-0,60	2,79	4188	-26.060	

**Abb. 4.34** Konstruktion des Momentanpols bei einer Kollision Pkw-Baum unter der Hypothese des tangential verhakten Stoßes

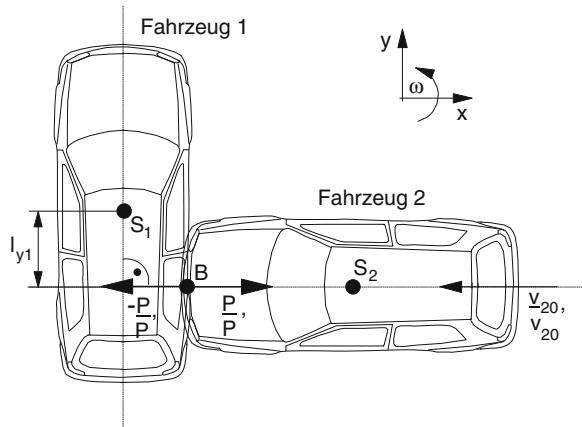
Unterschiede bestehen, wenn l_x größer wird. Dann ist die Hypothese von Marquard nicht mehr gerechtfertigt.

Zu den hier vorgeführten Beispielen ist noch einmal anzumerken, dass im Sinne der Vorwärtsrechnung (siehe Abschn. 5.1) die Eingangsgrößen bekannt bzw. vorgegeben sind und damit auf die Ausgangsgrößen geschlossen wird. Durch Umstellung der Ergebnisgleichungen kann im Sinne der Rückwärtsrechnung leicht von den dann gegebenen Größen (hier z. B. v_{sy}' , ω_z') auf die gesuchten Eingangsgrößen (i. a. v_0) geschlossen werden.

4.7.3 Pkw-Pkw-Seitenkollision

Es soll eine Seitenkollision untersucht werden, bei der das stoßende Fahrzeug unter einem Winkel von 90° mit der Front auf die Seite des stehenden Fahrzeugs trifft (siehe Abb. 4.35). Auf Grund dieser einfachen, aber nicht unrealistischen Voraussetzungen ist die Hypothese von Marquard berechtigt, mit der die Aufgabe analytisch gelöst werden kann.

Abb. 4.35 Pkw-Pkw-Seitenkollision (Stoß unter 90° auf ein stehendes Fahrzeug)



Gegeben: $m_1, m_2, \Theta_{S1}, l_{y1}, v_{10} = 0, v_{20}, \omega_{10} = \omega_{20} = 0, k$

Gesucht: Geschwindigkeitszustand beider Fahrzeuge nach dem Stoß

Annahme: Stoßantrieb wirkt in Fahrtrichtung von Fahrzeug 2 (Ergänzungshypothese nach Marquard)

Stoßgleichungen:

$$m_1 \cdot (v'_{S1x} - 0) = -P$$

$$m_1 \cdot (v'_{S1x} - 0) = 0$$

$$\Theta_{S1} \cdot (\omega'_1 - 0) = -P \cdot l_{y1}$$

$$m_2 \cdot (v'_{S2x} - (-v_{20})) = P$$

$$m_2 \cdot (v'_{S2y} - 0) = 0 \quad (\text{auch hier ist } v_{20} \text{ als Betrag positiv einzusetzen})$$

$$\Theta_{S2} \cdot (\omega'_2 - 0) = 0 .$$

Stoßzahlhypothese:

$$k = - \left(\frac{v'_{B1x} - v'_{B2x}}{v_{B1x} - v_{B2x}} \right) = - \frac{(v'_{S1x} + l_{y1} \cdot \omega'_1) - v'_{S2x}}{0 - (-v_{20})} .$$

Mit diesen sieben Gleichungen lassen sich der Stoßantrieb und die kinematischen Größen beider Fahrzeuge nach dem Stoß analytisch bestimmen:

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{(1+k) \cdot m_1}{\left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) + m_1 \cdot \frac{l_{y1}^2}{\Theta_{S1}}} \cdot v_{20} && \text{(immer positiv)} \\
 v'_{S1x} &= -\frac{P}{m_1} = -\frac{(1+k)}{\left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) + m_1 \cdot \frac{l_{y1}^2}{\Theta_{S1}}} \cdot v_{20} && \text{(immer negativ)} \\
 v'_{S1y} &= 0 \\
 \omega'_1 &= -\frac{P \cdot l_{y1}}{\Theta_{S1}} = -\frac{(1+k) \cdot m_1 \cdot l_{y1}}{\left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) \cdot \Theta_{S1} + m_1 \cdot l_{y1}^2} \cdot v_{20} && \text{(immer negativ)} \\
 v'_{S2x} &= \frac{P}{m_2} - v_{20} = -\frac{\left(1 - k \cdot \frac{m_1}{m_2}\right) + \frac{m_1 \cdot l_{y1}^2}{\Theta_{S1}}}{\left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) + \frac{m_1 \cdot l_{y1}^2}{\Theta_{S1}}} \cdot v_{20} && \text{(immer negativ)} \\
 v'_{S2y} &= 0 \\
 \omega'_2 &= 0 .
 \end{aligned}$$

Bei realen Unfällen sind über die Auslaufbewegungen und Endlagen die „Nach-Stoß-Größen“ v'_{S1x} , v'_{S2x} und/oder ω'_1 aus dem Arbeitssatz bekannt, so dass auf die Kollisionsgeschwindigkeit v_{20} aus den obigen Gleichungen geschlossen werden kann.

4.7.4 Pkw-Pkw-Offset-Frontalkollision

Ein häufiger Kollisionstyp bei Pkw-Pkw-Kollisionen ist die Offset-Frontalkollision (siehe Abb. 4.36). In der Sicherheitsentwicklung wird diesem Umstand dadurch Rechnung getragen, dass die Offset-Kollision gegen eine ortsfeste deformierbare Barriere mit 40 % Überdeckung heute zu den gesetzlich vorgeschriebenen Testbedingungen gehört.

Für die Berechnung wird angenommen, dass am Berührungsrandpunkt (Kollisionspunkt) B eine Verhakung stattfindet. Das ist realistisch, wenn die Überdeckung so groß ist (mehr als etwa 30 %), dass kein Abgleiten auftritt.

Annahme: Verhakungshypothese, Stoßziffer $k = 0$

Gegeben: $m_1, m_2, \Theta_{S1}, \Theta_{S2}, l_{x1}, l_{x2}, l_{y1}, l_{y2}, v_{10}, v_{20}$

Gesucht: Kinematik beider Fahrzeuge nach dem Stoß

Es ist zu beachten, dass in Abb. 4.36 die beiden Komponenten des Stoßantriebes grundsätzlich in beliebiger Richtung, aber unter Berücksichtigung von $actio = reactio$ eingetragen werden, denn Stoßkräfte sind Reaktionskräfte. Bei P_y handelt es sich sicherlich um Druckkräfte, also dürfte die Rechnung ergeben, dass P_y immer positiv ist. Bei P_x ist es anschaulich

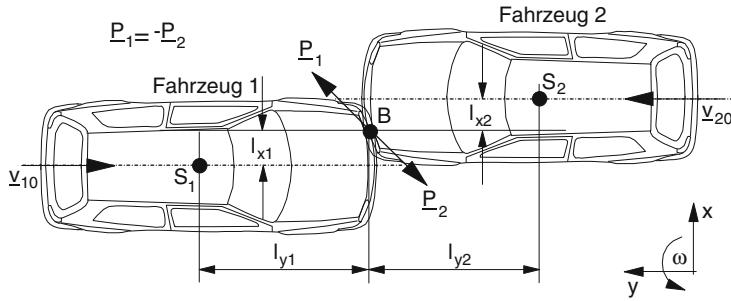


Abb. 4.36 Pkw-Pkw-Offset-Frontalkollision

nicht von vornherein klar, ob der eingetragene Richtungssinn sich auch physikalisch einstellt. Die Rechnung wird es zeigen. Das Koordinatensystem wird hier (aus didaktischen Gründen) anders gewählt als in den anderen Beispielen.

Impulssätze:

$$\begin{aligned} m_1 \cdot (v'_{S1x} - 0) &= P_x \\ m_1 \cdot (v'_{S1y} - (-v_{10})) &= P_y \\ m_2 \cdot (v'_{S2x} - 0) &= -P_x \\ m_2 \cdot (v'_{S2y} - v_{20}) &= -P_y . \end{aligned}$$

Drehimpulssätze:

$$\begin{aligned} \Theta_{S1} \cdot (\omega'_1 - 0) &= P_x \cdot l_{y1} + P_y \cdot l_{x1} \\ \Theta_{S2} \cdot (\omega'_2 - 0) &= P_x \cdot l_{y2} + P_y \cdot l_{x2} . \end{aligned}$$

Verhakungsbedingungen:

$$\begin{aligned} v'_{1Bx} &= v'_{2Bx} \Rightarrow v'_{S1x} + \omega'_1 \cdot l_{y1} = v'_{S2x} - \omega'_2 \cdot l_{y2} \\ v'_{1By} &= v'_{2By} \Rightarrow v'_{S1y} + \omega'_1 \cdot l_{x1} = v'_{S2y} - \omega'_2 \cdot l_{x2} . \end{aligned}$$

Im Folgenden wird, um die Ergebnisse analytisch darstellen zu können, von vollkommener Symmetrie ausgegangen. In Annäherung ist diese Symmetrie in der Unfallrealität durchaus nicht selten gegeben. Hier hat die Symmetrie den großen Vorteil, dass die Ergebnisse in einfacher Weise formelmäßig darstellbar und dadurch interpretierbar sind. Außerdem sind die Ergebnisse so für Annäherungsbetrachtungen brauchbar.

Symmetriebedingungen:

$$\begin{aligned} v'_{S1x} &= -v'_{S2x} l_{x1} = l_{x2} = l_x \\ v'_{S1y} &= -v'_{S2y} l_{y1} = l_{y2} = l_y \\ \omega'_1 &= \omega'_2 = \omega' m_1 = m_2 = m \\ v_{10} &= v_{20} = v_0 \Theta_{S1} = \Theta_{S2} = \Theta_S . \end{aligned}$$

Dadurch reduzieren sich die sechs Impulsgleichungen auf drei, da sie für jedes Fahrzeug die gleiche Aussage liefern. Es wird mit den Gleichungen von Fahrzeug 1 weitergerechnet.

$$\begin{aligned} m \cdot v'_{S1x} &= P_x \\ m \cdot (v'_{S1y} + v_0) &= P_y \\ \Theta_S \cdot \omega' &= P_x \cdot l_y + P_y \cdot l_x . \end{aligned}$$

Aus den Verhakungsbedingungen wird:

$$\begin{aligned} v'_{S1x} &= -\omega' \cdot l_y \Rightarrow v'_{Bx} = 0 \\ v'_{S1y} &= -\omega' \cdot l_x \Rightarrow v'_{By} = 0 . \end{aligned}$$

Der Stoßpunkt B bleibt also wegen der Symmetrie in Ruhe, er wirkt für beide Fahrzeuge als raumfester Drehpunkt. Damit ergibt sich das folgende Gleichungssystem:

Gleichung	v'_{S1x}	v'_{S1y}	ω'	P_x	P_y	=	1
I:	m	0	0	-1	0	=	0
II:	0	m	0	0	-1	=	$-mv_0$
III:	0	0	$-\Theta_S$	l_y	l_x	=	0
IV:	1	0	l_y	0	0	=	0
V:	0	1	l_x	0	0	=	0
I – IV $\cdot m \Rightarrow$ VI:	0	0	$-l_y \cdot m$	-1	0	=	0
II – V $\cdot m \Rightarrow$ VII:	0	0	$-l_x \cdot m$	0	-1	=	$-m \cdot v_0$
III + I \cdot VI \Rightarrow VIII:	0	0	$-(\Theta_S + l_y^2 \cdot m)$	0	l_x	=	0
VIII + II \cdot VII \Rightarrow IX:	0	0	$-(\Theta_S + l_y^2 \cdot m + l_x^2 \cdot m)$	0	0	=	$-l_x \cdot m \cdot v_0$

Es lassen sich folgende Ergebnisse ableiten:

$$\begin{aligned} v'_{S1x} &= -v'_{S2x} = -\frac{l_x \cdot l_y \cdot m}{\Theta_B} \cdot v_0 \quad (\text{negativ für } l_x \text{ und } l_y \text{ positiv}) \\ v'_{S1y} &= -v'_{S2y} = -\frac{l_x^2 \cdot m}{\Theta_B} \cdot v_0 \quad (\text{negativ für } l_x \text{ positiv}) \\ \omega'_1 &= \omega'_2 = \frac{l_x \cdot m}{\Theta_B} \cdot v_0 \quad (\text{positiv für } l_x \text{ positiv}) \\ P_x &= -\frac{l_x \cdot l_y \cdot m}{\Theta_B} \cdot m \cdot v_0 \quad (\text{negativ für } l_x \text{ und } l_y \text{ positiv}) \\ P_y &= \left(1 - \frac{l_x^2 \cdot m}{\Theta_B}\right) \cdot m \cdot v_0 \quad (\text{immer positiv}) . \end{aligned}$$

In den obigen Gleichungen gilt der Satz von Steiner:

$$\Theta_B = \Theta_S + (l_x^2 + l_y^2) \cdot m .$$

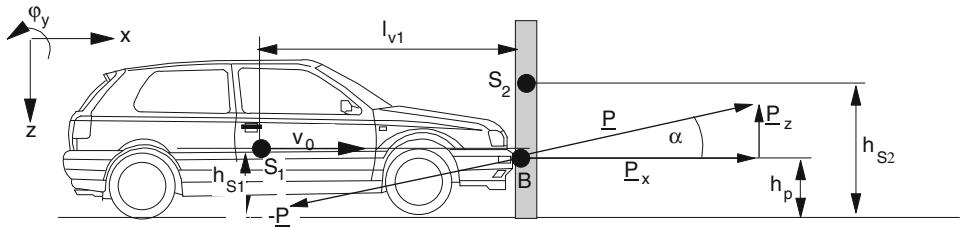


Abb. 4.37 Schematische Darstellung einer Kollision Pkw-Fußgänger

Auch hier lässt sich, wie bei der Baumkollision, allein aus dem Drehwinkel $\varphi' = \varphi$ auf die Kollisionsgeschwindigkeit v_0 schließen:

$$v_0 = \frac{\Theta_S + m \cdot (l_x^2 + l_y^2)}{m \cdot l_x} \cdot \omega'_z \quad \omega'_z = \sqrt{\frac{mg\mu l_R \varphi}{\Theta_S}}$$

Es zeigt sich also, dass, wie erwartet, P_y positiv wird. P_x ist immer negativ, wirkt also anders, als in Abb. 4.36 vorgegeben. Die Ergebnisse sind, abgesehen von Vorzeichenänderungen infolge anders gelegter Koordinaten, wie zu erwarten identisch mit den Ergebnissen des exzentrischen, verhakten Stoßes eines Pkw gegen einen Baum, siehe Abschn. 4.7.2, unter der Voraussetzung $k = 0$.

4.7.5 Kollision Pkw-Fußgänger

Annahme: Darstellung des Fußgängers als Starrkörper, siehe Abb. 4.37.

Gegeben: $m_1, m_2, \Theta_{S1}, \Theta_{S2}, h_p, h_{S2}, l_{v1}, v_0, \mu, \alpha, k, v_{S1z} = v_{S2z} = \omega_{1y} = \omega_{2y} = 0$.

Gesucht: $v'_{S1x}, v'_{S2x}, v'_{S1z}, v'_{S2z}, \omega'_{2y}, \Delta v_{S1}, \Delta v_{S2}$, Flugweite, Rutschweite.

Die Impulsgleichungen und die Ergänzungshypothesen lauten für diesen Fall:

$$\begin{aligned} m_1 \cdot (v'_{S1x} - v_{S1x}) &= -P_x \text{ mit } v_{S1x} = v_0 \\ m_1 \cdot (v'_{S1z} - v_{S1z}) &= P_z \\ \Theta_{S1} \cdot (\omega'_{1y} - \omega_{1y}) &= P_x \cdot (h_p - h_{S1}) - P_z \cdot l_{v1} \\ m_2 \cdot (v'_{S2x} - v_{S2x}) &= P_x \\ m_2 \cdot (v'_{S2z} - v_{S2z}) &= -P_z \\ \Theta_{S2} \cdot (\omega'_{2y} - \omega_{2y}) &= P_x \cdot (h_{S2} - h_p) \\ k &= -\frac{v'_{relBn}}{v_{relBn}} = k \{ v'_{S1x}, v'_{S2x}, v'_{S1z}, v'_{S2z}, \omega'_{1y}, \omega'_{2y}, v_0, \alpha \}. \end{aligned}$$

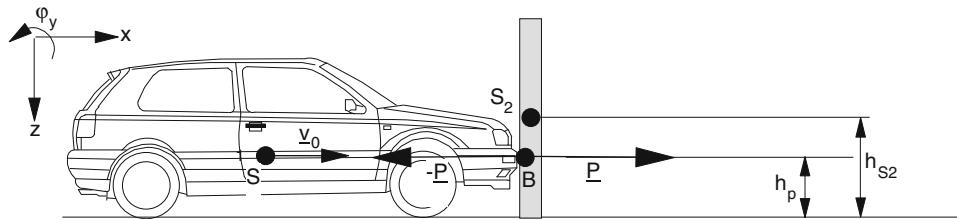


Abb. 4.38 Schematische Darstellung für die vereinfachte Stoßrechnung einer Kollision Pkw/Fußgänger (Hypothese Marquard)

Dabei soll n die Richtung des Stoßantriebes bedeuten. Somit stehen sieben Gleichungen für folgende acht Unbekannte zur Verfügung:

$$v'_{S1x}, v'_{S2x}, v'_{S1z}, v'_{S2z}, \omega'_{1y}, \omega'_{2y}, P_x, P_z .$$

Eine achte Gleichung könnte gewonnen werden, indem die Komponenten des Stoßantriebes in x - und z -Richtung durch Annahme des Winkels α verknüpft werden:

$$P_z = P_x \cdot \tan \alpha .$$

Die analytische Handhabung der Gleichungen ist schwierig, daher werden hier Vereinfachungen eingeführt, siehe Abb. 4.38.

Gegeben: $m_1, m_2, \Theta_{S2}, h_p, h_{S2}, v_0, \mu, k, \alpha = 0$.

Gesucht: $v'_{S1x}, v'_{S2x}, \omega'_{2y}, \Delta v_{S1}, \Delta v_{S2}$, Flugweite, Rutschweite.

Die Rechnung wird zunächst als Vorwärtsrechnung durchgeführt, sowohl im Bereich der Stoßgleichungen als auch im Bereich der kinematischen Betrachtungen („Auslaufbewegungen“). Für die vereinfachte Stoßrechnung gelten die Impulsgleichungen und die Stoßzahlgleichung:

$$\begin{aligned} m_1 \cdot (v'_{S1x} - v_{S1x}) &= -P \\ m_2 \cdot (v'_{S2x} - v_{S2x}) &= P \\ \Theta_{S2} \cdot (\omega'_{2y} - \omega_{2y}) &= P \cdot (h_{S2} - h_p) \\ k &= -\frac{v'_{S2x} - (v'_{S2x} + \omega'_{2y} \cdot (h_{S2} - h_p))}{v_{S1x} - 0} . \end{aligned}$$

Das sind vier Gleichungen für vier Unbekannte:

	v_{S1x}'	v_{S2x}'	ω_{2y}'	P	=	1
I	m_1	0	0	1	=	$m_1 \cdot v_{S1x}$
II	0	m_2	0	-1	=	0
III	0	0	Θ_{S2}	$h_p - h_{S2}$	=	0
IV	-1	1	$h_{S2} - h_p$	0	=	$k v_{S1x}$
V	0	m_1	$m_1 \cdot (h_{S2} - h_p)$	1	=	$v_{S1x} \cdot m_1 \cdot (1 + k)$
VI	0	0	$-m_2 \cdot (h_{S2} - h_p)$	$-1 - \frac{m_2}{m_1}$	=	$-v_{S1x} \cdot m_2 \cdot (1 + k)$

$$P \cdot \left(-(h_{S2} - h_p) - \left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right) \cdot \frac{\Theta_{S2}}{m_2 \cdot (h_{S2} - h_p)} \right) = -\frac{\Theta_{S2} \cdot v_{S1x} \cdot m_2 \cdot (1 + k)}{m_2 \cdot (h_{S2} - h_p)}$$

Mit $\Delta h = h_{S2} - h_p$, $\Theta_{S2} = i_{S2}^2 \cdot m_2$ und $v_{S1x} = v_0$

ergeben sich als Lösungen der auf den Stoßgleichungen beruhenden Vorwärtsrechnung:

$$P = \frac{(1 + k) \cdot m_2 \cdot v_0}{\left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right) + \left(\frac{\Delta h}{i_{S2}} \right)^2} \quad (\text{immer positiv})$$

$$\omega'_{2y} = \frac{(1 + k) \cdot \Delta h \cdot v_0}{\left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right) \cdot i_{S2}^2 + \Delta h^2} = \frac{P \cdot \Delta h}{\Theta_{S2}} \quad (\text{positiv für } \Delta h \text{ positiv})$$

$$v'_{S2x} = \frac{(1 + k) \cdot v_0}{\left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right) + \left(\frac{\Delta h}{i_{S2}} \right)^2} = \frac{P}{m_2} \quad (\text{immer positiv})$$

$$v'_{S1x} = v_0 \cdot \left(1 - \frac{(1 + k) \cdot \frac{m_2}{m_1}}{\left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right) + \left(\frac{\Delta h}{i_{S2}} \right)^2} \right) = v_0 - \frac{P}{m_1} \quad (\text{immer positiv})$$

$$\Delta v_{S1} = v'_{S1x} - v_0 = -\frac{P}{m_1}$$

$$\Delta v_{S2} = v'_{S2x} - v_{S2x} = \frac{P}{m_2}; \quad v_{S2x} = 0.$$

Die Geschwindigkeitsänderungen verhalten sich also umgekehrt proportional zu den Massen. Es ist zu beachten, dass die obigen Ergebnisgrößen stark von der Exzentrizität Δh abhängen. Beispielsweise halbieren sich nahezu die Abwurfgeschwindigkeit v_{S2x}' und der Stoßimpuls P , wenn Δh von Null (zentraler Stoß) auf i_{S2} anwächst, der Stoßpunkt also sehr tief liegt.

Es erfolgt nun, weiterhin im Sinne einer Vorwärtsrechnung, die Ermittlung der Wurfweite (Flug- und Rutschweite) aus kinematischen Betrachtungen, siehe Abb. 4.39.

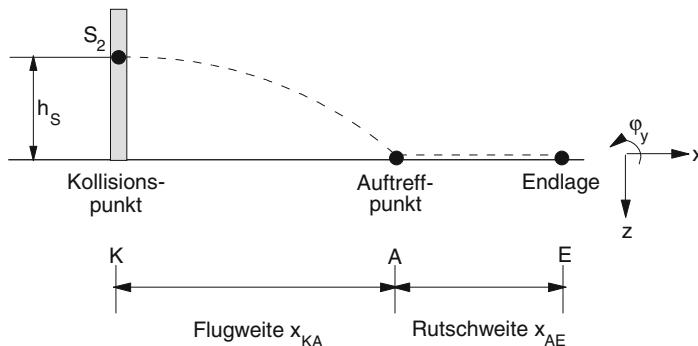


Abb. 4.39 Rückrechnung der Kollisionsgeschwindigkeit aus der Flug- und Rutschweite des Fußgängers (Voraussetzung: Stoßantrieb horizontal)

Freier Flug:

$$\ddot{z}_S = g \quad \dot{z}_S = g \cdot t \quad z_S = \frac{g \cdot t^2}{2} - h_S .$$

Aus $z_S = 0$ ergibt sich für die Flugzeit

$$t_{KA} = \sqrt{\frac{2 \cdot h_S}{g}}$$

$$\ddot{x}_S = 0 \quad \dot{x}_S = v'_{S2x} \quad x_S = v'_{S2x} \cdot t .$$

Aus $t = t_{KA}$ ergibt sich die Flugweite

$$x_{KA} = v'_{S2x} \sqrt{\frac{2 \cdot h_S}{g}}$$

Rutschen:

$$\ddot{x}_S = -\mu \cdot g \quad \dot{x}_S = -\mu \cdot g \cdot t + v'_{S2x} \quad x_S = -\frac{\mu \cdot g \cdot t^2}{2} + v'_{S2x} \cdot t .$$

Aus $\dot{x}_S = 0$ ergeben sich die Rutschzeit t_{AE} und die Rutschweite x_{AE} :

$$t_{AE} = \frac{v'_{S2x}}{\mu \cdot g} \quad x_{AE} = \frac{v'_{S2x}^2}{2 \cdot \mu \cdot g} .$$

Die Gesamtwurfweite x_{KE} folgt aus der Summe der Flugweite und der Rutschweite zu

$$x_{KE} = x_{KA} + x_{AE} \quad x_{KE} = v'_{S2x} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h_S}{g}} + \frac{v'_{S2x}^2}{2 \cdot \mu \cdot g}$$

(quadratische Gleichung für v'_{S2x} , wenn x_{KE} als gegeben angesehen wird).

Wird nun, was im Sinne der Unfallrekonstruktion realistischer ist, davon ausgegangen, dass die Kollisionsgeschwindigkeit v_0 nicht eine vorgegebene, sondern die gesuchte Größe ist, und dass die Wurfweite x_{KE} nicht eine gesuchte, sondern eine gegebene Größe ist, so sind die obigen Gleichungen im Sinne einer Rückwärtsrechnung zu behandeln:

$$v'_{S2x} = -\sqrt{2 \cdot \mu^2 \cdot g \cdot h_S} + \sqrt{2 \cdot \mu \cdot g \cdot (x_{KE} + \mu \cdot h_S)}$$

$$v_0 = \left(\left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right) + \left(\frac{\Delta h}{i_{S2}} \right)^2 \right) \cdot \frac{v'_{S2x}}{(1+k)}$$

Diese Rückwärtsrechnung entspricht der Ermittlung der Kollisionsgeschwindigkeit aus den bekannten, durch Experimente mit Dummys oder durch Unfallanalyse ermittelten Wurfparabeln. Eine Kontrollmöglichkeit für v_0 besteht außerdem dann, wenn die Blockier-spurlängen bzw. Vollbremslängen bekannt sind.

Angesichts der vereinfachten Annahmen (starrer Pfahl, horizontaler Stoß u. a.) sollte nicht erwartet werden, dass die Gleichungen numerische Ergebnisse bieten, die einer sorgfältigen Unfallrekonstruktion genügen. Der Wert der Gleichungen liegt vielmehr in ihrer didaktischen Logik und ihrer qualitativen Deutung. Trotzdem soll für ein Beispiel der Verkehrsunfallforschung Hannover aus der Wurfweite und anderen vorgegebenen Daten rechnerisch auf die Kollisionsgeschwindigkeit geschlossen werden. Ein Vergleich mit den Ergebnissen aus Wurfparabeln und Vollverzögerungswegen schließt sich an.

Die Unfalldaten sind:

Fahrzeugmasse	$m_1 = 1087 \text{ kg}$
Fußgängergewicht	$m_2 = 79 \text{ kg}$
Fußgängergröße	1,74 m
Schwerpunktthöhe (angenommen)	$h_{S2} = 0,87 \text{ m}$
Stoßhöhe (angenommen unter Berücksichtigung des Aufschöpfens)	$h_p = 0,70 \text{ m}$
Trägheitsradius ($\frac{1}{\sqrt{12}} \cdot 1,74 \text{ m}$)	$i_{S2} \approx 0,50 \text{ m}$
Vollbremsverzögerung des Pkw (ermittelt durch Nachfahren)	$\approx 8,9 \text{ m/s}^2$
Vollbremsweg des Pkw	13,3 m
Wurfweite des Fußgängers	$x_{KE} = 16,4 \text{ m}$
Reibwert des Fußgängers (angenommen)	$\approx 1,1$
Stoßziffer (angenommen)	$k = 0$

Mit den am Unfallort vorgefundenen und den angenommenen Daten ergibt die Rückwärtsrechnung:

$$\begin{aligned}v_{S2x}' &= 14,81 \text{ m/s} \\v_0 &= 17,60 \text{ m/s} \\P &= 1169,99 \text{ kg m/s} \\{\omega_2}_y' &= 10,07 \text{ 1/s} \\v_{S1x}' &= 16,52 \text{ m/s} \\{\Delta v}_{S1} &= -1,08 \text{ m/s} \\{\Delta v}_{S2} &= 14,81 \text{ m/s}\end{aligned}$$

Aus den Wurfweitenparabeln, siehe Abb. 3.32 oder [Kühnel 80; Burg 81], lässt sich für eine Wurfweite von 16,4 m als Bereich der möglichen Kollisionsgeschwindigkeit ablesen:

$$v_{0\text{Wurfweite}} = 12 \text{ bis } 16 \text{ m/s} \quad (v_0 \text{ aus Wurfweite}) .$$

Der Vollbremsweg von 13,3 m ergibt bei einer Verzögerung von $8,9 \text{ m/s}^2$ für den Pkw eine Auslaufgeschwindigkeit (nach dem Stoß) von

$$v_{S1x\text{Bremsweg}}' = 15,39 \text{ m/s} \quad (v_{S1x}' \text{ aus Bremsweg}) .$$

Es ist zu erkennen, dass unter den hier offenbar günstig getroffenen Annahmen (z. B. h_p) die vereinfachte rechnerische Methode Ergebnisse liefert, die nicht sehr weit von den Werten abweichen, die bei konventioneller Unfallrekonstruktion erhalten werden. Angemerkt sei ferner, dass die Angabe der Zahlenwerte mit mehreren Dezimalstellen der inneren Konsistenz und Nachvollziehbarkeit dient, in Wirklichkeit sind die Zahlen zu runden.

Abschließend sollen die Voraussetzungen für die Anwendbarkeit der Stoßtheorie überprüft werden (siehe Abschn. 4.4.2).

Die Stoßdauer ist sehr kurz: Die Kollisionsphase beim Fußgängerunfall ist deutlich länger ausgeprägt, als dies beim Pkw-Pkw-Anprall der Fall ist. Hilfreich könnten die Kollisionsphase jedoch in mehrere Stöße aufgeteilt werden.

Alle äußeren Kräfte sind gegenüber der Stoßkraft sehr klein: Unter Beachtung der Fahrzeugmasse und Fahrzeugverzögerung ergibt sich die Bremskraft zu knapp 10 kN. Unter den überschätzenden Annahmen, dass ein Fußgänger 100 kg wiegt und mit einer mittleren Beschleunigung von 1000 m/s^2 beaufschlagt wird ergibt sich ein „Stoßkraft“ von ebenfalls 10 kN. Hierbei sind die äußeren Kräfte weitestgehend gleich den Stoßkräften und die Stoßtheorie lässt sich theoretisch nicht anwenden. Das obige Beispiel zeigt jedoch, dass das Ergebnis trotzdem nachvollziehbar ist.

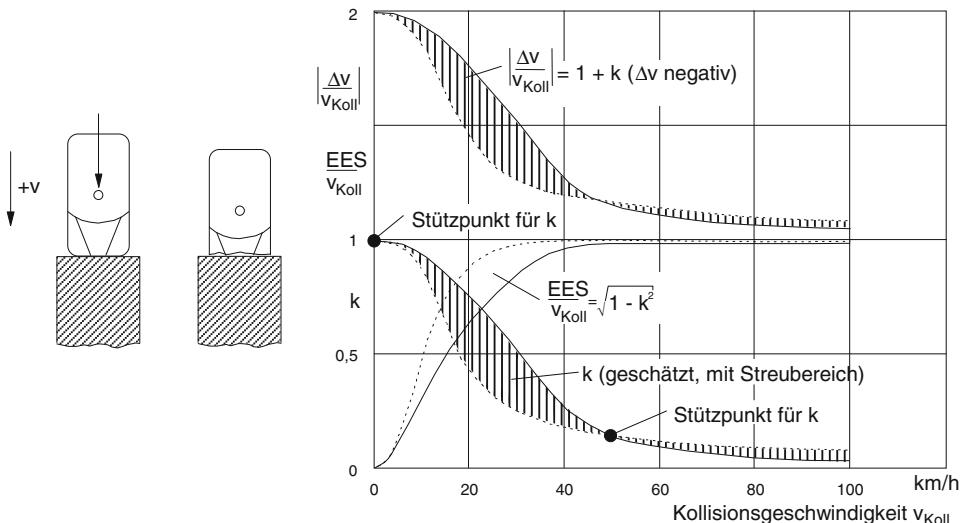


Abb. 4.40 Verlauf von k , Δv und EES beim Aufprall eines Pkw auf eine OUB bei voller Überdeckung in Abhängigkeit von der Kollisionsgeschwindigkeit

4.7.6 Frontalaufprall ohne und mit Abgleiten, Einfluss auf Geschwindigkeitsänderung und Energieabsorption

In Abschn. 4.2.1 wurde nachgewiesen, dass bei Kollisionen mit voller Überdeckung der Restitutionskoeffizient k für die Unterschiede zwischen den Unfallschweren Δv und EES ursächlich ist. Besonders deutlich wird das bei „low speed collisions“ mit der OUB, bei denen sich die Struktur noch völlig elastisch verhält. Hier ist Δv gleich der doppelten Aufprallgeschwindigkeit, EES dagegen Null. Abbildung 4.40 zeigt, wie sich mit zunehmender Kollisionsgeschwindigkeit (k wird kleiner) die Geschwindigkeiten Δv und EES einander annähern. Maßgeblich für die Verläufe im Annäherungsbereich ist der Restitutionskoeffizient, für den ein plausibler Verlauf mit Ober- und Untergrenze angenommen wurde. Dabei werden vier gesicherte Aussagen aus Crashversuchen bzw. -berechnungen als Stützen herangezogen, siehe Abb. 4.15:

- bei $v_{\text{Koll}} = 0$ ist $k = 1$ (elastischer Aufprall),
- $v_{\text{Koll}} = 0$ ist die Steigung von k gleich Null (elastischer Stoß auch bei sehr kleiner v_{Koll}),
- bei $v_{\text{Koll}} = 50 \text{ km/h}$ ist k etwa 0,1 bis 0,15 (aus Crashversuchen, siehe Abb. 4.8),
- bei großer Kollisionsgeschwindigkeit v_{Koll} wird der Stoß zunehmend plastisch, d.h. $k = 0$.

Große Unterschiede zwischen Δv und EES kann es bei Offset-Kollisionen mit einem paradoxen Ergebnis für die Insassenbelastungen geben. Bei starkem Offset (weniger als

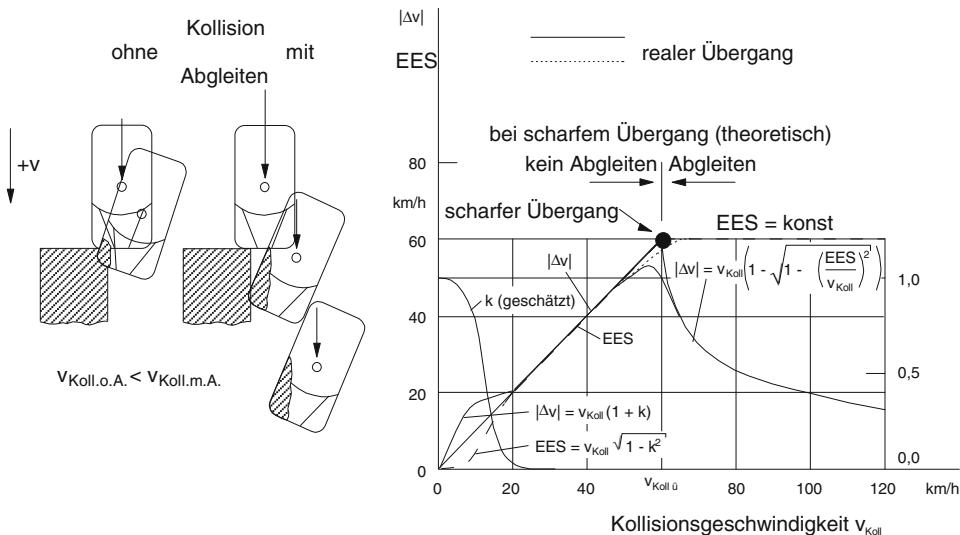


Abb. 4.41 Verlauf von k , Δv und EES beim Offset-Aufprall auf eine OUB bei kleiner Überdeckung in Abhängigkeit von der Kollisionsgeschwindigkeit unter der Annahme eines scharfen und eines realen Überganges vom Nichtabgleiten zum Abgleiten. Qualitative Darstellung in Anlehnung an [Burg 80/2, 84; Berg 99]

etwa 25 %) ist zu erwarten, dass mit zunehmender Kollisionsgeschwindigkeit der Restitutionskoeffizient steiler als beim Aufprall mit voller Überdeckung abfällt, siehe Abb. 4.41. Außerdem ist zu erwarten, dass in einem gewissen Geschwindigkeitsbereich der Übergang vom Nichtabgleiten zum Abgleiten stattfindet. Unter den idealisierenden Vorstellungen eines scharfen Überganges bei $v_{\text{Koll ü}}$ und – diese Annahme ist durchaus realistisch – eines bei höheren Kollisionsgeschwindigkeiten konstanten Deformationsbildes zeigt sich, dass EES konstant bleibt, während Δv mit zunehmender Kollisionsgeschwindigkeit kleiner wird, siehe Abb. 4.41. Wenn die von den Intrusionen ausgehende Verletzungsgefahr für Extremitäten angesichts des gleichen Deformationsbildes als konstant angesehen wird, bedeutet das, dass die Gefährdung und die Belastung für die Fahrzeuginsassen umso kleiner ist, je größer die Kollisionsgeschwindigkeit ist. Dieses, auf den ersten Blick paradoxe Ergebnis wird die Ursache dafür sein, dass bei manchen Katastrophen-Unfällen die Insassen mit geringen Verletzungen davonkommen, bei manchen Kollisionen trotz mäßiger Deformationen wegen eines größeren Δv schon schwere Verletzungen auftreten.

Sehr anschaulich lässt sich der Zusammenhang von abnehmender Geschwindigkeitsänderung bei steigender Kollisionsgeschwindigkeit, konstante Energiedifferenz vorausgesetzt, in der Auftragung von Abb. 4.42 nachvollziehen. Ursache ist der quadratische Anstieg der kinetischen Energie mit der Kollisionsgeschwindigkeit.

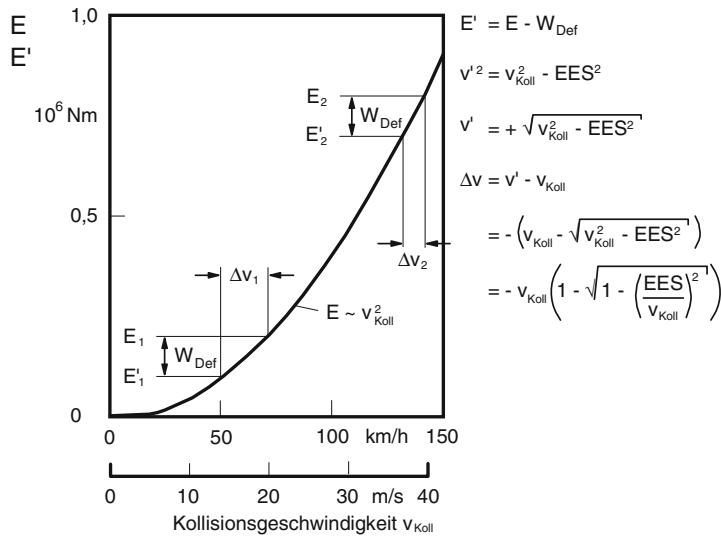


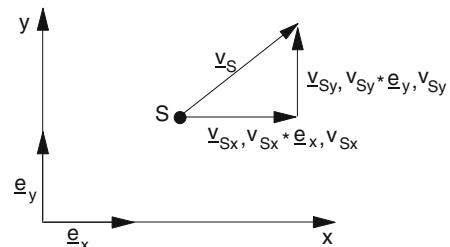
Abb. 4.42 Abnehmende Geschwindigkeitsänderung Δv bei höherer Kollisionsgeschwindigkeit v_{Koll} unter der Voraussetzung gleichen Energieverlustes W_{Def} beim Offset-Aufprall auf eine OUB

4.8 Festlegung der Unbekannten in Ersatzsystemen

Anhand der Abb. 4.23 und 4.36 soll auf ein grundlegendes Problem hingewiesen werden, das bisher übergangen wurde [Gummert 86]. Wie werden unbekannte Größen (hier Geschwindigkeiten und Stoßantriebe) in den Ersatzsystemen festgelegt? Sind sie negativ, wenn sie in anderer Richtung als die der positiven Koordinate angesetzt werden? Ist zwischen Skalaren und Vektoren zu unterscheiden? Am einfachsten ist die Erklärung über die Einheitsvektoren, die in Richtung der gewählten Lagekoordinaten zeigen und die Länge Eins haben, siehe Abb. 4.43.

Es genügt, die Faktoren v_{Sx} , v_{Sy} als Komponenten anzugeben, ihre Richtung wird durch die Pfeile festgelegt. Ergibt die Rechnung negative Werte für die Komponenten, dreht sich die Wirkrichtung um. Die gleichen Beziehungen könnten bei einem um 180° gedrehten

Abb. 4.43 Lagekoordinaten, Einheitsvektoren, Komponenten eines (unbekannten) Geschwindigkeitsvektors



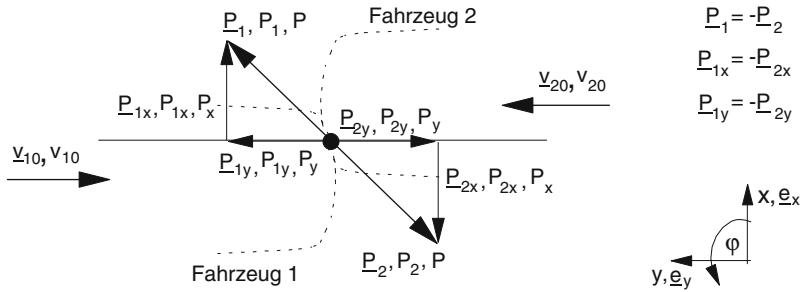


Abb. 4.44 Benennungen der Stoßantriebe und ihrer Komponenten im Ersatzsystem von Abb. 4.36

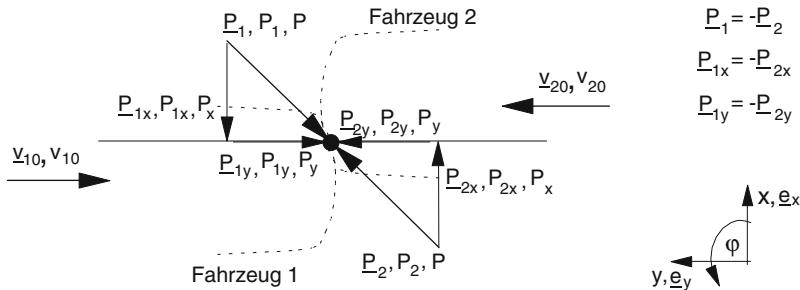


Abb. 4.45 Umgekehrte Vorgaben für die Richtungen der Stoßantriebe im Vergleich zu Abb. 4.36 und 4.44

Koordinatensystem beibehalten werden, nur dass dann gilt:

$$v_{Sx} = v_{Sx}(-\underline{e}_x), \quad v_{Sy} = v_{Sy}(-\underline{e}_y)$$

und dass hier v_{Sx} und v_{Sy} ein entgegengesetzte Vorzeichen haben werden, um die gleichen Wirkrichtungen wie im Abb. 4.43 zu erzielen.

Stoßantriebe wirken auf die kollidierenden Fahrzeuge entgegengesetzt gleich, siehe z. B. Abb. 4.23 und 4.36. Wie wird hier die Richtungen und Bezeichnungen der unbekannten Stoßantriebe und ihrer Komponenten festgelegt, nachdem ein Koordinatensystem gewählt wurde? Zunächst wird die Lage eines der beiden Stoßantriebe frei gewählt, z. B. wie in Abb. 4.44 oder 4.45. Die Bezeichnung der Komponenten P_x und P_y besagt, dass sie auf der x - und y -Achse liegen, die Richtungen werden durch die eingetragenen Pfeile – natürlich unter Beachtung von $actio = reactio$ – vorgegeben. Zeigt die Rechnung negative Werte für P_x und/oder P_y , so wirken sie real den eingezeichneten Richtungen entgegen. Ob gemäß dem Ersatzsystem von Abb. 4.44 oder 4.45 gerechnet wird, ist nicht von Belang, beides ist richtig. Nur muss jeweils durchgehend mit dem jeweiligen Ersatzsystem gearbeitet werden. Die Ergebnisse müssen für die beiden Ersatzsysteme unterschiedliche Vorzeichen aufweisen.

Gegebene Größen sind unbedingt so in die Rechnung einzuführen, wie sie physikalisch real wirken. So gilt z. B. für die Anfangsgeschwindigkeit von Fahrzeug 1 im Abb. 4.36:

$$\underline{v}_{S1y} = v_{10} \cdot (-\underline{e}_y) = -v_{10} \cdot \underline{e}_y .$$

In die Rechnung ist also v_{10} (Betrag positiv) mit negativem Vorzeichen einzuführen, d. h. die Anfangsgeschwindigkeit wirkt nach rechts entgegen der Richtung von y .

Unfallrekonstruktion

5

Der Ablauf einer technischen Unfallrekonstruktion kann systemanalytisch gedeutet werden als Prozess, bei dem Eingangsgrößen auf einen Verarbeitungsprozess (Rekonstruktionsverfahren) wirken und Ausgangsgrößen erzeugen, siehe Abb. 5.1 [Appel 84/1]. Die Eingangsgrößen für eine technische Unfallrekonstruktion lassen sich in allgemein gültige Daten (Grunddaten) und zu dem spezifischen Unfall gehörende Daten (Spuren) unterteilen. Diese setzen sich aus objektiven Daten (sog. Anknüpfungstatsachen) und subjektiven Daten (Aussagen) zusammen, siehe Abb. 5.1.

Die Eingangsgrößen für eine technische Unfallrekonstruktion lassen sich in unfallspezifische und grundlegende Daten unterscheiden, siehe Abschn. 3.3. Zu den ersten gehören objektiv nachweisbare Spuren vom „Unfallgut“ (Fahrzeuge, Verletzte, Hindernisse) und vom Unfallort (Kollisionsort, Endlagen, Wetter, Straßenbelag, Einsehbarkeit u. a.) sowie subjektive Daten wie die Aussagen von Beteiligten oder Zeugen. Die Grundlagen bzw.

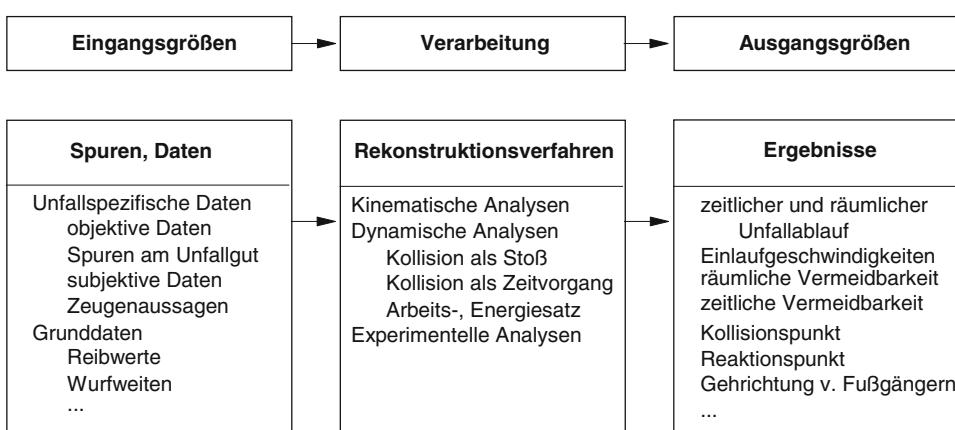


Abb. 5.1 Eingangs- und Ausgangsgrößen bei der technischen Unfallrekonstruktion

Grunddaten sind allgemeingültige Daten (Wurfweiten, Reibwerte, Deformationskennungen u. ä.), die im Rahmen der Unfall- und Sicherheitsforschung erarbeitet wurden, deren Anwendbarkeit in jedem spezifischen Fall aber neu zu hinterfragen ist.

Die in den Abschn. 5.4 und 5.5 erläuterten Rekonstruktionsverfahren beziehen sich ausschließlich auf Pkw-Kollisionen, die gewählten Beispiele können als typische Beispiele angesehen werden [Appel 84/4].

5.1 Unfallrekonstruktionsverfahren

Mit zunehmender Motorisierung und mit steigenden Unfallzahlen stieg in den sechziger Jahren das Interesse und die Notwendigkeit für aussagekräftige Rekonstruktionsverfahren. Verschiedene Verfahren wurden für verschiedene Unfall- und Kollisionstypen, für verschiedene Unfall- und Kollisionsarten mit unterschiedlichen Fragestellungen, Voraussetzungen und Annahmen entwickelt. Eine schematische, rezeptartige Anwendung der einzelnen Verfahren ist nicht möglich bzw. nicht sinnvoll, vielmehr ist fallbezogen vorzugehen, um mit minimalem Aufwand ein jeweils angemessenes Ergebnis zu erzielen.

Im Mittelpunkt der Unfallrekonstruktion stehen die Kollisionsanalysen, umgeben von kinematischen Einlauf- und Auslaufanalysen. Alle die Dynamik einer Kollision betreffenden Verfahren der Unfallrekonstruktion können nach vier Merkmalen unterteilt werden, siehe Abb. 5.2:

- Art des Ersatzsystems (z. B. Massenpunkt)
- Art der mathematischen Behandlung (z. B. grafisch)
- Art der Kollisionsanalyse (z. B. als Stoß-Vorgang)
- Art des Rekonstruktionsablaufes (z. B. Rückwärts-Unfallrekonstruktion).

Dynamische Kollisionsanalysen beruhen, unabhängig von weiteren Ausprägungen nach Abb. 5.2, auf den beiden grundsätzlichen Methoden der klassischen Mechanik, siehe z. B. [Szabo 66, 72], formuliert als:

- Stoßgleichungen für den Stoß-Vorgang der Kollision (Impulssatz, Drehimpulssatz, Zusatzhypthesen) oder
- Kraftgleichungen für den Zeit-Vorgang der Kollision (Schwerpunktsatz, Drallsatz, Stoffgesetze).

Bei der Betrachtung der Kollision als Stoß, also der Anwendung der **Stoßgleichungen**, werden die Kollisionskontrahenten als ein „Massensystem mit inneren Kräften“ betrachtet, wobei der über eine sehr kurze Stoßdauer auftretende Kraftvektor eine sprunghafte Veränderung der Massenimpulse verursacht. Grundlage dieser Methode sind die Annahmen, dass die Stoßkraft sehr groß, die Stoßzeit sehr klein, das zeitliche Integral der Stoßkraft, der Stoßantrieb, endlich ist. Der translatorische (nicht jedoch der rotatorische) Gesamtimpuls

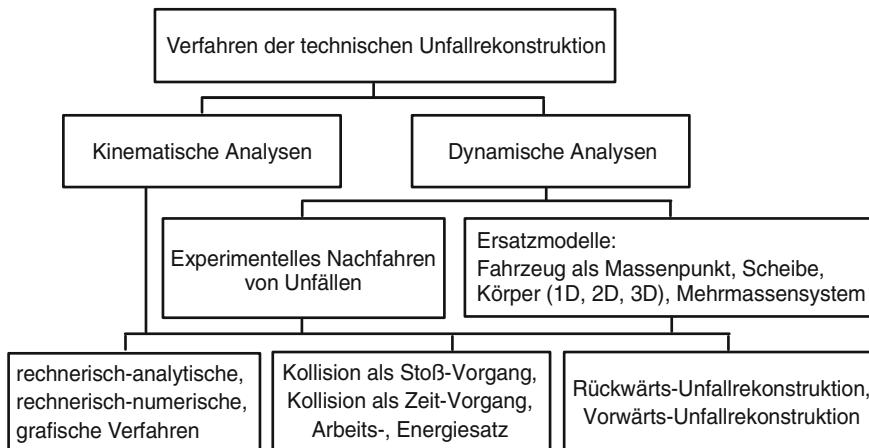


Abb. 5.2 Einteilung der Rekonstruktionsverfahren

bleibt während des Stoßes konstant. Die Stoßgleichungen sind Differenzialgleichungen erster Ordnung.

In der Praxis der Unfallrekonstruktion wird üblicherweise unter Benutzung eines ebenen, starren Scheibenmodells aus den Endlagen und den Auslaufbewegungen der Fahrzeuge über den Arbeitssatz auf die Kinematik direkt nach dem Stoß, dann z. B. über die Stoßgleichungen auf die Kinematik vor dem Stoß, auf die Einlaufimpulse und die Kollisionsgeschwindigkeiten und dann wiederum über Arbeitssatz und kinematische Betrachtungen auf die Einlaufgeschwindigkeiten geschlossen. Da hierbei von der Ausgangskinematik (z. B. Auslaufbewegung, Endlagen) auf die Eingangskinematik (z. B. Einlaufgeschwindigkeit) geschlossen wird, soll diese Vorgehensweise als „Rückwärts-Unfallrekonstruktion“ bezeichnet werden. Üblich ist auch der engere Begriff „**Rückwärtsrechnung**“, selbst wenn es sich um ein grafisches Verfahren handelt.

Bei der Anwendung der Kraftgleichungen (in der klassischen Mechanik „Bewegungsgleichungen“ genannt) werden die Differenzialgleichungen zweiter Ordnung unter kontinuierlicher Einbeziehung aller relevanten Kräfte analytisch (über Formeln) oder numerisch (über numerische Integration) im Zeitbereich gelöst. Relevante Größen der Einlaufkinematik (z. B. Einlaufgeschwindigkeiten) werden als Anfangsbedingungen im Bereich einer wahrscheinlichen Lösung vorgegeben. Grundlage dieser Rekonstruktionsmethode, die als „Vorwärts-Unfallrekonstruktion“ oder „**Vorwärtsrechnung**“ bezeichnet wird, ist die Aufstellung von angemessenen Ersatzmodellen für die beteiligten Fahrzeuge, Insassen oder Fußgänger sowie von geeigneten Kontaktmodellen. Gelingt die analytische Darstellung der Ergebnisse, lässt sich durch Umstellen der Eingangs- und Ausgangsgrößen leicht zwischen Vorwärts- und Rückwärts-Rekonstruktion wechseln. Die Ergebnisse eines Rechenlaufes (analytisch oder numerisch) können mit den vorhandenen Spurenzeichnungen auf der Straße und den Endlagen der Fahrzeuge verglichen werden. Üblicherweise muss ein erneu-

Tab. 5.1 Allgemeine Beschreibung von Unfallrekonstruktionsverfahren [Appel 94]

Verfahren	Eingangsgrößen	Bemerkungen
Stoßgleichungen	Kollisionsstellungen, Kollisionspunkt, -ort Auslaufimpulse (Größe, Richtung), Richtung Einlaufimpulse	Rückwärts-Rekonstruktion, rechnerisch-analytische Verfahren, grafische Verfahren, üblicherweise 2D
Stoßgleichungen	Siehe oben	Vorwärts-Rekonstruktion, rechnerisch-analytische Verfahren, 2D oder 3D
Kraftgleichungen (Bewegungsgleichungen)	Endstellungen, Einlaufbedingungen, Struktur-eigenschaften, Reifenkräfte	Vorwärts-Rekonstruktion, rechnerisch-analytisch für einfache Konstellationen, sonst rechnerisch-numerisch, iterativ arbeitend, 2D oder 3D
Arbeitssatz, Energiebilanz, Energieerhaltung	Deformationsarbeit (EES), Auslaufarbeit	Überschlägige Berechnungen, Ein- und Auslaufbewegungen, Zusatzbedingungen
Kinematische Analysen z. B. Weg-Zeit-Untersuchungen	Kollisionsort, Geschwindigkeiten, Verzögerungen, Topologie der Unfallörtlichkeit, 2D	Veranschaulichung der räumlichen und zeitlichen Zuordnung von Fahrzeugen und Umgebung, Vermeidbarkeitsanalysen, 2D, Vor- und Nachlauf für Kollisionsanalyse
z. B. Schrankenverfahren	Wurfweiten, Bremswege, Kollisionspunkt, Splitterfeld	Ermittlung der Anfahrgeschwindigkeit bei Pkw/Fußgänger-Kollisionen
Nachfahren von Unfällen in Versuchen	Fahrzeugschäden, Reifenspuren, Topologie der Unfallörtlichkeit, Wurfweiten	Aufwendiges Verfahren für Sonderfälle, bei Bagatellunfällen z. B. zur Frage der Bemerkbarkeit, Klärung von Sichtverhältnissen

ter Rechenlauf mit geänderten Annahmen (z. B. Stoßnormale beim Gleitstoß) und veränderten Eingangsdaten, insbesondere mit veränderter Einlaufgeschwindigkeit durchgeführt werden, bis eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den realen Auslaufbewegungen und Endlagen vorliegt.

In allgemeiner Weise sind die Rekonstruktionsverfahren in Tab. 5.1 unter Angabe der üblichen Eingangsgrößen und in Abb. 5.3 unter Angabe der Methoden und des Rekonstruktionsablaufes dargestellt. Festzuhalten ist, dass bei der Rückwärts-Unfallrekonstruktion rechnerisch-analytische oder grafische Verfahren, bei der Vorwärts-Unfallrekonstruktion rechnerisch-analytische oder rechnerisch-numerische Verfahren zur Anwendung kommen. Die rechnerisch-numerischen Verfahren laufen heute PC-gestützt mit Standard-Software ab, siehe Abschn. 5.3. Der Abschn. 5.4 behandelte generelle Anmerkungen zu den Rekonstruktionsverfahren. Der Abschn. 5.2 wird sich auf grafische Verfahren konzentrieren. Abschnitt 5.5 adressiert die Qualität der Unfallrekonstruktion.

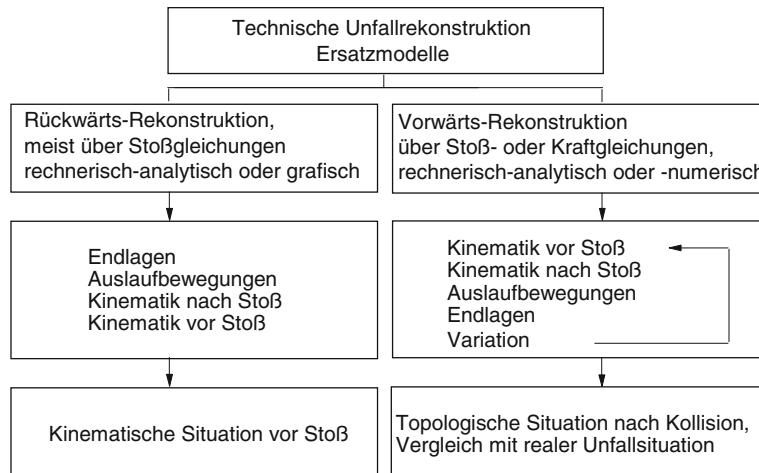


Abb. 5.3 Methoden und Abläufe bei der technischen Unfallrekonstruktion

5.1.1 Rückwärts-Unfallrekonstruktion, insbesondere Rückwärts-Kollisionsrekonstruktion

Die Rückwärts-Unfallrekonstruktion ist die klassische Art der Unfallrekonstruktion. Die oftmals in der Unfallpraxis vorliegenden Spuren lassen die Ermittlung des Kollisionsortes, der Auslaufimpulse nach Größe und Richtung und der Richtungen der Einlaufimpulse zu. Daraus kann unter Ausnutzung von *actio = reactio* der Stoßantriebe auf die Größe der Einlaufimpulse, d. h. auf die üblicherweise gesuchten Einlaufgeschwindigkeiten geschlossen werden [Slabar 73, Burg 99/1].

Bei der Rückwärts-Unfallrekonstruktion wird die Kollision in der als Regel Stoßvorgang behandelt. Die angewandten Stoßgleichungen und die davon abgeleiteten rechnerischen und grafischen Verfahren nutzen folgende Gesetze der Mechanik:

- Impulssatz (steht hier im Mittelpunkt, daher nur Kollisionen mit „schwacher“ Rotation behandelbar),
- Drehimpulssatz (dient „nur“ zur Kontrolle und evtl. Korrektur),
- Energiesatz (Auslaufenergien, evtl. Deformationsenergien),
- Zusatzhypthesen, Zusatzbedingungen (Impulsrichtungen, Stoßart, Stoßzahl, Deformationsenergien, ...).

Diese Gesetze werden auf die gewählten Ersatzmodelle der Kollisionskontrahenten angewandt. Die dabei notwendigen Daten sind:

- Kollisionsort (auf der Straße),
- Kollisionspunkt (am Fahrzeug), Kollisionsstellung,

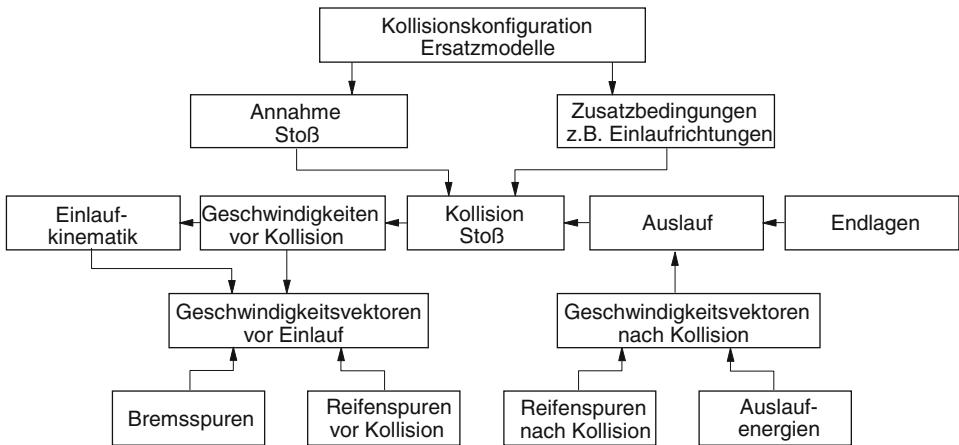


Abb. 5.4 Ablauf einer rechnerischen Rückwärts-Unfallrekonstruktion (in Anlehnung an [Burg 81])

- Brems- und Schleuderspuren (Reifenspuren) nach und vor der Kollision (vor allem zur Ermittlung der Ein- und Auslaufrichtungen),
- Endlagen und Auslaufwege nach der Kollision (vor allem zur Bestimmung der Auslaufimpulse nach Betrag und Richtung),
- Reibwerte Fahrzeug/Fahrbahn,
- evtl. zusätzlich Deformationsenergien, EES-Werte der Fahrzeuge.

Im Gegensatz zur Vorwärtsrechnung entfällt hier die Notwendigkeit, Verhakungs- und Gleitstöße zu unterscheiden, die Richtungen der Stoßnormalen und Stoßtangente festzulegen und den Betrag der Stoßziffer und des Reibungskoeffizienten (zwischen den Kontaktflächen der Fahrzeuge) anzugeben. Beim Antriebs-Balanceverfahren, ob grafisch oder rechnerisch durchgeführt, können die Einlaufrichtungen $v_{1x}/v_{1y}, v_{2x}/v_{2y}$ als gegebene Zusatzbedingungen aufgefasst werden. Die sechs Unbekannten sind hierbei

$$v_{1x}, v_{1y}, v_{2x}, v_{2y}, P_x, P_y .$$

In dem Falle des klassischen „Antriebs-Balanceverfahrens“ nach [Slibar 73] stellen sich also die Fragen nach Art des Stoßes (verhakt, gleitend), nach Tangential- und Normalrichtung des Stoßes, nach Stoßzahl oder nach Deformationsenergien nicht, ein großer Vorteil gegenüber der Vorwärts-Rekonstruktion. Die verschiedenen Einflussgrößen und die Vorgehensweise bei der Rückwärts-Unfallrekonstruktion, bei der der grafische Weg im Mittelpunkt steht, sind in Abb. 5.4 gezeigt.

Hauptanwendungsgebiet der klassischen Rückwärts-Rekonstruktion sind Unfälle im Querverkehr. Nicht ohne weiteres ist das Antriebs-Balanceverfahren anwendbar, wenn

- bei einem ausgeprägten Kreuzungsunfall die Einlaufrichtungen fehlen oder
- es sich um „Längskollisionen“ wie z. B. Gegenverkehrs-, Auffahr- oder Abgleitkollisionen handelt (hier ergeben sich schleifende Schnitte beim Lösungsversuch).

Unter Einbeziehung von abschätzbaren Deformationsenergien (EES) lässt sich in diesen Fällen nach dem „Energieringverfahren“ von [Schimmelpfennig 82/1] auf den Stoßantrieb und nach der „EES-Methode“ von [Burg 80/1, 82/2, 84] rechnerisch auf die Größe der Einlaufgeschwindigkeiten schließen, siehe auch [Koob 86, 91]:

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{m_1}{m_1 + m_2} \left[\frac{1}{m_2} (m_1 v_1' + m_2 v_2') + \sqrt{\left(v_1' - v_2' \right)^2 + \frac{m_1 + m_2}{m_2} EES_1^2 + \frac{m_1 + m_2}{m_1} EES_2^2} \right] \\ v_2 &= \frac{1}{m_2} (m_1 v_1' + m_2 v_2' - m_1 v_1) . \end{aligned}$$

Die Anfänge und die Weiterentwicklung der rechnerischen oder grafischen Verfahren der Rückwärts-Kollisionsrekonstruktion beruhen auf den historischen Arbeiten von [Brüderlin 41, Lossagk 58, Marquard 62, Eberan 62, Slibar 64]. In Tab. 5.2 werden die Grundlagen und Einschränkung der Verfahren kurz angedeutet. Das sog. „Antriebs-Balance-Verfahren“ von Slibar [Slibar 73] war das gebräuchlichste Verfahren. Weitergehende Verfahren bauen hierauf auf, siehe Abschn. 5.2.

Tab. 5.2 Auswahl älterer Verfahren der Rückwärts-Unfallrekonstruktion [Langwieder 75]

Autor	Grundlagen	Einschränkungen	Bemerkungen
[Brüderlin 41]	Impulssatz, Fahrzeug als Massenpunkt	keine Drehbewegungen, geradliniger Auslauf	rechnerisches Verfahren, Aufwand gering, keine exzentrischen Stöße
[Lossagk 58]	s. o.	s. o.	rechnerisches Verfahren, Aufwand gering, keine exzentrischen Stöße, unrealistischer Ansatz für die Richtung der Auslaufimpulse
[Marquard 62]	Fahrzeug als Scheibe, Impulssatz, Drehimpulssatz	Richtung des Stoßantriebes plausibel vorgegeben	nur analytischer Lösungsweg, daher Aufwand relativ groß. Richtung Stoßantrieb fraglich
[Eberan 62]	Impulssatz, Fahrzeug als Massenpunkt, Restitutionskoeffizient	keine Drehbewegungen, keine Angaben über Auslauf	rechnerisches Verfahren, Aufwand gering, scheitert an ungenauer Stoßzahl k
[Slibar 64, 66, 73]	Fahrzeug als Scheibe, Impulssatz, Verhakung, Drehimpulssatz zur Kontrolle	Translation überwiegt energetisch Rotation	grafisches Verfahren, Aufwandmäßig, bezieht die üblicherweise vorliegenden Spuren ein, Drehimpulssatz nur zur Kontrolle. Weit verbreitetes Verfahren

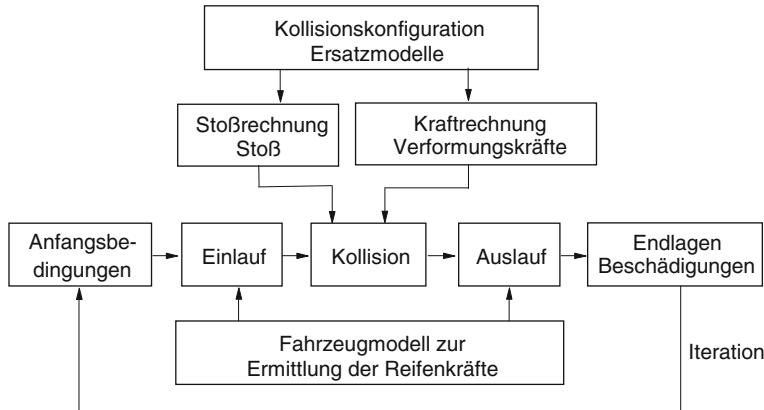


Abb. 5.5 Ablauf einer rechnerischen Vorwärts-Unfallrekonstruktion (in Anlehnung an [Burg 81])

5.1.2 Vorwärts-Unfallrekonstruktion, insbesondere Vorwärts-Kollisionsrekonstruktion

Die Vorwärtsrechnung kann grundsätzlich über Stoßgleichungen oder Kraftgleichungen erfolgen, siehe Abb. 5.5. Da es sich in mathematischen Sinne um ein Anfangswertproblem handelt, müssen zunächst die Anfangswerte (z. B. Einlaufimpulse, Kollisionsort, Kollisionsstellungen, Reibwerte zwischen Fahrbahn und Fahrzeug) angenommen und vorgegeben werden. Ein besonderes Problem stellt sich bei der Stoßrechnung, wenn nicht von einem verhakten Stoß ausgegangen werden kann, da ein Gleitstoß vorliegt. In diesem Fall sind die Tangential- und Normalrichtungen der Stoßantriebe sowie die Reibziffern zwischen den Kontaktflächen anzugeben, was mit Schwierigkeiten und Unsicherheiten verbunden ist. Es muss eine Hypothese über den Unfallablauf aufgestellt werden. Nach Abarbeiten der Rekonstruktionskette von Abb. 5.5 werden die Ergebnisse, z. B. die Endlagen, mit den realen Spuren verglichen. Mit Variation der freien Parameter wird die Rekonstruktionskette so oft wiederholt, bis sich eine plausible Übereinstimmung mit den Auslaufspuren ergibt. So wohl für die Anwendung der Stoß- wie der Kraftgleichung sind Fahrzeug-Ersatzsysteme aufzustellen mit einer je nach Anforderung einfachen oder differenzierten Modellbildung in ein-, zwei- oder dreidimensionaler Darstellung von Ein- oder Mehrkörpersystemen.

Bei Anwendung der **Stoßgleichungen**, dem üblichen Vorgehen bei heutigen PC-gestützten Verfahren, sind Annahmen über Zusatzhypthesen nötig, die über die Anwendbarkeit bzw. Genauigkeit des Verfahrens entscheiden. Von vornherein ist weniger über den Unfallablauf bekannt, es gibt zunächst Nichts, was als gesichert angesehen werden kann [Burg 99/1, 99/2]. Welches ist die Normal- und welches die Tangentialrichtung des Stoßantriebes? Welches ist der Reibwert der Tangentialkomponente des Stoßantriebes? Wie groß ist der Restitutionskoeffizient? Am einfachsten ist es, von einer Verhakung beim Stoß auszugehen, aber auch Gleitstöße können (unter großzügiger Auslegung der Voraus-

setzungen für die Anwendbarkeit der Stoßgleichungen) behandelt werden, wenn es gelingt, die Berührtgantente realistisch festzulegen [Böhm 68]. Innerhalb der Rekonstruktionsverfahren wird analytisch mit der Lösung von Gleichungen (Impulssatz, Drehimpulssatz, Zusatzhypothesen) vorgegangen. Bei Standardunfällen (siehe Abschn. 5.4) lassen sich relativ einfache Lösungsformeln angeben.

Grundlage des Vorgehens bei der Vorwärts-Rekonstruktion ist das Aufstellen eines theoretischen Fahrzeugmodells mit einer, dem realen Fahrzeug angepassten, möglichst präzisen Erfassung aller Einzelparameter und deren gegenseitiger Beeinflussung während des gesamten Unfallablaufes. Das Vorgehen und die Abläufe bei der Anwendung der Vorwärtsrechnung für die Unfallrekonstruktion zeigen Abb. 5.3 und 5.5. Die Crashphase wird numerisch über Kraftgleichungen oder analytisch über Stoßgleichungen behandelt. Die Anfangsbedingungen sind iterativ solange zu variieren, bis sich die Auslaufkonstellation des Unfalls hinreichend genau einstellt.

Bei Anwendung der **Stoßgleichungen** ist im Falle von Gleitstößen die realistische Formulierung der Zusatzhypothesen oft schwierig. Welches ist die Normal- und welches die Tangentialrichtung des Stoßantriebes? Welches ist der Reibwert der Tangentialkomponente des Stoßantriebes? Wie groß ist der Restitutionskoeffizient? Nur bei Kollisionen mit Leitplanken ist die Tangentialebene gegeben, der Reibkoeffizient liegt hierbei um 0,4. Im Allgemeinen ist es allerdings am einfachsten, wenn von einer Verhakung beim Stoß ausgegangen werden kann. Analytische Lösungen mit formelmäßigen Ergebnissen sind nur bei Standardunfällen möglich, siehe Abschn. 4.4.7.

Grundlage für die Anwendbarkeit der **Kraftgleichungen** ist die Vorgabe von realistischen Kraft-Wegkennungen der Struktur und von geeigneten Kontaktmodellen. Bei Annahme von MKS-Systemen, also dem Verbund von starren Einzelkörpern, lassen sich analytische Lösungen angeben. Voraussetzung ist, dass es sich um einfache Ersatzsysteme und Crash-Konstellationen handelt, siehe Abschn. 5.4. Der allgemein gangbare Weg über eine numerische Integration der Bewegungsgleichungen von differenzierten Ersatzsystemen ist schon aufwendiger und nur mit Rechnerunterstützung sinnvoll. Entscheidende Voraussetzung für die Anwendbarkeit ist eine möglichst genaue Kenntnis der fahrzeugtypischen – und daher meist nur dem Hersteller bekannten – Deformationskennungen aus Front-, Seiten- und Heckaufprallversuchen oder entsprechenden rechnerischen Simulationen. Wichtig ist die Beschreibung der Kontaktmodelle, der Außenkonturen der Kollisionskontrahenten für beide der jeweils in Berührung befindlichen Fahrzeugteile und der daraus resultierenden Deformationskräfte. Die Bestimmung der Eingangsparameter, die Ermittlung der Kennungen, die Erfassung der Nachgiebigkeiten bzw. Steifigkeiten im Ersatzmodell ist oft mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Ein großer Teil der Schwierigkeiten wird dem Anwender von der heute verfügbaren PC-gestützten Rekonstruktions-Software abgenommen. Von Nachteil ist, dass eine Überprüfung der Ergebnisse durch Dritte nur im Rahmen einer Plausibilitätsprüfung oder über gegenlaufende Vergleichs-Programme möglich ist.

Die heute in der Fahrzeugentwicklung angewendeten **FEM-Verfahren** zur Strukturberechnung unter statischer Belastung, unter Schwingungsbelastung oder unter Crashbe-

Tab. 5.3 Auswahl älterer Verfahren zur Vorwärts-Unfallrekonstruktion [Langwieder 76, Burg 81]

Autor	Grundlagen	Einschränkungen	Bemerkungen
[Böhm 68]	2 Rad-Fahrzeugmodell, Stoßgleichungen, Reifenkräfte, Mehrfachstöße	Auslauf nicht beschreibbar	Rechnerisch-analytisches Verfahren, Aufwand groß
[McHenry 73]	4 Rad-Fahrzeugmodell, Kraftgleichungen, Reifenkräfte. 3D	Struktureigenschaften des Fahrzeugs benötigt, Rechnerunterstützung erforderlich	rechnerisch-numerisches Verfahren, Vorläufer aller PC-gestützten Verfahren. Verbesserungen über SMAC und CRASH
[Rau 75]	4 Rad-Fahrzeugmodell, Kraftgleichungen, Reifenkräfte. 2D	Struktureigenschaften des Fahrzeugs benötigt, Rechnerunterstützung erforderlich	rechnerisch-numerisches Verfahren. Nur interne Verwendung möglich.
[Burg 80/2]	Ebenes Scheibenmodell, Impulssatz, Drehimpulsatz, Energiesatz, EES	Abschätzung von EES	rechnerisch-analytisches Verfahren, Aufwand mäßig

lastung können prinzipiell auf die Unfallrekonstruktion mit Vorwärtsrechnung angewendet werden. Dabei wird von der Fahrzeugstruktur als solcher ausgegangen, es sind keine Vorgaben von Deformationskennungen nötig, wohl aber von – innerhalb der Standardsoftware enthaltenen – Kontaktmodellen für die einzelnen Elemente und für die kollidierenden Strukturen. Es kann heute theoretisch jede Art von Alleinunfällen und Fz-Fz-Kollisionen mit FEM-Modellen rechnerisch simuliert werden, allerdings mit sehr differenzierten Modellen (Größenordnung 1.000.000 Elemente für die Darstellung der Karosserie) und hohen Rechenzeiten an Hochleistungsrechnern. Die Erfassung großer und plastisch-elastischer Deformationen der Elemente ermöglicht die Berechnung der Beschädigungen und Verformungen der Fahrzeuge. Es liegt auf der Hand, dass diese FEM-Verfahren heute nur in Ausnahmefällen (z. B. Produkthaftungsfälle in den USA) für Unfallrekonstruktionen verwendet werden. Dieser Zustand könnte sich bei fortschreitender Rechnertechnologie in Zukunft ändern. Es ist zu berücksichtigen, dass die vorhandenen Modelle bei den Fahrzeugherstellern in der Regel für die relevanten Lastfälle validiert wurden und nicht zwangsläufig auch in anderen Konstellationen hinreichen numerisch stabil bzw. genau sind.

Tabelle 5.3 zeigt eine Auswahl von älteren Verfahren zur Vorwärts-Unfallrekonstruktion als Stoß- oder Kraftrechnung auf der Basis von Massenpunkt- und Einscheiben-Modellen. Auf neuere Verfahren wird im Abschn. 5.3 eingegangen. Die heute mit Rechnerunterstützung angewandten Verfahren der Vorwärts-Unfallrekonstruktion über Stoßgleichungen beruhen auf der von [Böhm 68] eingeführten Methodik. Dabei müssen Tangential- und Normalebene sowie der Reibwert für die Kontaktzone vorgegeben werden. Früher war wegen des Rechenaufwandes das notwendige iterative Vorgehen nicht möglich, heute stehen hierfür schnelle Rechner zur Verfügung.

5.1.3 Kontrollmöglichkeiten

Bei Anwendung einer bestimmten Rekonstruktionsmethode muss spätestens im Nachhinein geprüft werden, ob die der angewandten Methode zu Grunde liegenden Annahmen und Vereinfachungen für den analysierten Unfall auch zutreffen. Dabei sind Plausibilitätsüberlegungen des erfahrenen Rekonstrukteurs besonders wertvoll. Beispielsweise können Bewegungsgrößen, die aus der Rekonstruktion folgen, durch eventuell bekannte oder abschätzbare Fahrzustände der Pre-Crashphase kontrolliert werden, wie z. B.

- Anfahrbeschleunigung von Fahrzeugen nach einem Einbiegevorgang,
- Querbeschleunigung von Fahrzeugen in Kurven,
- Zeit-Weg-Bedarf beim Überholen, geschwindigkeitsabhängiger Wegbedarf für einen Ausschervorgang,
- Geschwindigkeitsänderung bei Fahrt im Gefälle oder auf Steigungen.

Für den Kollisionsvorgang selbst ist zu prüfen, ob im Falle der Stoßanalyse die angenommenen Zusatzhypthesen und Vernachlässigungen berechtigt waren, z. B. ob die Rotation energiemäßig wirklich gegenüber der Translation von untergeordneter Bedeutung ist, ob eine Verhakung vorliegt oder ob die Vorgabe der Richtung des Stoßantriebes vertretbar ist.

Die Fahrzeugbeschädigungen, deren zugehörige Verformungsenergie bei der Rekonstruktion als EES abgeschätzt und beschrieben wird, können mit einem entsprechenden Crash-Test des gleichen Fahrzeugmodells nachvollzogen werden, wobei die tatsächliche Aufprallgeschwindigkeit gegen die OUB mit der geschätzten EES zu vergleichen ist. Für einige ausgewählte Fahrzeug- und Unfallkonstellationen existieren sogenannte „EES-Kataloge“ [z. B. Burg 84, 99/1, Steffan 94], in denen für bestimmte Crash- bzw. Unfallkonstellationen und Deformationsmuster die jeweiligen EES-Geschwindigkeiten ermittelt wurden. Unter idealen Bedingungen homogener Deformationen kann durch Vergleich der realen Deformationen mit sog. „Energierastern“, die für jeweils einen bestimmten Fahrzeugtyp beim frontalen Wandaufprall ermittelt wurden, auf die Deformationsenergie und damit auf die EES geschlossen werden [Campbell 74, Schaper 79, Burg 81]. Im Anhang 8.1 sind für einige Fahrzeuge unterschiedlicher Masse und Motorenbauart die Energieraster quantitativ angegeben.

Schließlich ist es zur Kontrolle oder Validierung von Rekonstruktionsergebnissen möglich, wenn auch meistens unangemessen, den gesamten Unfallhergang, wie rekonstruiert, unter Unfallbedingungen (d. h. z. B. gleiche Fahrzeuge) nachzufahren und daran das Rekonstruktionsergebnis zu messen. Derartige Nachfahrversuche werden nur in besonderen Fällen, z. B. in den USA im Zusammenhang mit strittiger Produkthaftung, durchgeführt. Sie werden aber auch im Rahmen von Biomechanikuntersuchungen zur Paarung der Verletzungsschwere aus dem Unfall mit Messwerten am Dummy eingesetzt [Johannsen 12/2].

Probleme für eine hinreichend genaue Unfallrekonstruktion können unter den verschiedensten Umständen auftreten, beispielsweise bei

- unvollständiger Spurenfeststellung oder Spurenzeichnung im Einlauf oder im Auslauf (Nässe, ABV),
- Unfällen mit geringen Auslaufbewegungen,
- Unfällen mit starken Rotationsbewegungen,
- Unfällen, bei denen eine Bewegung in der Ebene nicht angenommen werden kann (Abheben, Überschlag),
- Gleitstößen,
- kolinearen, eindimensionalen Kollisionen,
- Mehrfachkollisionen,
- Unfällen von Pkw- und Lkw-Gespannen einschließlich Sattelzügen,
- Katastrophenunfällen (extrem hohe Geschwindigkeiten, Zerreissen von Fahrzeugen).

In vielen dieser Fälle bietet der Rekonstruktionsweg über die Kraft- bzw. Bewegungs-gleichungen gegenüber dem über die Stoßrechnung Vorteile bzw. wird erst dadurch mög-lich, dass keine einschränkenden Annahmen zu treffen sind und die wirksamen Kräfte und Momente, Wege und Geschwindigkeiten kontinuierlich erfasst, ermittelt und kontrolliert werden. Räumliche Bewegungen und Animationen sind nur über die rechnergestützte, nu-merische Integration der Bewegungsgleichungen im Ein- und Auslauf darstellbar. Der hohe Aufwand bei diesem Vorgehen fällt wegen höherer Rechner- und Software-Leistungen zu-nehmend weniger ins Gewicht.

5.1.4 Unfalldatenspeicher

Im Zusammenhang mit Straßenverkehrsunfällen beruht die Urteilsfindung im Straf- oder Zivilprozess auf Zeugenaussagen, Anknüpfungstatsachen und gesicherten Grunddaten. Bei einer Vielzahl von Verkehrsunfällen kann aus verschiedenen Gründen die Spurensiche- rung nicht in dem Maße erfolgen, wie sie im Sinne einer objektiven Unfallrekonstruktion und einer gesicherten Urteilsfindung nötig wäre.

Beispielsweise sind bei Ausscher- und Überholvorgängen in starkem Maße subjektiven Aussagen maßgebend bzw. sind technische Rekonstruktionen nur mit erheblichen Toleranzbreiten oder „wenn-dann“-Szenarien durchzuführen. Bei Nässe sind die Brems- und Blockierspuren meist nur unscharf oder gar nicht nachzuweisen, das gilt ganz besonders bei Fahrzeugen mit ABV (bei Fahrzeugen mit ABV sind Bremsspuren auch auf trockener Fahrbahn nur schwer zu erkennen). Damit entfällt eine der wichtigsten Anknüpfungstat-sachen für die technische Unfallrekonstruktion mit entsprechenden Konsequenzen für die Rechtsprechung, aber auch für die Unfallforschung und für die Verkehrssicherheit insge-samt.

Anfang der 80er Jahre begannen die Firmen MBB und Kienzle mit ersten Überlegungen und Entwicklungen zum Einsatz eines Gerätes zur Dokumentation der rekonstruktions-relevanten Parameter bei einem Verkehrsunfall, eines Unfalldatenspeichers (UDS). Als Vor-bild dienten die in der Luftfahrt eingesetzten Flugschreiber, die sich bei der Rekonstruktion

von Flugunfällen längst bewährt haben. Die Vorteile beim Einsatz eines Unfalldatenspeichers sind bzw. wären:

- Erhebung von genauerer und zusätzlichen Unfalldaten mit der Konsequenz, auch bei sonst nicht aufklärbarer Unfallabläufen zu verlässlicheren Rekonstruktionsergebnissen beizutragen,
- Unterstützung bei der Beweissicherung zur Klärung der Schuldfragen bei strafrechtlichen Gerichtsverfahren und bei der zivilrechtlichen Auseinandersetzung mit Erhöhung der Rechtssicherheit im Einzelfall,
- Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Erzielung genauerer Ergebnisse für die Unfall- und Sicherheitsforschung sowie durch präventive Wirkung und Beeinflussung des Fahrerverhaltens,
- Kostenreduktion in Fahrzeugflotten durch Unfallprävention.

Die Unfalldatenspeicher erfassen „Fahrdaten“ und „Statusdaten“, mit denen auf Bewegung und Funktionen vor, bei und nach der Kollision geschlossen werden kann. Aus den Fahrdaten ist zu erkennen, ob und in welcher Art Überholen, Schleudern, Kurvenfahrt, Bremsmanöver oder Kollision vorlag. Einige Fahr- und Statusdaten sollen genannt werden.

Fahrdaten: Tachogeschwindigkeit, Längs- und Querbeschleunigungen, Gierwinkel und Gierwinkelgeschwindigkeit.

Statusdaten: Zündung, Bremsen, Blinker rechts, Blinker links, Stand-, Fahr-, Abblendlicht.

Überschreiten die Beschleunigungen/Verzögerungen definierte Werte (z. B. beim Abkommen von der Straße), werden die Daten über die zurückliegenden 30 s und die folgenden 15 s gespeichert. In der heutigen Ausführung der Fa. VDO (früher Mannesmann VDO Kienzle AG) erfolgt diese Speicherung mit einer Frequenz von 25 Hz. Mit Erfüllen von weiteren Triggerkriterien, die eine Kollision erkennen, wird 100 ms vor und 100 ms nach Triggersignal mit einer Frequenz von 500 Hz gespeichert. Insgesamt können die Daten von vier Unfallsituationen gespeichert werden. Nach dem Unfall können die Daten (über eine Standardschnittstelle) von autorisierten Sachverständigen ausgelesen und ausgewertet werden [Kast 98].

Aus heutiger Sicht ist festzustellen, dass die Geräte mit Sensorik, Mikroprozessortechnik und Speichertechnik in der Lage sind, die Fahrzeuggbewegung, den Fahrzeugstatus und die Fahrerbetätigung lückenlos und zuverlässig zu verfolgen. Das Überholen, das Schleudern und die Kurvenfahrt eines Fahrzeugs sind mit ihrer zeitlichen Zuordnung sicher rekonstruierbar, der Stoßvorgang kann mit ausreichend hoher Abtastrate beschrieben werden. Die Aufzeichnungsgeräte sind autark, wartungsfrei und inzwischen relativ kostengünstig (etwa zum Preis eines Autoradios).

Der UDS ist zu Beginn seiner Entwicklung vor etwa dreißig Jahren von verschiedenen Gremien, Verbänden und Behörden im Hinblick auf eine allgemeine Einführung skeptisch beurteilt worden, da

- die Akzeptanz bei Pkw-Fahrern auf Grund der Nachweisbarkeit eigenen Fehlverhaltens nicht gegeben sei,
- der Einbau nur auf freiwilliger Basis erfolgen könne,
- das Nutzen-/Kostenverhältnis wahrscheinlich schlecht sei,
- die Auswertungs-Infrastruktur nicht vorhanden sei und
- eine obligatorische Einführung auf EU-Ebene nicht durchsetzbar sei.

Inzwischen hat sich der UDS im Alltagsbetrieb bei Einzelbetreibern und in Flotten bewährt, er beginnt sich dort zunehmend durchzusetzen. Die positiven Ergebnisse (Reduzierung der Unfallzahlen, der Schadenshöhen und der Gesamtkosten, Befreiung des Einzelnen von ungerechtfertigtem Verdacht) eines abgeschlossenen Flottenversuches der Berliner Polizei mit etwa 400 Streifenwagen und Zivilfahrzeugen hat dazu geführt, dass alle neuen Wagen der Berliner Polizei mit serienmäßig eingebauten UDS beschafft werden [Rau 98]. Des Weiteren werden Unfalldatenspeicher auch im Rahmen der Unfallforschung vermehrt eingesetzt, z. B. [Gabler 08, daSilva 08].

5.2 Grafische Rekonstruktionsverfahren

Es sei vorweg angemerkt, dass die Diskussion der grafischen Rekonstruktionsverfahren angesichts der verfügbaren leistungsstarken Computerprogramme veraltet erscheint. Jedoch eignen sich die grafischen Rekonstruktionsverfahren sehr gut für die verständliche Darstellung der Rekonstruktionsansätze, die auch in heutigen Computerprogrammen verwendet werden.

Über lange Zeit war bei der Rekonstruktion von Pkw-Kollisionen das von Slibar im Jahre 1973 eingeführte „Antriebs-Balance-Verfahren“ das grafische Standardverfahren, bis es in den achtziger Jahren durch andere grafische Verfahren ergänzt, erweitert oder ersetzt wurde, siehe Tab. 5.4 und Abb. 5.6. Insbesondere die Arbeiten aus dem Ingenieurbüro Schimmelpfennig/Becke haben zur Entwicklung der neueren Verfahren beigetragen. Vorteile sind:

- simultane Berücksichtigung von Impuls-, Drall- und eventuell Energiesatz,
- einfache und anschauliche Einbeziehung von Toleranzen der Eingangsgrößen,
- kein Balancieren und Probieren erforderlich, gesuchter Stoßantriebsvektor ergibt sich aus Schnittlinien,
- einfache Handhabung.

Die neueren Verfahren eignen sich, ebenso wie das Antriebs-Balance-Verfahren, zunächst nur für die Behandlung des ebenen, exzentrischen, schiefen Stoßes von zwei Fahrzeugen (Seitenkollision, Schrägkollision). Das Energie-Ringverfahren und das Band-Schnittverfahren sind auf den geraden zentrischen Stoß, d. h. auf Frontal- bzw. Heckkollisionen anwendbar. Im Weiteren sollen die Verfahren erläutert werden.

Tab. 5.4 Grafische Verfahren der Unfall-Rückwärtsrekonstruktion

Autor	Verfahren	Grundlagen	Eingangsgrößen	Anwendung
[Slíbar 73]	Antriebs-Balance-Verfahren	Impulssatz, Drallsatz als Kontrolle	Auslaufimpulse nach Größe und Richtung, Ein- laufrichtungen, Kollisionsort	Kreuzungs- und Ein- biege-Unfälle bei überwiegender Trans- lation
[Slíbar 79] [Schimmel- pfennig 80, 91]	Drehimpuls- verfahren	Drehimpulssatz	Kollisionsstellung, Stoßpunktlage, Auslauf-Dreh- impuls	Kreuzungs- und Ein- biege-Unfälle mit hohem Rotationsanteil
[Schimmel- pfennig 80, 91]	Impuls-Spiegel- verfahren	Impulssatz	Wie beim An- triebs-Balance- Verfahren	Wie bei Antriebs- Balance-Verfahren
[Woldrich 87] [Koob 86, 91]	Drehimpuls- Spiegelverfahren Rhomboïd- Schnittverfahren	Drehimpulssatz Drehimpulssatz	Wie beim Drehim- pulsverfahren Auslauf-Impulse, Auslauf-Dreh- impulse, Stoß- punktlage, Kollisi- onsort	Wie beim Drehim- pulsverfahren Kreuzungs- und Ein- biegeunfälle mit Translation und Rota- tion
[Schimmel- pfennig 82/1, 91]	Energie-Ring- verfahren (unter Einschluss des Rhomboïd- Schnittverfah- rens)	Impulssatz, Drehimpulssatz, Energiesatz	Wie beim Rhom- boid-Schnittver- fahren, zusätzlich Deformationsener- gie bzw. EES	Wie beim Rhomboïd- Schnittverfahren, zusätzliche Bedingung für Stoßantrieb nach Größe
[Schimmel- pfennig 82/2, 83]	Band-Schnitt- verfahren	Impulssatz, Energiesatz, Arbeitssatz	Kollisionsort, Auslaufarbeit, De- formationsenergie bzw. EES	eindimensionale, ge- rade zentrische Stoße, z. B. Heckaufprall

5.2.1 Antriebs-Balance-Verfahren

Beim Antriebs-Balance-Verfahren wird der Stoß der Fahrzeuge auf eine reine Translationsbewegung der Schwerpunkte zurückgeführt, d. h. es werden nur die translatorischen Impulse berücksichtigt. Die Impulsgleichungen werden als ebenes Dreieck zwischen dem Ausgangsimpuls, Eingangsimpuls und dem Stoßantrieb gedeutet, siehe Abb. 5.7 und 5.8. Für die Konstruktion des Antriebs-Balance-Diagramms müssen, und das ist in der Unfallrealität oft der Fall, die folgenden Größen bekannt sein:

- Einlaufrichtungen der Fahrzeuge, d. h. Richtungen der Eingangsimpulse
- Auslaufbewegungen der Fahrzeuge, d. h. Richtungen und Beträge der Auslaufimpulse
- Kollisionsort KO.

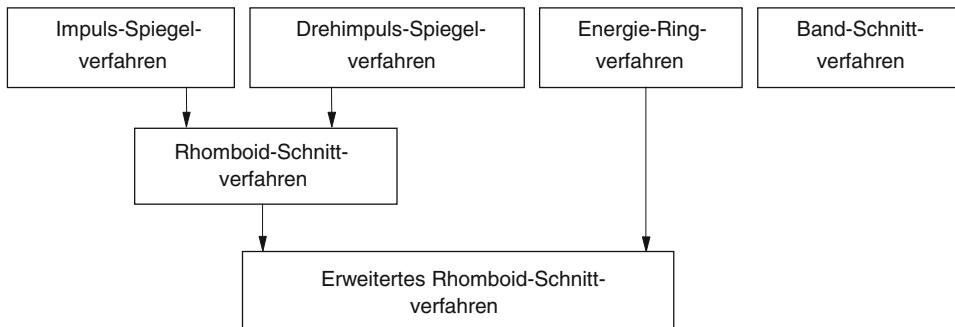
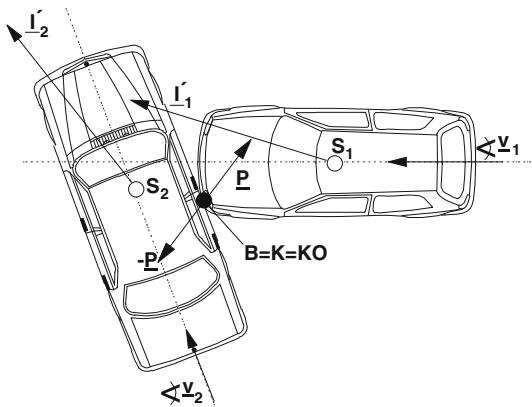


Abb. 5.6 Grafische Verfahren der Unfallrekonstruktion zur Bestimmung der Kollisionsgeschwindigkeiten

Abb. 5.7 Antriebs-Balance-Verfahren: Kollisionsstellung mit angetragenen Einlaufrichtungen von v , den Stoßantrieben P , $-P$ an der Berührstelle B bzw. dem Kontaktpunkt K der Fahrzeuge, dem Kollisionsort KO auf der Straße und den Auslaufimpulsen I'



Die Impulsgleichungen beider Fahrzeuge lauten für das Ersatzsystem nach Abb. 5.7:

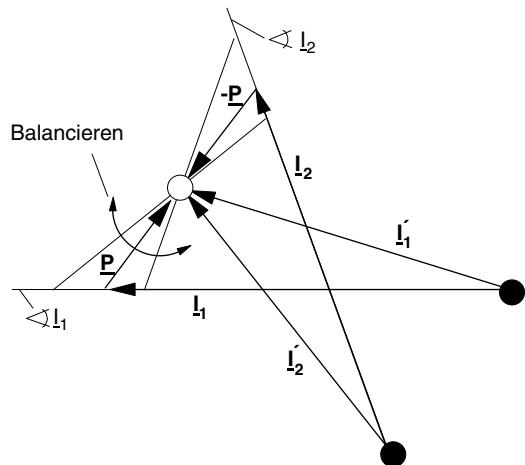
$$m_1 \cdot (\underline{v}_1' - \underline{v}_1) = \underline{P} \quad m_1 \cdot \underline{v}_1' = m_1 \cdot \underline{v}_1 + \underline{P} \quad \underline{I}_1' = \underline{I}_1 + \underline{P} \quad (\underline{v}_1 \equiv \underline{v}_{s_1})$$

$$m_2 \cdot (\underline{v}_2' - \underline{v}_2) = -\underline{P} \quad m_2 \cdot \underline{v}_2' = m_2 \cdot \underline{v}_2 - \underline{P} \quad \underline{I}_2' = \underline{I}_2 - \underline{P} \quad (\underline{v}_2 \equiv \underline{v}_{s_2}).$$

Die Konstruktion des Antriebs-Balance-Diagramms als Lösung der obigen Impulsgleichungen erfolgt in folgenden Schritten (siehe Abb. 5.8).

- Auslaufimpulse nach Größe und Richtung aus den Auslaufbewegungen ermitteln,
- Auslaufimpuls-Vektoren mit der Spitze aneinanderfügen,
- Einlaufrichtungen an die Enden des jeweiligen Auslaufimpuls-Vektors legen,
- Schließen der Impuls-Dreiecke, indem ein angenommener Stoßantrieb an die Spitzen der Auslaufimpulse angetragen wird,

Abb. 5.8 Konstruktion des Antriebs-Balance-Diagramms



- durch Drehen wird der Stoßantrieb so ausbalanciert, dass die beiden Strecken zum Schnittpunkt der Einlaufrichtungen gleich groß sind, d. h. dass $actio = reactio$ wird,
- Betrag der Einlaufimpulse aus der Skizze abmessen und Einlaufgeschwindigkeiten berechnen.

Das Antriebs-Balance-Verfahren liefert relativ genaue Ergebnisse, wenn die – zunächst vernachlässigten – Drehbewegungen der Fahrzeuge nicht ausgeprägt sind. Im zweiten Schritt werden – rechnerisch – die Drehimpulse kontrolliert. Abweichungen sind ggf. über Änderungen der Auslaufimpulse und des Kollisionspunktes auszugleichen. Was als unzulässig große Abweichung anzusehen ist, kann – leider – nicht allgemein festgelegt werden.

5.2.2 Impuls-Spiegelverfahren

Das Impuls-Spiegelverfahren berücksichtigt wie das Antriebs-Balance-Verfahren nur die Impulssätze beider Fahrzeuge. Der formale Ablauf gestaltet sich hier wie folgt: Zuerst werden die Einlaufrichtungen durch den Kontaktpunkt beider Fahrzeuge gelegt und an beliebiger Stelle auf diesen Einlaufrichtungen jeweils die Auslaufimpulse angetragen. Dies führt die grafische Anwendung des Impulssatzes direkt in die skizzierte Unfallposition und ist von daher anschaulicher (Abb. 5.9a). Da die Werte der Auslaufimpulse sowohl in der Richtung als auch im Betrag toleranzbehaftet betrachtet werden, existieren für jedes Fahrzeug vier Auslaufimpulskombinationen, d. h. minimaler Impuls mit minimalem Winkel, minimaler Impuls mit maximalem Winkel, maximaler Impuls mit minimalem Winkel und maximaler Impuls mit maximalem Winkel.

Die Auslaufimpulse der Fahrzeuge lassen sich auf der jeweiligen Einlaufrichtung parallel verschieben. Dies soll durch die gestrichelten Linien parallel zu den Einlaufrichtungen

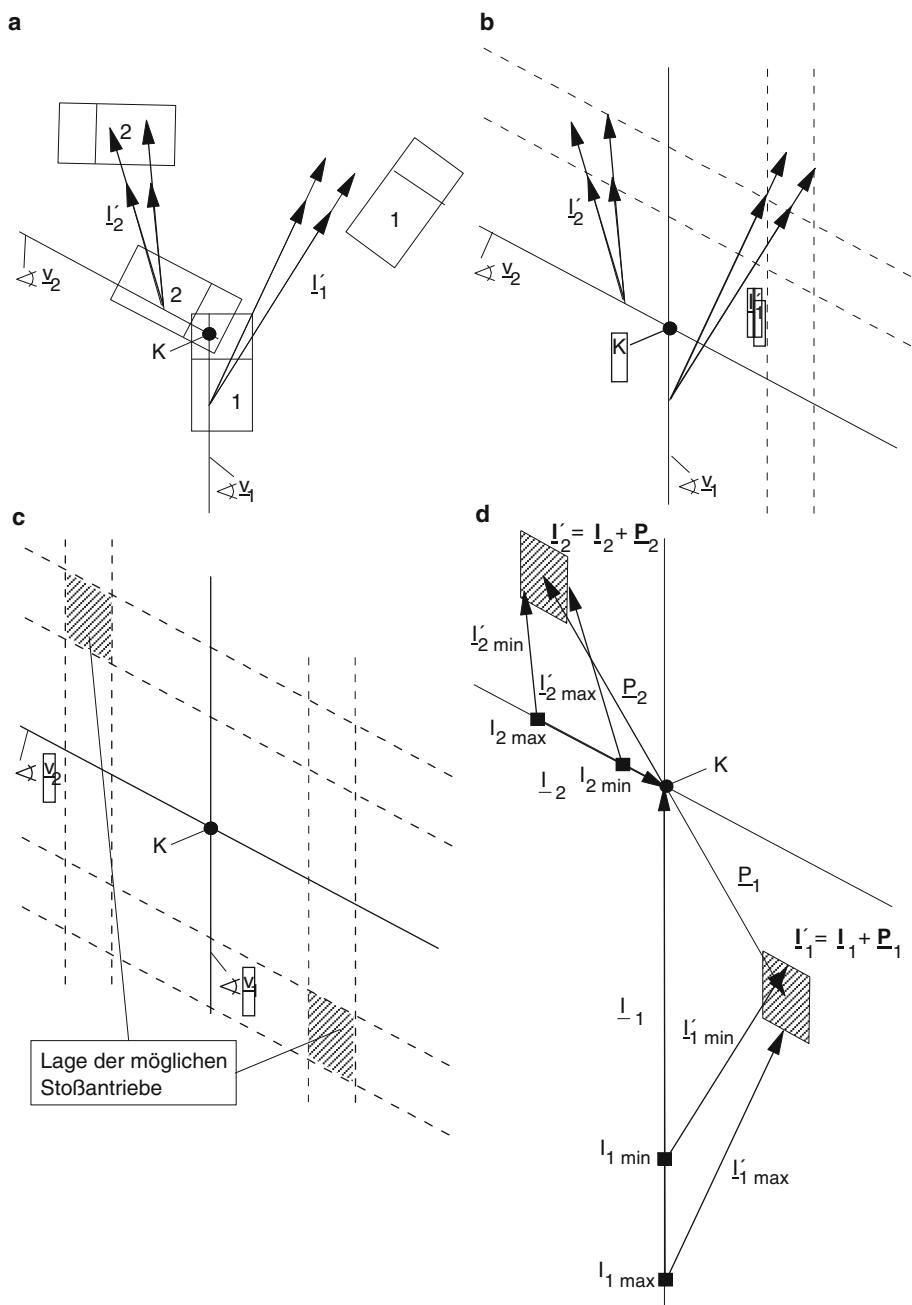


Abb. 5.9 Impuls-Spiegelverfahren – Ermittlung der Auslaufimpulse (Kollisionspunkt K liegt auf Kollisionsort KO)

und durch die Pfeilspitzen der maximalen bzw. minimalen Auslaufimpulsvektoren gekennzeichnet sein (Abb. 5.9b).

Für den Stoßantrieb \underline{P}_1 von Fahrzeug 1 gilt:

$$\underline{I}_1' - \underline{I}_1 = \underline{P}_1 .$$

Für den Stoßantrieb \underline{P}_2 von Fahrzeug 2 gilt:

$$\underline{I}_2' - \underline{I}_2 = \underline{P}_2 .$$

Zwischen beiden Stoßantrieben gilt folgende Beziehung:

$$\underline{P}_1 = -\underline{P}_2 .$$

Die Symmetrieeigenschaft des Stoßantriebes wird ausgenutzt zur Spiegelung der I' -Endlinien an der jeweiligen Einlaufrichtung. Es entstehen zwei Lösungsfelder (schraffierte Flächen im Abb. 5.9c) für die Stoßantriebe durch Schneiden der I_1' -Endlinien mit den I_2' -Spiegellinien und umgekehrt. Dieser Vorgang entspricht dem Gleichmachen der Komponenten der Stoßantriebe in Richtung der Einlaufrichtungen. Die Lösungsfelder repräsentieren den möglichen Bereich, in dem die Spitzen der Auslaufimpuls-Vektoren bzw. der Stoßantriebs-Vektoren liegen. Durch das Spiegeln und Schneiden der Linien wird das Prinzip *actio = reactio* erfüllt, der Stoßantrieb ergibt sich eindeutig, ohne dass ein Balancieren notwendig wäre.

Abschließend müssen noch die Auslaufimpulse so an die jeweiligen Lösungsfelder angetragen werden, dass sich ein maximaler bzw. minimaler Abstand vom Ursprung des Auslaufimpulses zum Kollisionspunkt ergibt. Diese Abstände kennzeichnen die Größe der Einlaufimpulse des jeweiligen Fahrzeuges und sind im Abb. 5.9d dargestellt. Aus den Einlaufimpulsen ergeben sich nach Division durch die Masse die Einlaufgeschwindigkeiten. Zur eventuellen rechnerischen Kontrolle der Drehimpulse gilt das Gleiche wie beim Antriebs-Balance-Verfahren.

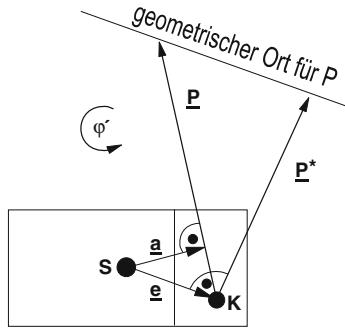
Es ist evident, dass das Impuls-Spiegelverfahren wie das Antriebs-Balance-Verfahren nicht angewendet werden können, wenn die Einlauf- und damit auch die Auslaufrichtungen kolinear liegen, also bei geraden, zentralen Frontal- oder Heckkollisionen oder auch bei Gleitstößen mit nur schwacher Ablenkung. Hier würden sich keine Schnitte der beschriebenen Linien ergeben.

5.2.3 Drehimpuls-Spiegelverfahren

Beim Drehimpuls-Spiegelverfahren [Schimmelpfennig 80, 91] wird zunächst für jedes der beiden Fahrzeuge der Betrag des Momentes des Stoßantriebes (siehe Abb. 5.10)

$$P \cdot a$$

Abb. 5.10 Grafische Darstellung der Drehimpulsbedingung für ein Fahrzeug ($K = B = KO$)



über den Drehimpulssatz

$$\Theta_S \cdot (\underline{\omega}' - \underline{\omega}) = \underline{a} \times \underline{P}; \quad \underline{\omega} = 0$$

aus der Winkelgeschwindigkeit ω' nach dem Stoß berechnet. Diese lässt sich mit Hilfe der an der Unfallstelle vorgefundenen Auslauf-Rotationsbewegung näherungsweise aus dem Arbeitssatz ermitteln:

$$E'_{\text{rot}} = A'_{\text{rot,Reib}}$$

$$E'_{\text{rot}} = \frac{1}{2} \Theta_S \cdot \omega'^2$$

$$A'_{\text{rot,Reib}} = \frac{1}{2} m \cdot a' \cdot l_R \cdot \varphi' \quad \omega' = \sqrt{\frac{m \cdot a' \cdot l_R \cdot \varphi'}{\Theta_S}}$$

mit

$a' = \mu' \cdot g$ mittlere Verzögerung des Fahrzeugs im Auslauf nach dem Stoß

l_R Radstand

φ' Gesamtdrehwinkel nach dem Stoß

Zusammen mit dem Kollisionspunkt K und der Drehrichtung von φ' kann gemäß Abb. 5.10 als geometrischer Ort für den noch unbekannten Stoßantrieb P die Gerade, die parallel zu $e = \overline{SK}$ verlaufend den Abstand $|P^*|$ hat:

$$\underline{e} \times \underline{P}^* = \underline{a} \times \underline{P}.$$

Alle Stoßantriebe \underline{P} , die in K angreifen und deren Vektor auf dieser Geraden endet, haben das gleiche Moment bezüglich des Schwerpunktes S . Der Stoßantrieb P^* ist der kleinstmögliche Stoßantrieb, er errechnet sich zu:

$$P^* = \frac{\theta_s \cdot \omega'}{e} = \frac{\theta_s}{e} \cdot \sqrt{\frac{m \cdot a' \cdot R \cdot \varphi'}{\theta_s}} = \frac{1}{e} \cdot \sqrt{m \cdot a' \cdot R \cdot \varphi' \cdot \theta_s}.$$

Für einen bestimmten ω' -Wert ergibt sich also mit Kenntnis des Trägheitsmomentes ein bestimmter Wert von $P^* \cdot e$. In das Diagramm kann ein geometrischer Ort eingezeichnet werden, auf dem die Spitzen der Stoßantriebe liegen müssen, um den Drallsatz zu erfüllen. Dieser geometrische Ort ergibt sich als Gerade, die parallel zur Verbindungsline Kontaktpunkt – Schwerpunkt im Abstand P^* verläuft.

Da die Werte für den Hebelarm e , den Drehwinkel φ' und die Verzögerung a' nur Toleranzbehaftet angegeben werden können, lassen sich die Werte für die Drehwinkelgeschwindigkeit ω' und damit für den Stoßantrieb P^* ebenfalls nur in Bereichen angeben (Abb. 5.11a, b).

Mit diesen maximalen bzw. minimalen Stoßantrieben P^* beider Fahrzeuge, die senkrecht auf den Verbindungslien e (Schwerpunkt/Kollisionspunkt) stehen, ergibt sich als geometrischer Ort für die Spitze von P ein Band zwischen zwei Geraden für die Drehbewegung eines Fahrzeugs.

Nunmehr wird wiederum ausgenutzt, dass die Stoßantriebe, die auf beide Fahrzeuge wirken, entgegengesetzt gleich groß sein müssen. Wie beim Impuls-Spiegelverfahren wird diese Bedingung durch Spiegelung und Schneiden der geometrischen Orte für die Stoßantriebe erfüllt. Die Geraden an den Spitzen der Stoßantriebe werden jeweils an der Verbindungsline Schwerpunkt-Kollisionspunkt, also an der Strecke e , gespiegelt und mit den Ausgangsgeraden des anderen Fahrzeugs zum Schnitt gebracht. So ergeben sich als Lösungsfelder für die Spitzen der Stoßantriebe zwei symmetrisch zum Kollisionspunkt gegenüberliegende (*actio = reactio*) rautenförmige Flächen (s. Abb. 5.11c).

An diese Lösungsfelder werden nun, wie beim Impuls-Spiegeldiagramm, die Auslaufimpulse der einzelnen Fahrzeuge angetragen, um jeweils den maximalen bzw. minimalen Einlaufimpuls zu erhalten (Abb. 5.11d).

Es zeigt sich also, dass bei deutlicher Rotation die Einlaufimpulse prinzipiell allein aus dem Drehimpulssatz abgeleitet werden können.

5.2.4 Energie-Ringverfahren

Das Energie-Ringverfahren liefert den Betrag des Stoßantriebes über die Deformationsenergie eines Fahrzeuges [Schimmelpfennig 82/1]. Wenn dieses Verfahren mit den vorher vorgestellten Verfahren überlagert wird, ergibt sich einerseits wieder eine Einengung des Toleranzfeldes für den Stoßantrieb, andererseits ist die Berechnung der Kollisionsgeschwindigkeit auch dann möglich, wenn z. B. die Auslaufgeschwindigkeit eines der beteiligten Kollisionspartner nicht bekannt ist.

Für den zentrischen, geraden Stoß zweier Scheiben (Fahrzeuge) errechnet sich aus den Impulsgleichungen und der Stoßzahlhypothese (siehe Abschn. 4.4.7)

$$P = m_{\text{ers}} \cdot (1 + k) \cdot v_{\text{rel}}$$

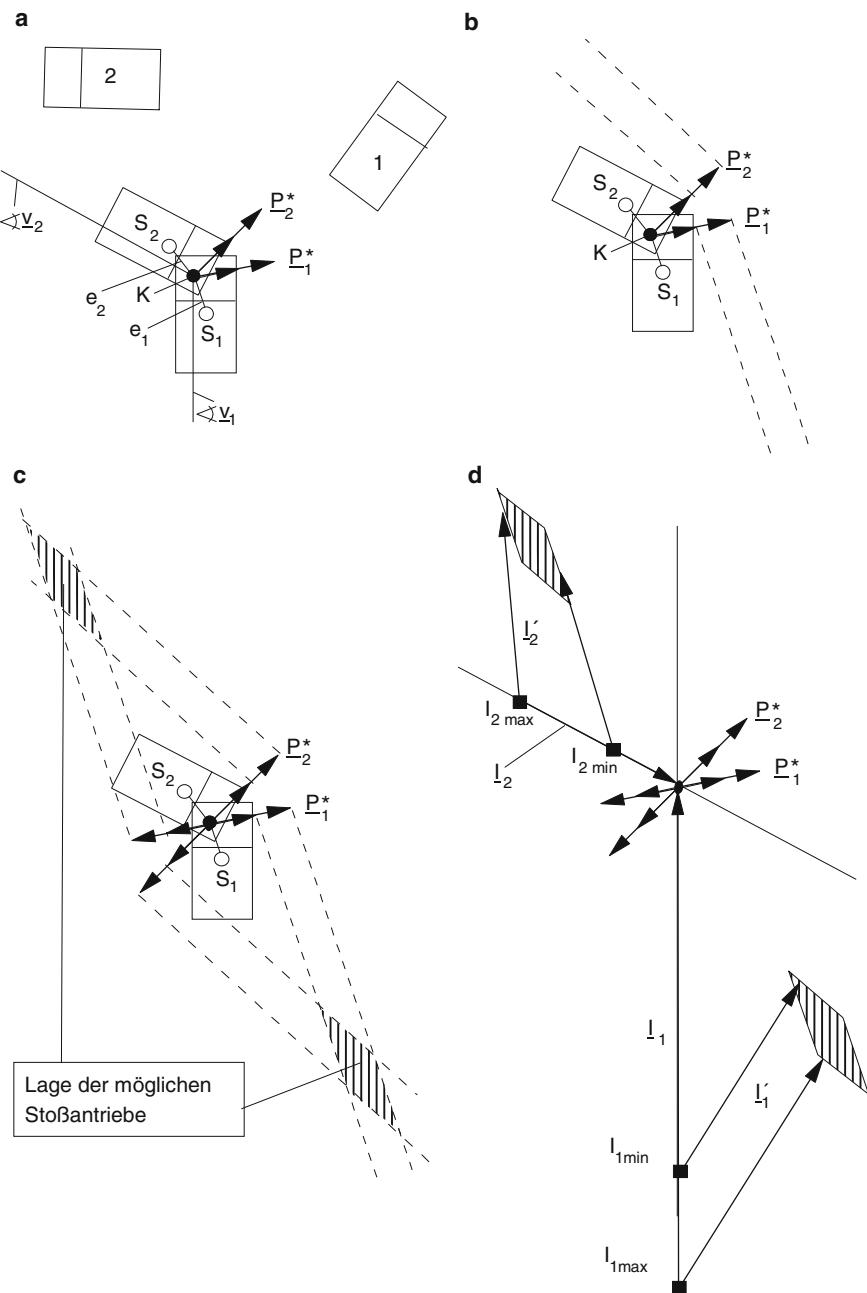


Abb. 5.11 Drehimpuls-Spiegelverfahren – Konstruktion der Lösungsfelder für die Stoßantriebe und die Einlaufimpulse (Kollisionspunkt K liegt auf Kollisionsort KO)

und aus dem Energiesatz (siehe Abschn. 4.5.5)

$$W = \frac{1}{2} m_{\text{ers}} \cdot (1 - k^2) \cdot v_{\text{rel}}^2 ; \quad W = W_{\text{Def}} = W_{\text{Def1}} + W_{\text{Def2}} .$$

Die Elimination von v_{rel} liefert den gesuchten Zusammenhang von P und W

$$P = \sqrt{2 \cdot W \cdot m_{\text{ers}} \cdot \frac{1+k}{1-k}} .$$

Hierbei ist W die Summe der Deformationsenergien beider Fahrzeuge, k der Restitutionskoeffizient und m_{ers} die „Ersatzmasse“ der beiden Kollisionspartner. Die „Ersatzmasse“ m_{ers} berechnet sich aus den Massen der beteiligten Stoßpartner:

$$m_{\text{ers}} = \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} .$$

Die Gleichung für den Stoßantrieb gilt zunächst für punktförmige Massen bzw. für zentrische Stöße. Die Spitzen der Stoßantriebe liegen auf einem Kreis um den Kontaktpunkt. Im tatsächlichen Unfallgeschehen bildet der zentrische Stoß die Ausnahme. Für den exzentrischen, schiefen Stoß kann die Lösung erweitert werden, indem reduzierte Massen eingeführt werden.

$$m_1^* = \frac{m_1 \cdot i_1^2}{i_1^2 + a^2}, \quad m_2^* = \frac{m_2 \cdot i_2^2}{i_2^2 + a^2}, \quad m_{\text{ers}}^* = \frac{m_1^* \cdot m_2^*}{m_1^* + m_2^*} .$$

Hierbei ist a der Hebelarm des Stoßantriebes zum Schwerpunkt des Fahrzeuges und i der Trägheitsradius bezüglich des Schwerpunktes:

$$i_1 = \sqrt{\frac{\Theta_{S1}}{m_1}} \quad \text{und} \quad i_2 = \sqrt{\frac{\Theta_{S2}}{m_2}} .$$

Da sich die Richtung, in die der Stoßantrieb wirkt, nur innerhalb eines Winkelbereiches, der vom Anwender abzuschätzen ist, angeben lässt, ist der Hebelarm a ebenfalls toleranzbehaftet. Auch die Deformationsenergie kann nur toleranzbehaftet angegeben werden, woraus sich für den Betrag des Stoßantriebes ein Maximal- und Minimalwert ergibt (Abb. 5.12).

Mit den Maximal- und Minimalwerten für Betrag und Richtung des Stoßantriebes lässt sich nun bei Lage seines Ursprungs im Kollisionspunkt der Energiering konstruieren, wobei der innere Radius durch den minimalen Stoßantrieb und der äußere Radius durch den maximalen Stoßantrieb gegeben ist. Das Lösungsfeld ergibt sich durch die Eingrenzung des Energierings durch den maximalen und minimalen Winkel des Stoßantriebes (Abb. 5.12d). Anschließend werden an diese Lösungsfelder wieder die Auslaufimpulse der

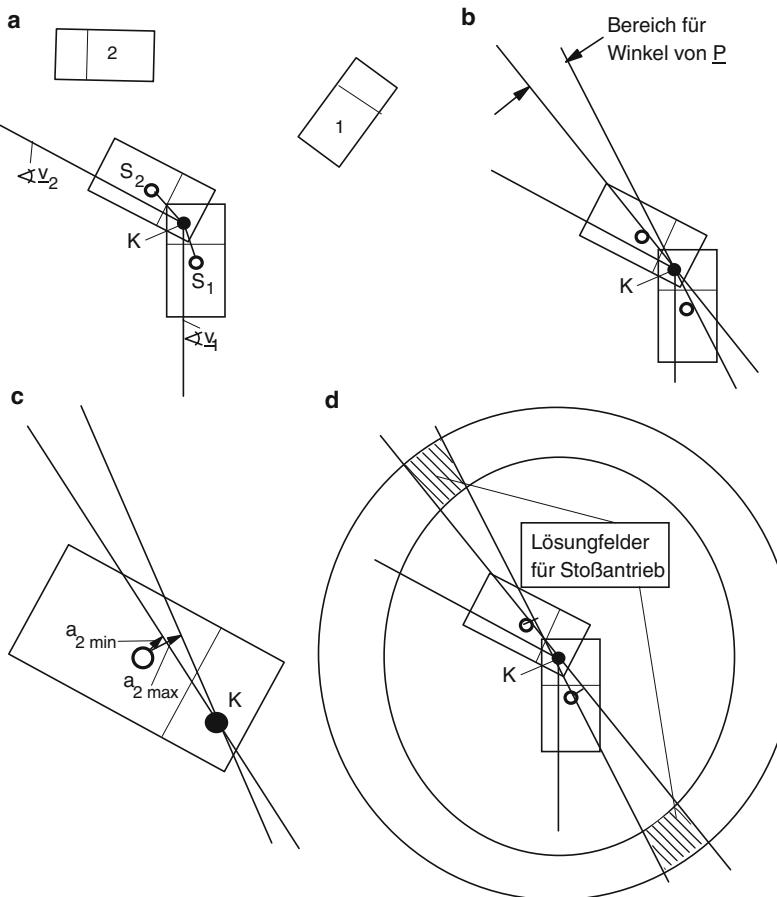


Abb. 5.12 Energie-Ringverfahren – Konstruktion der Lösungsfelder (Kollisionspunkt **K** liegt auf Kollisionsort **KO**)

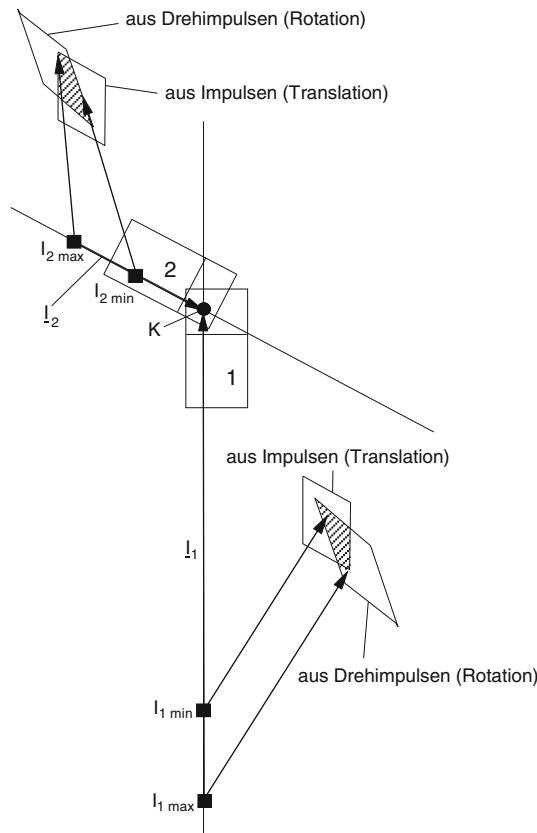
einzelnen Fahrzeuge angetragen, um jeweils den maximalen bzw. minimalen Einlaufimpuls zu erhalten.

Ebenso wie für das Impuls-Spiegel- und das Drehimpuls-Spiegelverfahren kann festgestellt werden, dass auch das Energie-Ringverfahren prinzipiell allein in der Lage ist, die Einlaufimpulse festzulegen.

5.2.5 Rhomboid-Schnittverfahren

Die Überlagerung der toleranzbehafteten Lösungsfelder des Impuls-Spiegel- und des Drehimpuls-Spiegelverfahrens führt zu dem sog. „Rhomboïd-Schnittverfahren“ (Abb. 5.13)

Abb. 5.13 Rhomboid-Schnittverfahren: Überlagerung der Lösungsfelder des Impuls-Spiegel- und Drehimpuls-Spiegelverfahrens. Schnittfelder als geometrischer Ort für die Stoßantriebe (Kollisionspunkt K liegt auf Kollisionsort KO)

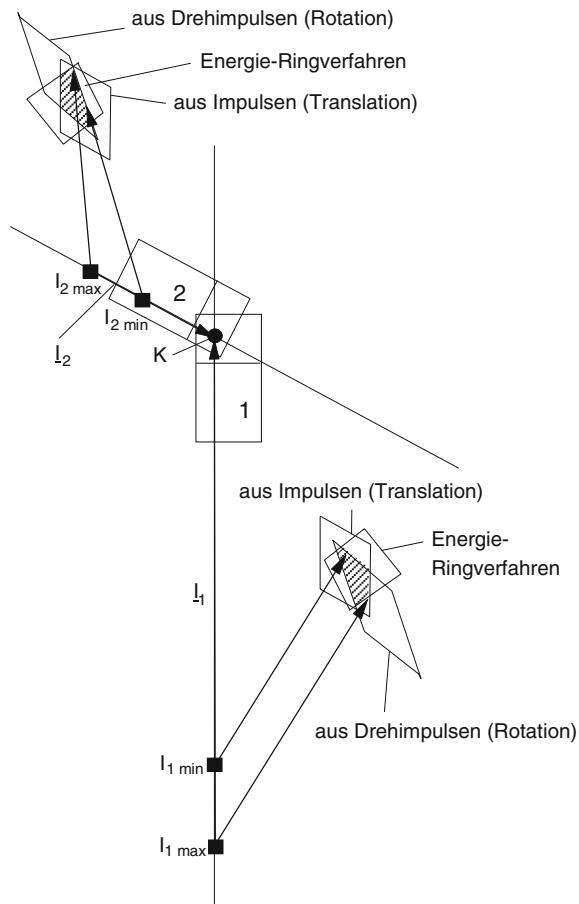


und 5.14). Mit der Überlagerung der Lösungsfelder des Rhomboid-Schnittverfahrens und des Energie-Ringverfahrens ergibt sich das sog. „Erweiterte Rhomboid-Schnittverfahren“ (Abb. 5.14). Die Ermittlung der Einlaufimpulse aus der Schnittmenge der drei Lösungsfelder erfolgt analog zu den Einzelverfahren. Idealerweise ergibt sich so stufenweise eine immer stärkere Eingrenzung und genauere Bestimmung des Stoßantriebes, indem simultan die Impulssätze, die Drehimpulssätze und der Energiesatz erfüllt werden. In der Praxis werden sich die Felder oft oder meistens nicht überschneiden, was auf Fehler, falsche Annahmen und Inkonsistenzen bei der Rekonstruktion hindeutet und auf Plausibilität überprüft werden muss.

5.2.6 Band-Schnittverfahren

Das Band-Schnittverfahren wird zur Bestimmung der Kollisionsgeschwindigkeiten bei eindimensionalen Fahrzeug-Fahrzeug-Kollisionen (d. h. geraden zentrischen Stößen wie Heckkollisionen oder Frontalkollisionen) angewendet [Schimmelpfennig 82/2, 83]. Vor-

Abb. 5.14 Erweitertes Rhomboid-Schnittverfahren zur Eingrenzung der Lösungsfelder ($K = B = KO$)



aussetzung für die Anwendbarkeit ist, dass der Restitutionskoeffizient vernachlässigt werden kann (vollplastischer Stoß), dass die Auslaufgeschwindigkeiten v_1' und v_2' (wegen $k=0$) bestimmbar sind und dass die Gesamt-Deformationsenergie W beider Fahrzeuge aus den Beschädigungen ableitbar ist. Gemäß Abb. 5.15 ergeben sich die nachfolgenden Ableitungen.

Impulssätze:

$$m_1 \cdot (v_1' - v_1) = -P$$

$$m_2 \cdot (v_2' - v_2) = +P .$$

Impulserhaltungssatz durch Addition:

$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = (m_1 + m_2) \cdot v' \quad (k = 0, \text{ d. h. } v_1' = v_2' = v') .$$

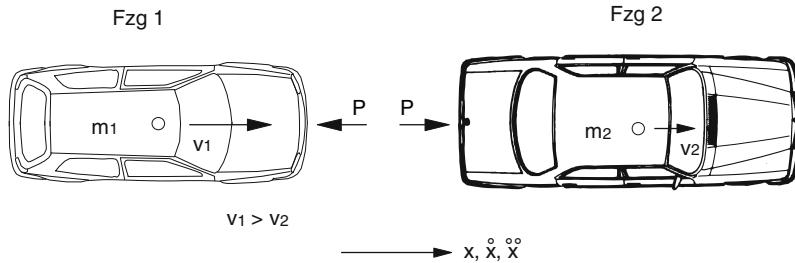


Abb. 5.15 Schematische Darstellung eines Auffahrunfalls

Energiesatz beim Stoß:

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \cdot (v_1 - v_2)^2 \quad (k = 0) \quad W = W_{\text{Def}} .$$

Arbeitssatz beim Auslauf:

$$\frac{1}{2} \cdot (m_1 + m_2) \cdot v'^2 = (m_1 + m_2) \cdot a' \cdot s' .$$

Mit den beiden Erhaltungssätzen für den Impuls und die Energie beim Stoß können zwei Gleichungen für die beiden unbekannten Kollisionsgeschwindigkeiten formuliert werden. Zur grafischen Lösung werden die Gleichungen als Funktion $v_1 = f(v_2)$ umgestellt. Die gemeinsame Geschwindigkeit v' nach dem Stoß muss aus den Auslaufbewegungen ableitbar, also bekannt sein. Andernfalls ist das Verfahren nicht anwendbar.

Aus dem Impulssatz für den plastischen Stoß folgt:

$$v_1 = \frac{(m_1 + m_2)}{m_1} \cdot v' - \frac{m_2}{m_1} \cdot v_2 .$$

Diese Gleichung einer Geraden wird in das Diagramm $v_1 = f(v_2)$ eingetragen, s. Abb. 5.16. Es ist hier angenommen worden, dass es sich um einen Auffahrunfall handelt ($v_1 > v_2$, beide positiv). Der Schnittpunkt der Impulssatz-Geraden mit der v_1 -Achse ($v_2 = 0$) berechnet sich wie folgt:

$$v_1 = \frac{(m_1 + m_2)}{m_1} \cdot v' .$$

Die Steigung der Geraden wird durch das Massenverhältnis m_2 / m_1 vorgegeben, sie ist negativ.

Aus dem Energiesatz $E_{\text{vor}} = E'_{\text{nach}} + W$ folgt für einen plastischen Stoß:

$$v_1 = v_2 + \sqrt{2 \cdot W_{\text{Def}} \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2}} .$$

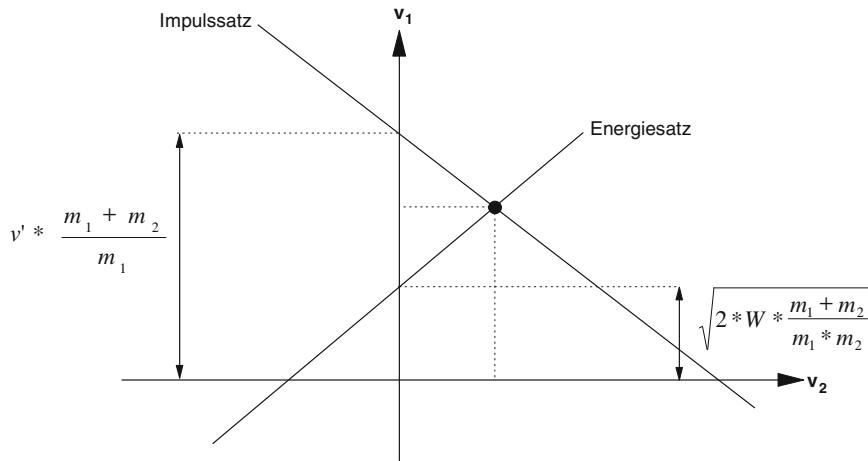


Abb. 5.16 Anwendung des Band-Schnittverfahrens für eine Auffahrkollision

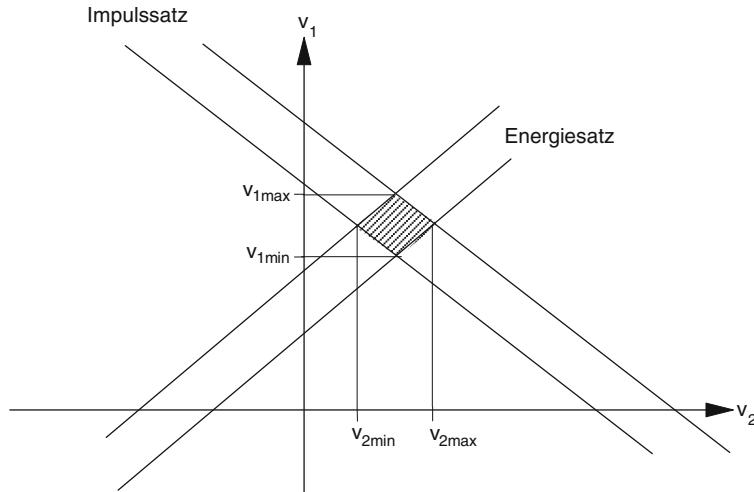


Abb. 5.17 Anwendung des Band-Schnittverfahrens mit Toleranzfeldern für eine Auffahrkollision

Diese Gerade hat stets die Steigung 1 bzw. bei gleichem Maßstab der Achsen einen Steigungswinkel von 45°. Für $v_2 = 0$ ergibt sich der Schnittpunkt mit der v_1 -Achse bei

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot W \cdot \frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2}}.$$

Der Schnittpunkt der beiden Geraden gibt die Lösung der unbekannten Geschwindigkeiten, siehe Abb. 5.17. Durch Einführung von Toleranzen werden nun diese Geraden zu Bändern, da sich bei jeweils gleicher Steigung ein oberer und ein unterer Schnittpunkt

an den Achsen ergibt. Die Schnittfläche dieser beiden Bänder bildet ein Parallelogramm, welches den Lösungsbereich der Einlaufgeschwindigkeiten beschreibt. Die Abb. 5.16 und 5.17 zeigen das Band-Schnittverfahren für das Beispiel einer Auffahrkollision, wodurch das Lösungsfeld im positiven Geschwindigkeitsbereich von Fahrzeug 2 liegt. Bei einer Frontalkollision wäre v_2 nach Abb. 5.15 negativ. Die Lösungen lägen in Abb. 5.16 und 5.17 im zweiten Quadranten.

5.3 Rechnerische Rekonstruktionsverfahren

Seit Beginn der siebziger Jahre sind eine Reihe von Programmsystemen zur rechnerischen, rechnergestützten Unfallrekonstruktion entwickelt worden. Dabei erfolgt die Ergebnisausgabe üblicherweise in grafischer Darstellung als zeitlicher Verlauf charakteristischer Größen, als Bewegungsschrittfolgen von Konturen oder als Animationen des Bewegungsablaufes am Bildschirm. Wegen zunehmender Rechnerleistung können die Programme heute auf üblichen PC ablaufen. Die Programme verknüpfen Einlauf-, Kollisions- und Auslaufphase. Einlauf- und Auslaufphase werden in Vorwärtsrechnung behandelt, indem die Bewegungsgleichungen schrittweise integriert werden, die Kollisionsphase wird bei höchsten Ansprüchen als Vorwärtsrechnung mit Integration der Kraftgleichungen, üblicherweise aber als Vorwärts- oder auch Rückwärtsrechnung mit formelmäßiger Auswertung der Stoßgleichungen behandelt.

In den USA wurde im Jahre 1973 von McHenry [McHenry 73, McHenry 75] das erste derartige Vorwärts-Rechenprogramm entwickelt. Das Programm SMAC gilt als Vorläufer aller nachfolgenden Programmsysteme. Die Kollisionsphase wird über Kraftgleichungen beschrieben. Die kollidierenden Fahrzeuge werden durch ein ebenes Modell mit drei Freiheitsgraden als starre Scheiben dargestellt, die mit einem Mantel isotropen homogenen Materials mit elastisch-plastischem Verhalten umgeben sind. Die Modelle besitzen die Form eines Rechtecks, dessen Kontur durch diskrete Punkte unter Verwendung von Kraftvektoren beschrieben wird. Ergänzt bzw. abgelöst wurde SMAC später durch CRASH in verschiedenen Ausführungsstufen, z. B. durch CRASH3 als aktuelle Version des CRASH-Programmes [Struble 87].

Die weiterentwickelte MS-WINDOWS®-Applikation von CRASH3 ist das Programmsystem EDCRASH [EDCRASH 97, Danne 99]. Gegenüber CRASH sind die wesentlichen Vorteile eine verbesserte Benutzungsoberfläche und die grafische Ergebnisinterpretation. Es existieren verschiedene Module, so für die Vorwärtssimulation von Einlauf, Kollision und Auslauf und für die Rückwärts-Rekonstruktion der Kollisionsphase.

Das Programm ist durch folgende Ausprägungen gekennzeichnet:

- Stoß- oder Kraftrechnung der Kollisionsphase
- Anwendung für Alleinunfälle, Fahrzeug-Fahrzeug-Unfälle, Gespann-Unfälle
- zweidimensionale Behandlung und Darstellung

- Ermittlung der Geschwindigkeitsänderungen anhand von Schäden bzw. Deformationsenergien steht am Anfang
- sowohl Rückwärts- als auch Vorwärtsrechnung je nach Verfügbarkeit von Daten
- Berücksichtigung von Deformationen mit linearen Steifigkeiten der Karosserien bei der Deformationsanalyse
- Berücksichtigung von Auslaufpositionen und Einlaufrichtungen bei der Impulsanalyse
- Anwendung zuerst des Impulssatzes für den zentralen, geraden und vollplastischen Stoß, danach Korrekturen für den exzentrischen und schießen Stoß
- lediglich Berücksichtigung des verhakten Stoßes
- Anwendung des Energiesatzes, Berechnung von Verformungsarbeiten
- Benutzung von EES
- äußere Kräfte (Reifen-, Steigungs-, Luftkräfte) werden in der Kollisionsphase vernachlässigt.

Heute werden mehrere kommerziell verfügbare, modular aufgebaute, unter WINDOWS® laufende Programmsysteme zur Unfallrekonstruktion angeboten bzw. benutzt:

- ANALYSER PRO [Gronau 97, Gratzer 00]: Programmsystem mit Modulen zur Behandlung von kinematischen Analysen (Vermeidbarkeit, Überholmanöver, Abbiegevorgang, Fußgängerunfall), Kollisionsphase bei Fahrzeugkollisionen einschließlich Auffahrunfall in Vorwärts- und Rückwärtsrechnung, dabei Anwendung der Stoßgleichungen mit Verhakungs- oder Gleitstoß, Ausnutzung der EES. Implementation einer Datenbank.
- CARAT [Gnadler 86, Burg 99/1, 99/2, 00]: Simulation der Fahrzeudynamik unter Berücksichtigung von Reifeneigenschaften, Fahrbahnzustand, Antrieb, Fahrermodell, drei oder sechs Freiheitsgrade, Animation über Drahtgitter oder Flächenmodell, Ergänzung zu ANALYSER PRO.
- Das Programmsystem D.A.A.D. [Plankensteiner 94] wird nicht kommerziell angeboten.
- PC-CRASH [Steffan 93, 94, Moser 97, 98/1, 98/2, Gronau 98, PC-Crash 98, Danne 99]. Exemplarisch soll hier auf einige Ausprägungen bzw. Module von PC-CRASH näher eingegangen werden:
 - Anwendung auf Fahrzeug-Allein-, Fahrzeug-Fahrzeug-, Zweirad-, Anhängergergespann-, Fußgänger-Unfälle und Insassenbewegungen,
 - grafische Animation,
 - zwei- und dreidimensionale Behandlung bzw. Darstellung, Unfallanimation aus Sicht von Insassen,
 - neben Unfallrekonstruktion auch Vermeidbarkeitsbetrachtungen und fahrdynamische Untersuchungen möglich,
 - vorrangig Vorwärtsrechnung mit Stoßgleichungen für die Kollisionsphase, Abschätzung und Darstellung von möglichen Einlaufparametern, Ermittlung der Auslaufbewegungen und Endlagen, Abgleich durch iteratives Vorgehen,
 - auch klassische Rückwärtsrechnung möglich,

- Benutzung von Impulssatz, Drehimpulssatz, Stoßzahl, Verhakungs- und Gleithypothese bei der Kollisionsberechnung,
- großer Einfluss der Kollisionsstellung, des Kollisionspunktes, des Kollisionsortes und der Massenträgheitsmomente,
- Vorgabe sowie Berechnung der EES (zu Kontrollzwecken), dazu Annahme linearer Kraft/Weg-Kennungen der Fahrzeugstruktur,
- automatische Optimierung der Stoßeinlaufparameter unter Verwendung von Auslaufspuren und Endlagen [Moser 98/2],
- Fortschreibung einer Unfallrekonstruktions-Datenbank mit Beispielfällen [Moser 97],
- Behandlung von Mehrkörpersystemen, dadurch auch Berücksichtigung von Kollisionen mit Fußgängern möglich.

5.4 Anmerkungen und Ergänzungen zu den vorgestellten Rekonstruktionsverfahren

Den bisher vorgestellten Rekonstruktionsverfahren, seien sie grafisch oder rechnerisch, liegen jeweils andere Eingangsdaten (Spuren) zur Bestimmung der gesuchten Größen zu Grunde. Neben der Unfall- und Kollisionsart bestimmt meistens die Verfügbarkeit von Eingangsdaten über das zu wählende Rekonstruktionsverfahren. Die wichtigsten Eingangsdaten sind zweifellos die Auslaufimpulse nach Größe und Richtung. Bei den grafischen Verfahren erfordert die stufenweise Einengung der Lösung beim Übergang vom einfachsten bis zum differenziertesten Verfahren (Impuls-Spiegel- bis zum erweiterten Rhomboid-Schnittverfahren) jeweils zusätzliche Eingangsdaten. In Tab. 5.5 und 5.6 sind diese Eingangsdaten für die einzelnen Verfahren zusammengestellt.

Zu den in den Abschn. 5.2 und 5.3 vorgestellten rechnerischen und grafischen Rekonstruktionsverfahren, die als Basisverfahren gelten, sind weitere Abwandlungen und Erweiterungen hinzugekommen. Einige der Verfahren sollen hier genannt werden.

Für Kollisionen zwischen Fahrzeugen mit sehr unterschiedlicher Masse wird in [Schimmelpfennig 89] das „Tangentialkomponenten-Verfahren“ entwickelt. Ausgenutzt wird die Erfahrung bzw. Hypothese, dass das leichtere Fahrzeug (z. B. Motorrad gegenüber Pkw) keinen nennenswerten Einfluss auf das Ergebnis hat und dass seine tangentiale Geschwindigkeits-Komponente gegenüber dem Kontrahenten erhalten bleibt.

In [Schimmelpfennig 91] wird ein „Energie-Doppelring-Verfahren“ für Anwendungen vorgestellt, bei denen die Definition des fahrzeugbezogenen Kontaktpunktes dadurch erschwert ist, dass gleitende Stöße mit ausgedehnten Kontaktzonen vorliegen. Eine implizite Verwendung des Kontaktpunktes wird vermieden.

Die „Verzögerungs-Substitutions-Methode“ [Kalthoff 00] bezieht sich auf Fz/Fz-Frontalkollisionen, bei denen eines der Fahrzeuge vor der Kollision schleudert. Die Kollisionsgeschwindigkeiten können ohne Kenntnis der Verzögerungswerte im Ein- und Auslauf

Tab. 5.5 Eingangsdaten (gegeben, gesetzt) für grafische Verfahren zur Kollisionsanalyse

		Antriebs- Balance	Impuls- Spiegel	Drehimpuls- Spiegel	Energie-Ring	Rhomboid	Rhomboid erweitert
Fahrzeug	Massen	X	X	X	X	X	X
	Trägheitsmomente	-	-	X	X	X	X
	Schwerpunktlagen	X	X	X	X	X	X
	Radstände	-	-	X	-	X	X
Spuren	Kontaktpunkt	-	-	X	X	X	X
	Kollisionsort	X	X	X	X	X	X
	Einlaufrichtungen	X	X	X	X	X	X
	Einlaufgeschwindigkeiten	-	-	-	-	-	-
WDef	Auslaufimpulse	X	X	X	X	X	X
	Auslaufdrehimpulse	-	-	X	-	X	X
	Restitutionskoeff.	-	-	-	X	-	X
	EES ₁ , EES ₂	-	-	-	X	-	X
Kontaktzone	Richtung Stoßantrieb	-	-	-	-	-	-
	Reibziffer für Kontaktzone	-	-	-	-	-	-
	Deformationskräfte in der Kontaktzone	-	-	-	-	-	-

Tab. 5.6 Eingangsdaten (gegeben, gesetzt) für rechnerische Verfahren zur Kollisionsanalyse

		Band-schnitt	EES	Vorwärts-Stoßrechnung	Vorwärts-Kraftrechnung
Fahrzeug	Massen	X	X	X	X
	Trägheitsmomente	-	-	X	X
	Schwerpunktlagen	X	X	X	X
	Radstände	-	-	X	X
	Kontaktpunkt	-	-	X	X
Spuren	Kollisionsort	X	X	X	X
	Einlaufrichtungen	X	eine	X	X
	Einlaufgeschwindigkeiten	-	-	X	X
	Auslaufimpulse	X	X	-	-
	Auslaufdrehimpulse	-	-	-	-
Kontaktzone	Restitutionskoeff.	-	-	X	-
	W_{Def}	X	X	-	-
	EES_1, EES_2	-	X	-	-
	Richtung Stoßantrieb	X	-	X	-
	Reibziffer für Kontaktzone	-	-	X	-
	Deformationskräfte in der Kontaktzone	-	-	-	X

ermittelt werden. Sie werden erst nachträglich berechnet und dienen somit zur Überprüfung der Plausibilität des Ergebnisses.

In [Pfeufer 00] wird richtigerweise darauf verwiesen, dass die Grundlage aller Rekonstruktionsverfahren auf der Impuls-, Drehimpuls- und Energieerhaltung beim Stoß beruht. Dies ist dadurch begründet, dass die Stoßkräfte und damit die Stoßantriebe innere Kraftgrößen sind und sich daher nach außen nicht auswirken. Daraus ergibt sich wiederum der Vorteil, dass der Ablauf der Kollision im Einzelnen nicht zu interessieren braucht, da über die Erhaltungssätze bei Kenntnis gewisser physikalischer Größen nach dem Stoß auf den physikalischen Zustand vor dem Stoß – oder aber umgekehrt – geschlossen werden kann. Ob letztlich eine Vorwärts- oder Rückwärts-Rekonstruktion durchgeführt wird, ist gleichgültig.

Die Stoßkraft ist innerhalb der Stoßrechnung eine Reaktionskraft, innerhalb der Kraftrechnung aber, da sie als Kontaktkraft an deformierbaren Strukturen wirkt, eine eingeprägte Kraft, d. h. sie kann Deformationsarbeit leisten. Arbeitssatz und Energiesatz basieren auf der Kraftrechnung. Damit löst sich der formale Widerspruch auf, dass ergänzend zu den Stoßgleichungen die Deformationsgrößen W_{Def} oder EES als Zusatzbedingungen hinzutreten können.

Die Rückwärtsanalyse ist die klassische Methode der Kollisionsanalyse [Gratzer 00]. Bei Gegenverkehrs- und Auffahrunfällen, d. h. bei geraden zentrischen oder exzentrischen Stößen, ist die alleinige Anwendung von Impulsgleichungen problematisch, weil geringe

Winkeländerungen wegen schleifender Schnitte zu großen Ergebnisschwankungen führen. Beim EES-Verfahren [Burg 80/1, 80/2, Zeidler 84, Koob 86, 91] wird durch Einbeziehung des Energiesatzes eine weitere Bestimmungsgleichung gewonnen, so dass nur die Richtung eines Einlaufimpulses gegeben sein oder vorgegeben werden muss. Die Lösungsformeln für die Beträge der Einlaufgeschwindigkeiten, hergeleitet unter Ausnutzung der Impulsgleichung und des Energiesatzes, können in der angegebenen Literatur nachgelesen werden. Sie enthalten folgende Eingangsparameter:

$$\alpha_2, m_1, m_2, v'_1, v'_2, \alpha'_1, \alpha'_2, \text{EES}_1, \text{EES}_2 \\ (\alpha_i \text{ Winkel des Impulses } i \text{ zu einer Bezugsrichtung}) .$$

Im Falle eines nahezu kolinearen Stoßes entfällt die Abhängigkeit von Winkeln und Winkeldifferenzen, da ihr Sinus Null und ihr Cosinus Eins wird. Für diesen Fall ist im Abschn. 5.1.1 die formelmäßige Lösung angegeben.

5.5 Einflüsse auf die Qualität von Rekonstruktionsergebnissen

Die heute üblichen Rekonstruktionsmethoden benutzen die Stoßtheorie für die Kollisionsanalyse. Unabhängig von davon ob die Rückwärtsrechnung oder Vorwärtsrechnung verwendet werden, muss die Kollisionsphase auf einen Zeitpunkt reduziert werden und die Stoßkräfte im Stoßpunkt „gebündelt“ werden. Die richtigen Annahmen für Kollisionsstellung, Stoßpunkt, Restitutionskoeffizient etc. sind insofern entscheidend in Bezug auf die Qualität der Rekonstruktionsergebnisse. Unabhängig von der Wahl der Rekonstruktionsmethode kann das Rekonstruktionsergebnis nur so gut sein wie die vorgefundenen Anknüpfungstatsachen sowie die Qualität der getroffenen Annahmen. In Parametervariationen in Bezug auf Restitutionskoeffizient, Stoßpunkt und Reibung zwischen den Kollisionspartnern in der Kollisionsphase wurden die theoretischen Einflüsse der Parameter bestätigt [König 08]. Hierbei ist der Reibbeiwert nur dann von Bedeutung, wenn die tangentiale Komponente des Stoßantriebs vom Betrag größer ist, als die maximal übertragbare Reibkraft. Der Reibbeiwert spielt also bei Kollisionen mit Abgleiten eine große Rolle bzw. kann in der Rekonstruktion den Unterschied zwischen Verhaken und Abgleiten ausmachen.

Die Nutzung der rechnergestützten Simulationsprogramme entbindet wegen eines automatisierten Ablaufes nicht von Sachverstand und Erfahrung auf dem Gebiet der Unfallrekonstruktion. Im Gegenteil, der Sachverständige muss die schwierigsten Aufgaben der Unfallrekonstruktion weiter selbst bearbeiten, z. B. den Unfall strukturieren, die Spuren werten, die Startwerte zutreffend eingrenzen, das geeignete Programmsystem wählen und die Ergebnisse auf Plausibilität prüfen [Danne 99]. Die Programme sind als Hilfsmittel zur Rekonstruktion zu betrachten, die die Berechnung qualitativ verbessern und beschleunigen, die das Durchspielen von Varianten erlauben und die die Abläufe und Ergebnisse veranschaulichen. Routinearbeiten werden abgenommen, aber für die Angemes-

senheit und Güte der Rekonstruktion sowie die Interpretation der Ergebnisse bleibt der Anwender verantwortlich. Gerade der Umstand, dass der Prozess der Rekonstruktion automatisiert abläuft, entlastet den Rekonstrukteur nicht vom physikalischen Nachvollziehen. Andernfalls kann ein deutlich fehlerhaftes Ergebnis mit einer Scheingenaugkeit vorgötäuscht werden.

Zur Untersuchung der Streubreiten von Rekonstruktionsergebnissen, die für gleiche Unfälle von verschiedenen Sachverständigen erzielt werden, wurde auf einer EVU-Tagung vorgetragen [Wagner 00]. Da es sich bei den realitätsnahen Unfällen (Auffahr-, Kreuzungs- und Gegenverkehrsunfall) um vorher durchgeführte Kollisionsversuche handelte, waren die gesuchten Ergebnisse – Einlaufgeschwindigkeiten und Kollisionspunkte/-orte/-stellungen – im Prinzip bekannt. Sie wurden den befragten Sachverständigen aber erst später mitgeteilt. Nicht alle Spuren wurden den Rekonstrukteuren mitgegeben, um die oft unzureichende Dokumentation der Unfalldaten zu berücksichtigen. Das benutzte Rekonstruktionsverfahren wurde freigestellt.

Bei insgesamt 63 durchgeführten Rekonstruktionen ergaben sich nicht unerhebliche Abweichungen, sowohl bei den Geschwindigkeiten als auch bei den Kollisionsorten und Kollisionsstellungen. Beim Nachvollziehen der Rekonstruktionen konnte nachgewiesen werden, dass auch bei stark von den Versuchsbedingungen abweichenden Kollisionsstellungen und Kollisionsgeschwindigkeiten eine gute Abbildung der Endstellungen erreicht werden konnte. Die Lösung einer Vorwärts-Rekonstruktion braucht also offensichtlich nicht eindeutig zu sein. Hierin zeigt sich eine Gefahr der rezeptartigen Benützung von Rekonstruktionsprogrammen. Durch die zahlreichen Möglichkeiten, unterschiedlich abgeschätzte Eingangsparameter einzugeben, ist es möglich, auch mit einer Kombination von falschen Werten weitgehend richtige Ergebnisse zu erreichen. Es kommt daher immer, und das in besonderem Maße bei der Nutzung rechnergestützter Verfahren, auf eine kritische, ganzheitliche Plausibilitätsprüfung an.

Zu einem vergleichbaren Ergebnis kam König [König 08]. Auf Basis von durchgeführten Kreuzungscrashversuchen wurden die Eingangsgeschwindigkeit im Verhältnis zu den bekannten Größen aus dem Versuch falsch gesetzt und mit Hilfe technisch sinnvoller Änderungen in Bezug auf Stoßpunkt, Reibwerte in der Kollisionsphase, Reibwerte im Auslauf, Größe des Restitutionskoeffizienten und Schwerpunktlage der Fahrzeuge anscheinend gut bis sehr gute Ergebnisse bei der Rekonstruktion erzielt. Teilweise ergaben sich nicht einmal Indizien für fehlerhafte Annahmen. Des Weiteren wurde der Kollisionsort nicht geändert. Dieser ist in der Regel jedoch nicht ohne Toleranzen bekannt, Gratzer [Gratzer 07] beziffert die Toleranz mit 0,5 m in Querrichtung, in Längsrichtung sei mit größeren Abweichungen zu rechnen.

Abschließend soll gezeigt werden, dass auch mit relativ wenigen Anknüpfungstatsachen gute Rekonstruktionsergebnisse erzielt werden können. In dem vorliegenden Fall kollidierte ein Pkw seitlich mit einem Straßenbaum. Abgesehen von Fotos vom Einsatzort (siehe Abb. 5.18) stand nur das Unfallfahrzeug sowie der Baumumfang zur Verfügung.

Abb. 5.18 Foto der Unfallstelle im Beispelfall [Feuerwehr 11]



Abb. 5.19 Vergleich Unfallfahrzeug und Versuchsfahrzeug

Die Kollisionssituation wurde mit Hilfe von Expertenschätzungen und Rekonstruktionsprogrammen wie folgt abgeschätzt:

- Kollisionsgeschwindigkeit: 56 km/h
- Kollisionswinkel: 60° (90° entspräche einer reinen Seitenkollision)

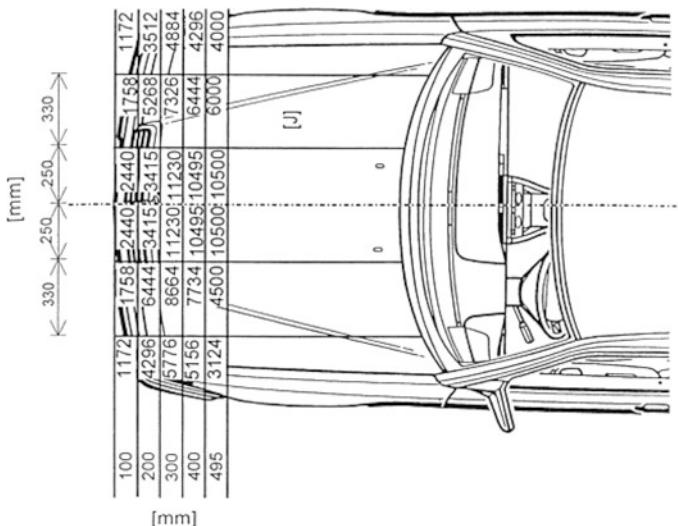
Hierfür wurden die Beschädigungen des Unfallfahrzeugs genutzt und der Abstand zwischen Baum und Endstellung des Pkw abgeschätzt und die Tatsache berücksichtigt, dass

die Fahrertür und die Hinterachse unbeschädigt geblieben sind. Im Rahmen der Paarung von Verletzungsschwere aus Unfällen mit Messwerten von Dummies zur Bestimmung von Verletzungsrisikofunktionen wurde der Unfall auf einer Crashanlage nachgestellt. Der Vergleich zwischen Unfallfahrzeug und Versuchsfahrzeug zeigt eine gute Übereinstimmung der Deformationen (siehe Abb. 5.19), obwohl wichtige Anknüpfungstatsachen fehlten bzw. nur ungenau vorlagen, z. B. die Endlage des Pkw.

Es wurden jedoch im Zusammenhang der Paarung von Verletzungen und Dummymesswerten auch viele Rekonstruktionsversuche durchgeführt, die den Unfallablauf nicht hinreichend genau wiedergaben.

Anhang

Energieraster von Fahrzeugen beim Frontalaufprall, unterschiedliche Massen, unterschiedliche Motoranordnungen (informelle Angaben der Fa. MB ca. 1990)

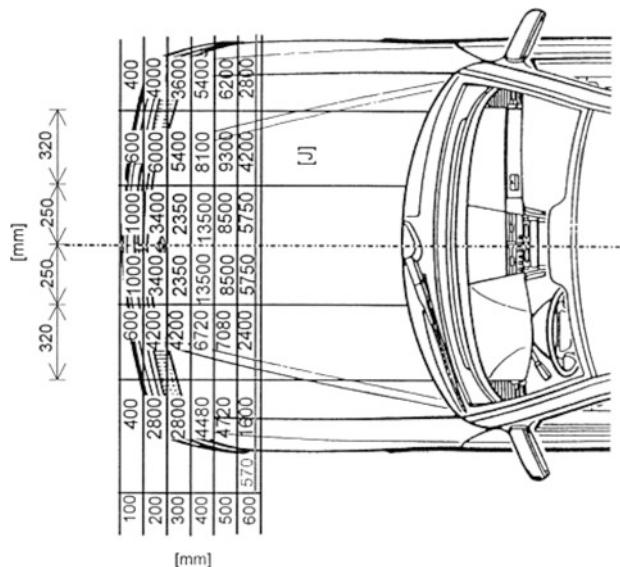


Masse: 1803 kg

Motor: R6

v_0 , EES: 48,5 km/h

E_{kin} : 164 kJ

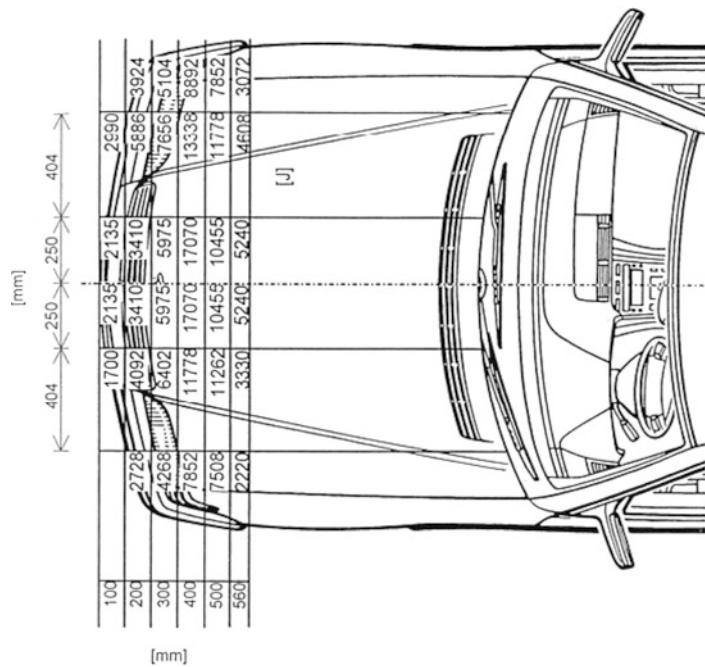


Mass: 1782 kg

Motor: V6

v_0 , EES: 49,3 km/h

E_{kin} : 167 kJ

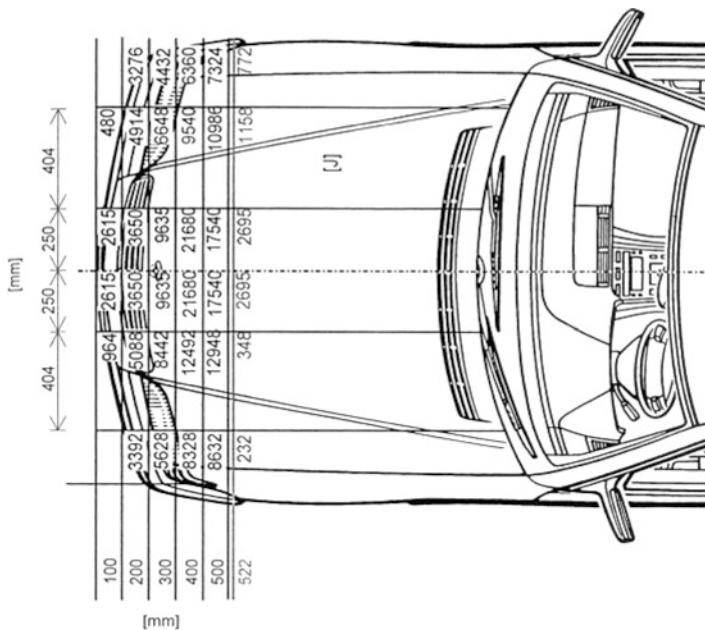


Mass: 2440 kg

Motor: V8

v_0 , EES: 49,1 km/h

E_{kin} : 227 kJ



Mass: 2602 kg

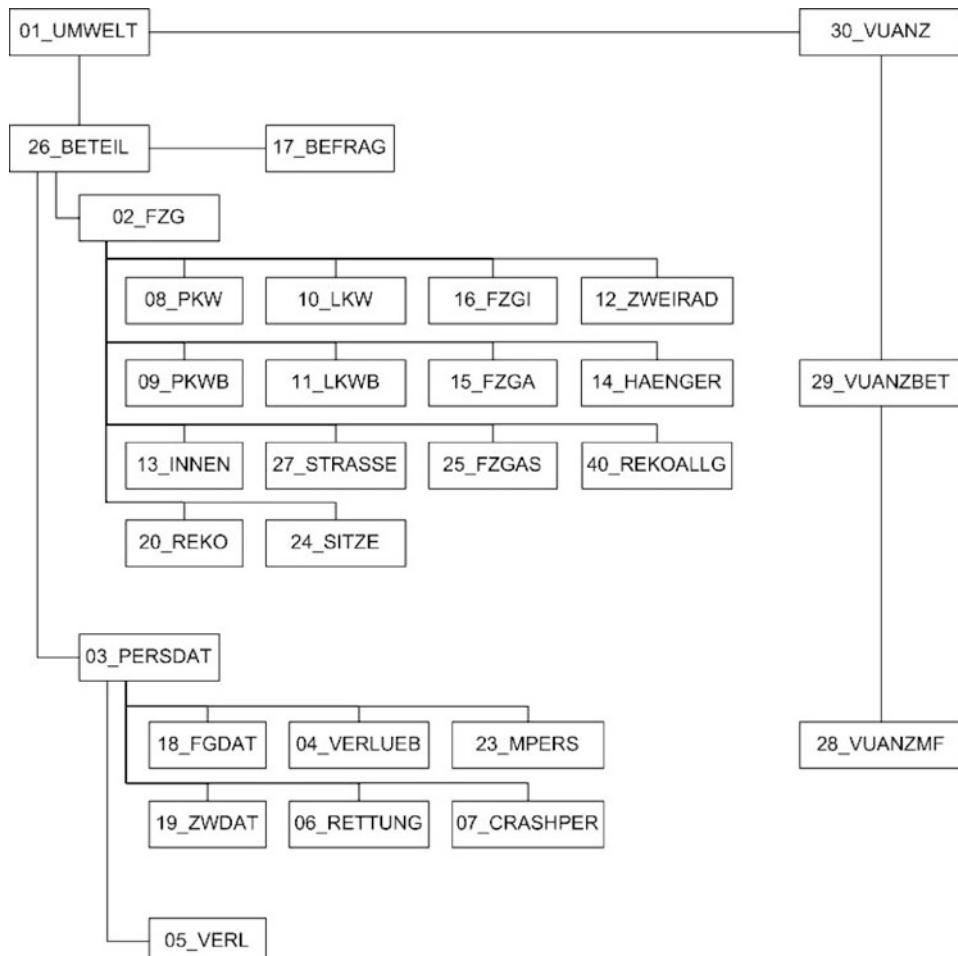
Motor: V12

v_0 , EES: 48,7 km/h

E_{kin} : 238 kJ

Ausgewählte Erhebungsbogen der Verkehrsunfallforschung Hannover

Hierarchie der Datenbank GIDAS



Ausgewählte Erfassungsmasken

Unfallstelle

*Fallnummer	<input type="text"/>	x ==> unbekannt	
Polizeirevier	<input type="text"/>	h ==> Hilfe	
Gemeinde	<input type="text"/>		
Ortschlüssel	<input type="text"/>		
GPS-Koordinate nördliche Breite	<input type="text"/>	bitte in Dezimal-Grad mit Komma und 6 Nachkommastellen, Beispiel 52,382771	
GPS-Koordinate östliche Länge	<input type="text"/>	bitte in Dezimal-Grad mit Komma und 6 Nachkommastellen, Beispiel 09,809333	
1. Straße - Straßennname	<input type="text"/>	Check GPS	
1. Straße - Kommentar	<input type="text"/>		
2. Straße - Straßennname	<input type="text"/>		
2. Straße - Kommentar	<input type="text"/>		
Anzahl Beteiligte	<input type="checkbox"/> Fahrzeuge	<input type="checkbox"/> Personen	<input type="checkbox"/> Verletzte
Ortslage	<input type="text"/>		
Tageszeit	<input type="text"/>		
Verkehrsstufe	<input type="text"/>		
Bushaltestelle am Unfallort	<input type="text"/>		
Einfluss Bushaltestelle	<input type="text"/>		
Zugang Bushaltestelle	<input type="text"/>		
Straßenbahnhaltestelle am Unfallort	<input type="text"/>		
Einfluss Straßenbahnhaltestelle	<input type="text"/>		
Zugang Straßenbahnhaltestelle	<input type="text"/>		
U-, S-Bahnhaltestelle	<input type="text"/>		
Einfluss U-, S-Bahnhaltestelle	<input type="text"/>		
Umgebung	<input type="text"/>		
Unfallstelle im Straßennetz	<input type="text"/>		
Lichtzeichenanlage	<input type="text"/>		
Funktion Lichtzeichenanlage	<input type="text"/>		
Verkehrsregelung	<input type="text"/>		
Niederschlag	<input type="text"/>		
Niederschlagsrate	<input type="text"/>		
Temperatur	<input type="text"/>		

Unfallfahrzeug

Fall	<input type="checkbox"/> Beteiliger	<input type="checkbox"/> Vorgangs-Nr.:	<input type="checkbox"/>
Nummer der Kollision	<input type="checkbox"/> Vorgänge ohne Koll. nicht mitzählen		
Kollisionskontinent Beteiligter	<input type="checkbox"/> VDI Fahrzeugteil:		
Kollisionskontinent - Objekt			
Durchmesser in cm			
Abstand von Fahrbahn (cm)			
Grabentiefe in cm			
Wasserfüllung des Grabens			
Ort der Schutzplanke			
Kollisionsart mit Schutzplanke			
Art der Schutzplanke			
Elementlänge in cm			
Abstand der Platten in cm			
Höhe der Schutzplanke in cm			
Benutzhöhe der Schutzplanke			
Deformationshöhe der Schutzplanke			
Vorgangs-Nr. beim Gegner			
Berührpunkt in X in cm	[cm]		
Berührpunkt in Y in cm	[cm]		
Berührpunkt in Z in cm	[cm]		
wenn Zweirad, hier klicken			
VDI Richtung	<input type="checkbox"/> Stoß aus ... Uhr		
VDI Fag-Teil	<input type="checkbox"/>		
VDI horizontal	<input type="checkbox"/>		
VDI vertikal	<input type="checkbox"/>		
VDI Anprallart	<input type="checkbox"/>		

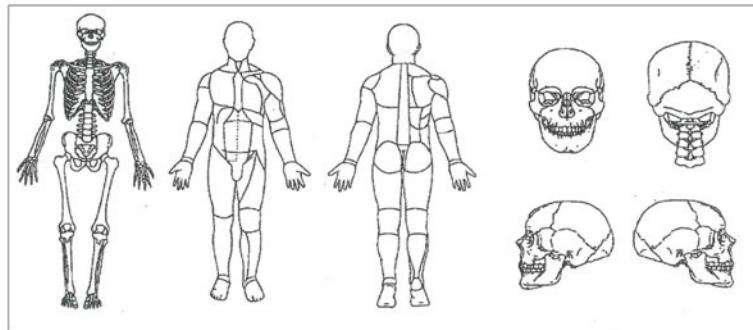
Front oder Heck

Seite

Fall	<input type="text"/>	Beteiligter	<input type="text"/>	Fahrzeug zerissen	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	x ==> unbekannt h ==> Hilfe
Zone	0	1	2	3	4	alle Maßangaben in cm
RA	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
RB	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
RC	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
F1	<input type="text"/>					H1 <input type="text"/> Dach:
F2	<input type="text"/>					H2 <input type="text"/> D1 rechts vom <input type="text"/> D3 hinten <input type="text"/>
F3	<input type="text"/>					H3 <input type="text"/> D2 links vom <input type="text"/> D4 hinten <input type="text"/>
F4	<input type="text"/>					H4 <input type="text"/>
LA	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
LB	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
LC	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Zone der maximalen Def.	in cm:	<input type="text"/>				
Abstand max. Deformation von vorn in cm		<input type="text"/>				
seitl. Abstand von der Fzg. Längsachse (links negativ)		<input type="text"/>				
Deformationsstellen von der Seite, gemessen in Höhe des Fahrer hinter links	<input type="text"/>	Befahrer hinter rechts <input type="text"/>				

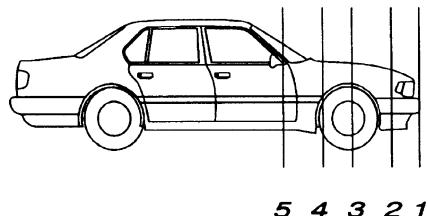
Fall	<input type="text"/>	Beteiligter	<input type="text"/>	Pk	<input type="text"/>	Nr.	<input type="text"/>	ID	<input type="text"/>	ID neu oder geändert	x ==> unbekannt
										Update AIS und Co.	h ==> Hilfe
Diagnose Klarheit	<input type="text"/>	Therapie	<input type="text"/>								
Einschätzung Diagnose	<input type="text"/>	Therapie 2	<input type="text"/>								
Sitz der Verletzung	<input type="text"/>	Therapie 3	<input type="text"/>								
rechts - links	<input type="text"/>	Komplikation	<input type="text"/>								
vom - hinten	<input type="text"/>										
proximal-distal	<input type="text"/>										
innen - außen	<input type="text"/>										
Art der Verletzung	<input type="text"/>	Verletzungsverursachende Teile:	<input type="text"/>								
Ausmaß Verbrennung in %	<input type="text"/>	1. Teil	<input type="text"/>								
Ausmaß der Verletzung	<input type="text"/>	1. Teil A	<input type="text"/>								
AO-Klassifikation	<input type="text"/>	1. Teil B	<input type="text"/>								
AO-Kinder bis 14	<input type="text"/>	Beurteilung 1.	<input type="text"/>								
Klassifikation nach	<input type="text"/>	2. Teil	<input type="text"/>								
Verletzung Rückenmark	<input type="text"/>	2. Teil A	<input type="text"/>								
Verletzung Nerven	<input type="text"/>	2. Teil B	<input type="text"/>								
Klassifikation Wirbelverletzung	<input type="text"/>	Beurteilung 2.	<input type="text"/>								
Begleiterscheinungen	<input type="text"/>	erl. bei	<input type="text"/>								
Gesamter AIS98-Code	<input type="text"/>	Anprall-Nr.	<input type="text"/>								
Gesamter AIS2005-Code	<input type="text"/>	Intrusion	<input type="text"/>								
		Einklemmung	<input type="text"/>								

Verletzungen

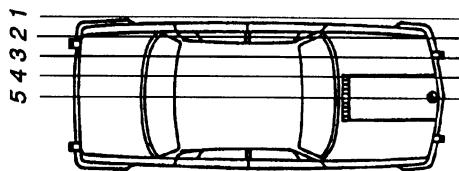


Klassifizierung der Fahrzeugbeschädigung nach dem Gesamtverband der deutschen Versicherungswirtschaft [HUK 94]

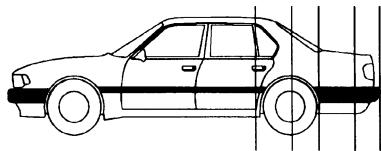
Beispiel für Front



Beispiel für Seite



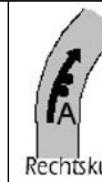
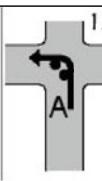
Beispiel für Heck

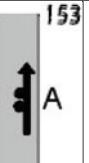
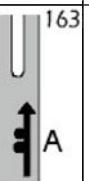


5 4 3 2 1

Der Beschädigungsgrad 1 steht für kleinere Kratzer, Beulen o. ä., 2 = mäßig, 3 = schwer, 4 = extrem, 5 = total.

Auszug aus dem erweiterten Unfalltypenkatalog „Fahrunfall“

Typ 1: Fahrunfall						F
ohne mitwirkende Besonderheiten von Querschnitt und Längsneigung	10		101		102	
	11		111		112	
	12		121		122	
	13		131		132	
	14		141			

Mitwirken von	15 Gefälle/Steigung					159 Straßenverlauf nicht bekannt
	16 Insel					169 Straßenverlauf nicht bekannt
	17 Engpass					179 Straßenverlauf nicht bekannt
	18 Unebenheit					189 Straßenverlauf nicht bekannt
	19 sonstige Fahrunfälle					199 sonstige Fahrunfälle

Literatur

Verwendete Literatur

- [Adolph 12] Adolph, T., Edwards, M., Thomson, R., Stein, M., Lemmen, P., Vie, N., Evers, W., Warke, T.: FIMCAR Deliverable D3.2 Updated Full-Width Test and Assessment Protocol (2012)
- [Anselm 00] Anselm, D., Langwieder, K., Gwehenberger, J.: Neueste Tendenzen der Unfallentwicklung von Lkw. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **2**, 71–80 (2000)
- [Appel 73] Appel, H. und Assistenten: Manuskripte zu den Vorlesungen „Unfallforschung und Unfallmechanik“ und „Biomechanik und Kraftfahrzeugsicherheit“. Technische Universität Berlin (1973 bis 1999)
- [Appel 84/1] Appel, H.: Unfallaufklärung aus technischer Sicht. In: Wagner, H.-J. (Hrsg.) Verkehrsmedizin, S. 423–434. Springer Verlag, Berlin (1984)
- [Appel 84/3] Appel, H. et al.: Mechanik und Biomechanik des Unfalls. In: Wagner, H.-J. (Hrsg.) Verkehrsmedizin, S. 438–466. Springer Verlag, Berlin (1984)
- [Appel 84/4] Appel, H., Wanderer, U., Otte, D., Suren, E.G.: Folgerungen aus einer Systembetrachtung der Unfallanalyse. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **3**, 67–72 (1984)
- [Appel 94] Appel, H., Krabbel, G.: Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion. 1. Aufl. Verlag Information Ambs GmbH, Kippenheim (1994)
- [Appel 98] Appel, H., Krabbel, G.: Grundsätzliches über die Rückhaltung von Insassen im Pkw. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **1**, 9–14 (1998)
- [Appel 99] Appel, H., Deter, T.: Kollisions-Kompatibilität bei Personenkraftwagen erreichen, aber wie? VDI Berichte **1471**, 3–42 (1999)
- [Appel 00] Appel, H., Deter, T.: Crash Compatibility of Passenger Cars Achievable, But How? International Conference on Vehicle Safety 2000. IMECHE Conference Transactions 2000-2, S. 55–68. IMECHE HQ, London, UK (2000)
- [AAAM 98] Association for the Advancement of Automotive Medicine: The Abbreviated Injury Scale – 1990 Update 1998. Des Plaine, IL (USA) (1998)
- [Baker 74] 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)
- [Barbat 05] Barbat, S.: Status Of Enhanced Front-To-Front Vehicle Compatibility Technical Working, Group Research And Commitments. 19th ESV Conference Proceedings Paper Number 05-463 (2005)

- [BASt 09] GIDAS: Den Verkehrsunfällen auf der Spur. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach (2009)
- [BASt 12] Foto der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2012
- [Berg 98/2] Berg, F.A., Walz, F., Muser, M., Bürkle, H., Epple, J.: Implications of Velocity Change Δv and Energy equivalent Speed EES for Injury Mechanism Assessment in Various Collision Configurations. Proceedings IRCOBI Conference Göteborg 1998, S. 57–72. IRCOBI Secretariat Bron, France (1998)
- [Berg 98/2] Berg, F.A., Walz, F., Muser, M., Bürkle, H., Epple, J.: Kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung Δv und Energy Equivalent Speed EES zur Beschreibung der Technischen Unfallschwere in verschiedenen Kollisionskonfigurationen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **10**, 265–272, **11**, 284–288 (1999)
- [BMFT 76] BMFT (Hrsg.): Technologien für die Sicherheit im Straßenverkehr. Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln (1976)
- [Bohlin 67] Bohlin, N.: A Statistical Analysis of 28,000 Accident Cases with Emphasis on Occupant Restraint Value. SAE Technical Paper 670925. doi:10.4271/670925 (1967)
- [Böhm 68] Böhm, F., Hörrz, E.: Der nichtzentrale Stoß von zwei luftbereiften Fahrzeugen. ATZ **70**, 385–389 Teil 1, 428–432 Teil 2 (1968)
- [Brüderlin 41] Brüderlin, A.: Die Mechanik des Verkehrsunfalls bei Kraftfahrzeugen. Verlag zum Elsässer AG, Zürich (1941)
- [Burg 80/1] Burg, H.: Experimenteller Nachweis der Anwendbarkeit der EES-Unfall-Rekonstruktionsmethode und deren Bedeutung für die Unfallforschung und Fahrzeugsicherheit. Diplomarbeit, TU Berlin (1980)
- [Burg 80/2] Burg, H., Zeidler, F.: EES – Ein Hilfsmittel zur Unfallrekonstruktion und dessen Auswirkungen auf die Unfallforschung. Der Verkehrsunfall (4), 75–78 (1980)
- [Burg 81] Burg, H., Rau, H.: Handbuch der Verkehrsunfall-Rekonstruktion. Verlag Information Ambs GmbH, Kippenheim (1981)
- [Burg 84] Burg, H.: Rechnerunterstützte Rekonstruktion von PKW/PKW-Unfällen. Dissertation, TU Berlin (1984)
- [Burg 99/1] Burg, H.: Zum Unterschied zwischen Rückwärts- und Vorwärtsrechnung bei der Kollisionsanalyse. In: Handbuch CARAT Version 3, Grundlehrgang/Seminarunterlagen des Ibb (1999)
- [Burg 99/2] Burg, H.: Kollisionsanalyse in Vorwärtsrechnung. In: Handbuch CARAT Version 3, Grundlehrgang/Seminarunterlagen des Ibb (1999)
- [Burg 00] Burg, H., Golovics, E., Halm, J., Kasanicki, G., Niederer, P.: Simulationsprogramme und Animationstechniken bei der Rekonstruktion von Straßenverkehrsunfällen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 2000(4), 115–120. Auch in: Handbuch CARAT Version 3, Grundlehrgang/Seminarunterlagen des Ibb (1999)
- [Burg 09] Burg, H., Moser, A.: Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion. Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation. 2. Aufl. Vieweg+Teubner, Wiesbaden (2009)
- [Campbell 74] Campbell, K.L.: Energy Basis for Collision Severity. Proceeding 3rd International Conference on Occupant Protection. Troy, Michigan (1974)
- [CHAZ 06] Schueler, F., Adolph, T., Steinmann, K., Mattern, R.: Vom Verletzungsschutz zur Unfallprävention – Eine interfakultative Aufgabe im Forschungsfeld eines Institutes für Rechtsmedizin und Verkehrsmedizin. Chirurgische Allgemeine **7**(4), 184 (2006)

- [Carroll 09] Carroll, J.A., Cuerden, R., Richards, D., Smith, S., Cookson, R., Hynd D.: Cover Deliverable D5.4a – Matrix of serious thorax injuries by occupant characteristics, impact conditions and restraint type and identification of the important injury mechanisms to be considered in Thorax and THOMO (2009)
- [Committee 71] Committee on Medical Aspects of Automotive Safety: Rating the Severity of Tissue Damage. The Abbreviated Injury Scale. The Journal of the American Medical Association **215**, 277–280 (1971)
- [Danne 99] Danne, A.: Vergleich und Bewertung von computergestützten Verfahren zur Rekonstruktion von Fahrzeugkollisionen. Diplomarbeit Nr. 7/99, TU Berlin (1999)
- [daSilva 08] Da Silva, M.: Analysis of Event Data Recorder Data for Vehicle Safety Improvement (2008)
- [Delannoy 05] Delannoy, P., Martin, T., Castaing, P.: Comparative Evaluation of Frontal Offset Tests to Control Self and Partner Protection. Paper Nummer 05-0010, ESV Konferenz, Washington (2005)
- [DIN 92] FAKRA-Handbuch, Normen für den Kraftfahrzeugbau (Hrsg.) DIN, VDA. DIN 75204 Verkehrsunfallrekonstruktion und Verletzungsmechanik Teil 1: Begriffe der Unfallrekonstruktion Teil 2: Begriffe zu Spuren und Spurenmerkmalen Teil 3: Merkmale der Datenerhebung. Beuth Verlag GmbH, ISBN 3-410-41011-2 (1994)
- [Dubbel 97] Beitz, W., Grote, K.-H.: Dubbel Taschenbuch für Ingenieure. 19. Aufl. Springer, Berlin (1997)
- [Eberan 62] von Eberan E.R.: Über die Mechanik des Kraftfahrzeug-Verkehrsunfalls. Österreichische Ingenieur-Zeitschrift **5**, 160 (1962)
- [EDCRASH 97] Users Manual. Engineering Dynamics Corporation, Beaverton, Oregon, USA (1997)
- [EEVC 98] Improved Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection Afforded by Passenger Cars. European Enhanced Vehicle Safety Committee Working Group 17 Report (1998)
- [ESAR 10] 4th International Conference „Expert Symposium on Accident Research“, Hannover Medical School, Hannover (2010)
- [ESV 98] 16th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Proceedings 1998. National Highway Safety Administration, Washington D.C., USA (1998)
- [ESV 11] 22nd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Proceedings 2011. National Highway Safety Administration, Washington D.C., USA (2011)
- [Fechner 83] Fechner, H.: Ermittlung volkswirtschaftlicher Kosten von Verletzungsfolgen aus Straßenverkehrsunfällen. Diplomarbeit, TU Berlin (1983)
- [Feuerwehr 11] Bildarchiv der Feuerwehr Niebüll-Deezbüll (2011)
- [FIMCAR 11] Frontal Impact and Compatibility Assessment Research Report. Berlin (2011)
- [Gabler 08] Gabler, H., Thor, C., Hinch, J.: Preliminary Evaluation of Advanced Air Bag Field Performance Using Event Data Recorders (2008)
- [GIDAS 99] Unfallerhebungen vor Ort, Dresden und Hannover, Kooperationsprojekt der Bundesanstalt für Straßenwesen und der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. GIDAS Konsortium (1999)
- [Gnadler 86] Gnadler, R., Schmidt, A., Habich, K.: CARAT: Ein Programmsystem zur rechnerunterstützten Unfallrekonstruktion dargestellt am Beispiel einer Kollisionsanalyse. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **5**, 121–129 (1986)
- [Gögler 68] Gögler, E.: Chirurgie der Verkehrsmedizin. Klinik, Mechanik und Biomechanik des Unfalls. In [Wagner 68], S. 417–512 (1968)

- [Gratzer 00] Gratzer, W.: Bedeutung der Struktursteifigkeiten und EES-Werte, Kontrollparameter bei der Kollisionsanalyse. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **2**, 49–59 (2000)
- [Gratzer 07] Gratzer, W.: Möglichkeiten und Grenzen der Kollisionsanalyse. EVU Tagung (2007)
- [Gronau 97] Gronau, F.: EDV-Programme, Unfallrekonstruktion in der Praxis, Programm Analyser Pro. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **2**, 39–42 (1997)
- [Gronau 98] Gronau, F.: PC-Crash – Ein Unfall-Rekonstruktionsprogramm. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **4**, 99–102 (1998)
- [Gummert 86] Gummert, P., Reckling, K.-A.: Mechanik. Verlag Friedrich Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden (1986)
- [Heger 82] Heger, A., Appel, H.: Korrelationsmöglichkeiten von Unfallgeschehen und Versuch am Beispiel des Fußgängerunfalls. In: Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Verkehrsmedizin. Bundesanstalt für Straßenwesen, Köln (1982)
- [Helms 71] Helms, E.: Ökonomische Grundlagen zur Erfassung der Unfallkosten im Straßenverkehr. Dissertation, Universität Bonn (1971)
- [HUK 94] HUK Verband: Fahrzeugsicherheit 90. Analyse von Pkw-Unfällen, Grundlagen für künftige Forschungsarbeiten. Büro für Kfz-Technik des HUK-Verbandes, München (1994)
- [Hummel 11] Hummel, T., Kühn, M., Bende, J., Lang, A.: Fahrerassistenzsysteme – Ermittlung des Sicherheitspotenzials auf Basis des Schadengeschehens der Deutschen Versicherer. Forschungsbericht FS 03. Unfallforschung der Versicherer (2011)
- [IIHS 12] IIHS: Frontal Small Overlap Crashworthiness Evaluation – Crash Test Protocol (Version I). Insurance Institute for Highway Safety March (2012)
- [IRCOBI 98] Proceedings: 1998 International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impact. Göteborg, Sweden. IRCOBI Secretariat Bron, France (1998)
- [Irtad 11] Irtad Road Safety 2011, Annual Report, Paris (2011)
- [ISO 95] Road Vehicles – Traffic Accident Analysis, Terminology. ISO/TC 22/SC 12 N 383, ISO/CD 12353-1 (1995)
- [ISO 98] Risk Management Terminology. ISO/TC 22/SC 9, ISO/TMB WG on Risk Management Terminology (1998)
- [ISO 99] ISO/CD 12353-2: Road vehicles – Traffic accident analysis – Part 2: Determination of impact severity. ISO (1999)
- [Jäger 77] Jäger, W., Lindenlaub, K.-H.: Nutzen/Kosten-Untersuchungen von Verkehrssicherheitsmaßnahmen. FAT-Schriftenreihe, Bd. 5. Forschungsvereinigung Automobiltechnik, Frankfurt/Main (1977)
- [Johannsen 10] Johannsen, H., Müller, G., Pastor, C. (BASt.), Erbe, R.-D. (Berliner Feuerwehr.), Schlosser, H.-G. (Charité Berlin): Influence of new car body design on emergency rescue. ESAR Conference, Hannover (2010)
- [Johannsen 11] Johannsen, H., Adolph, T., Thomson, R., Edwards, M., Lázaro, I., Versmissen, T.: FIMCAR – Frontal Impact And Compatibility Assessment Research: Strategy And First Results For Future Frontal Impact Assessment. 6. ESV (2011), Paper No. 11-0286
- [Johannsen 12/1] Johannsen, H., Edwards, M., Lazaro, I., Adolph, T., Thomson, R., Versmissen, T.: FIMCAR – Frontal Impact and Compatibility Assessment Research: How to test self and partner protection. TRA Conference (2012)

- [Johannsen 12/2] Johannsen, H., Trosseille, X., Lesire, P., Beillas, P.: Estimating Q-Dummy Injury Criteria Using the CASPER Project Results and Scaling Adult Reference Values. Proceedings to IRCOBI Conference 2012, Dublin (2012)
- [Johannsen 13] Johannsen, H., Müller, G.: Accident and Injury Risks of Elderly Car Occupants, Paper Number 13-0223, ESV Conference May 2013
- [Kalthoff 00] Kalthoff, W., Schimmelpfennig, K.-H.: Verzögerungs-Substitutions-Methode (VSM). Eine Methode zur Bestimmung der Kollisionsgeschwindigkeit bei Frontalkollisionen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 4, 111–114 (2000)
- [Kast 98] Kast, A.: Der Unfalldatenspeicher (UDS) – Technik und Funktion. Ein Hilfsmittel der Unfallrekonstruktion. In: Rau, H. (Hrsg.) UDS-Fachtagung, Berlin 1998, Kurzberichte. Berlin (1998)
- [Klebelberg 82] Klebelberg, D.: Verkehrspychologie. Springer, Berlin (1982)
- [KOB 82] Lenz, K.-H. et al.: Joint Biomechanical Research Project KOB (Forschungsverbund Biomechanik). Schriftenreihe Unfall- und Sicherheitsforschung, Bd. 34. Bundesanstalt für Straßenwesen, Köln (1982)
- [König 08] König, T.: Qualität der Simulationsrechnung bei der Auswertung von Unfallversuchen. Studienarbeit, TU Berlin (2008)
- [Koob 86] Koob, J.-P.: Vergleich von modernen Unfallrekonstruktionsverfahren für PKW-PKW- Kollisionen. Diplomarbeit, TU Berlin (1986)
- [Koob 91] Koob, J.-P.: Stoß- und Energiebetrachtungen beim Massenpunktstoß und beim exzentrischen Scheibenstoß. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 3, 64–68 und 5, 139–142 (1991)
- [Kramer 82] Kramer, F., Wanderer, U.: Die Abgrenzung von Unfallschwere und Unfallfolgenschwere bei Straßenverkehrsunfällen. Automobil-Industrie 1, 49–55 (1982)
- [Kramer 90] Kramer, F.: Schutzkriterien für den Fahrzeug-Insassen im Falle sagittaler Belastung. VDI-Fortschrittberichte, Reihe 12, Bd. 137. VDI Verlag, Düsseldorf (1990). Dissertation, TU Berlin (1990)
- [Kramer 09] Kramer, F.: Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen. 3. Aufl. Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden (2009)
- [Kühnel 80] Kühnel, A.: Der Fahrzeug-Fußgänger-Unfall und seine Rekonstruktion. Dissertation, TU Berlin (1980)
- [LAI 91] Krebsrisiko durch Luftverunreinigungen. Abschlußbericht der Arbeitsgruppe des Länderrausschusses für Immissionsschutz (1991)
- [Langwieder 75] Langwieder, K.: Aspekte der Fahrzeugsicherheit anhand einer Untersuchung von realen Unfällen. Dissertation, TU Berlin (1975)
- [Langwieder 76] Langwieder, K.: Bewertung der Verkehrsunfälle. In: BMFT (Hrsg.) Technologien für die Sicherheit im Straßenverkehr, S. 53. TÜV Rheinland, Köln (1976)
- [Langwieder 01] Langwieder, K., Hummel, T.: Verletzungen von airbaggeschützten Insassen und Unfallcharakteristika. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 5, 141–146 und 6, 160–166 (2001)
- [Lesire 11] Lesire, P. (LAB PSA.), Johannsen, H. (Technische Universität Berlin), Müller, G. (Fahrzeugsicherheit Berlin e. V.), Longton, A. (IDIADA.), Kirk, A. (Loughborough University.), Krishnakumar, R. (CEESAR.), Chevalier, M.-C. (Université de Lyon): Safety benefits of the new ECE regulation for the homologation of CRS – an estimation by the CASPER consortium. 9th International Conference "Protection of Children in Cars". 1./2. Dezember (2011)
- [Lossagk 58] Der Zusammenstoß. Berichte der Technischen Überwachungsvereine (BTÜ), S. 256 ff. (1958)

- [Malczyk 11] Malczyk, A. (UDV.), Gehlert, T. (UDV.), Müller, G. (Fahrzeugsicherheit Berlin e. V.): SUV und ihre Fahrer in Deutschland – Big, Bad and Dangerous? 8. VDI-Tagung „Fahrzeugsicherheit – Fokus Elektromobilität“, VDI-Berichte 2144 (2011). ISBN 978-3-18-092144-0
- [Marquard 62] Marquard, E.: Zur Mechanik des Zusammenstoßes von Fahrzeugen. ATZ **64**, 141–148 (1962)
- [Mattern 88] Mattern, R., Eichendorf, W., Reiss, S., Alt, B., Miksch, T.: Verletzungsfolgekosten nach Straßenverkehrsunfällen. Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT). Bd. 73. VDA, Frankfurt (1988)
- [McHenry 73] McHenry, R.R.: Computer Program for Reconstruction of Highway Accidents. Proceedings 17. Stapp Car Crash Conference, 1973, Oklahoma, S. 409
- [McHenry 75] McHenry, R.R.: The CRASH-Program – A Simplified Collision Reconstruction Program. Motor Vehicle Collision Investigation Symposium. Calspan, Buffalo NY (1975)
- [Meyer 00] Meyer-Gramko: Der Beitrag der Verkehrspychologie an der Unfallaufklärung. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **2**, 81–84 (2000)
- [Moser 97] Moser, A., Steffan, H.: Unfallrekonstruktionsdatenbank. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **4**, 115–116 (1997)
- [Moser 98/1] Moser, A., Steffan, H., Kasanicky, G.: Das Fußgängermodell in PC-Crash 5.1 – Validierung in Crashtests. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (11), 305–308 (1998)
- [Moser 98/2] Moser, A., Steffan, H.: Automatische Optimierung der Stoßeinlaufparameter unter Verwendung von Auslaufspuren und Endlagen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **10**, 287–292 (1998)
- [Müller 10] Müller, G., Johannsen, H., Fastenmeier, W.: Fehlgebrauch der Airbagabschaltung bei der Beförderung von Kindern in Kinderschutzsystemen. Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremen (2010)
- [NHTSA 08] NHTSA: Special Crash Investigations: Counts of frontal airbag related fatalities and seriously injured persons. Report Date: January 1. U.S. Department of Transportation, Washington DC (2008)
- [NHTSA 12] NHTSA: Vehicle Crash Test Database. <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/database/aspx/vehdb/querytesttable.aspx>. Zugegriffen: 07.03.2012. Washington DC (2012)
- [Niklas 70] Niklas, J.: Nutzen/Kosten-Analysen von Sicherheitsprogrammen im Bereich des Straßenverkehrs. Schriftenreihe des VDA, Bd. 7. VDA, Frankfurt/Main (1970)
- [O'Reilly 03] O'Reilly, P.: Status Report of IHRA Compatibility and Frontal Impact Working Group. Proceedings of the Enhanced Vehicle Safety Conference, No. 03-402 (2003)
- [Otte 82] Otte, D., Kühnel, A., Suren, E.G., Weber, H., Gotzen, L., Schockenhoff, G., Vu-Han, V.: Erhebungen am Unfallort. Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr **37**, 82 (1982)
- [Otte 87] Otte, D.: Welchen Beitrag kann Schutzkleidung zur passiven Sicherheit des Motorradfahrers leisten. VDI-Berichte **657**, 281–303 (1987)
- [Otte 89] Otte, D.: Bedeutung und Aktualität von Wurfweiten, Kratzspuren und Endlagen für die Unfallrekonstruktion. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **11**, 294–300 (1989)
- [Otte 98] Otte, D., Willeke, H., Chinn, B., Doyle, D., Schuller, E.: Anprallmechanismen von Helmgeschützten Köpfen – Unfallstudie COST 327. No. 8 Proceedings of the 1998 International Motorcycle Conference, S. 83–112. Institut für Zweiradsicherheit e. V., Bochum (1998)

- [Otte 03] Otte, D., Krettek, C., Brunner, H., Zwipp, H.: Scientific Approach and Methodology of a New In-Depth-Investigation Study in Germany so called GIDAS. Proc. 2003 ESV-Conference, Nagoya/Japan, Mai 2003
- [Otte 09] Otte, D., Pund, B., Jänsch, M.: Unfallursachen-Analyse ACASS für Erhebungen am Unfallort – Seven-Steps-Methode. Zeitschrift Verkehrssicherheit **3**, 122–128 (2009)
- [Otte 12] Otte, D., Wiese, B.: Injury Rates for Elderly versus Young Drivers as Car Occupants Wearing Seatbelts in Road Traffic Accidents. SAE Paper 12B-0129 (2012)
- [Otte 13] Otte, D.: Analysen von GIDAS Daten für dieses Buch (2013)
- [PC-CRASH 98] PC-CRASH, ein Simulationsprogramm für Verkehrsunfälle. Bedienungshandbuch. DSD (Dr. Steffan Datentechnik). Linz, Österreich (1998)
- [Pfeufer 00] Pfeufer, H.: Die Drehimpulserhaltung – einige grundsätzliche Überlegungen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **2**, 39–44 (2000)
- [Plankensteiner 94] Plankensteiner, K.: Theorie und Praxis der forensischen Unfallanalyse. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, **3**, 79–83, **4**, 103–108, **6**, 169–172, **7/8**, 217–226 (1994)
- [Rau 75] Rau, H.: Rekonstruktion von Fahrzeugkollisionen mit Hilfe von Bewegungsgleichungen. Dissertation, TU Berlin (1975)
- [Rau 98] Rau, H. (Hrsg.): UDS – Fachtagung, Kurzberichte. Berlin (1998)
- [Richards 10] Richards, D., Edwards, M., Cookson, R.: Technical assistance and economic analysis in the field of legislation pertinent to the issue of automotive safety: provision of information and services on the subject of accident analysis for the development of legislation on frontal impact protection. Final Report CPR815 ENTR/05/17.01
- [Richter 84] Richter, B., Appel, H., Hoefs, R., Langwieder, K.: Entwicklung von PKW im Hinblick auf einen volkswirtschaftlich optimalen Insassenschutz. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt TV 8036 im Auftrag des Bundesministers für Forschung und Technologie (BMFT) (1984)
- [SAE J224] Collision Deformation Classification. SAE J224 MAR 80, SAE Recommended Practice. SAE Handbook, Bd. 4, S. 34.175–34.185. Society of Automotive Engineers, Inc. Warrendale, PA, USA (1992)
- [SAE J885] Human Tolerance to Impact Conditions as Related to Motor Vehicle Design. SAE Information Report, July 1986, 1992. SAE Handbook, Bd. 4, S. 34.251–34.268. Society of Automotive Engineers, Inc. Warrendale, PA, USA (1994)
- [Schaper 79] Schaper, D.: Ist die Fahrzeugdeformation ein Maß für die Geschwindigkeitsänderung von Unfallfahrzeugen? Der Verkehrsunfall **7/8**, 138–142 (1979)
- [Schimmelpfennig 80] Schimmelpfennig, K.-H., Becke, M.: Ausnutzung der Symmetrieverhältnisse beim Impuls-Diagramm zur engeren Eingrenzung der Kollisionsgeschwindigkeiten unter gleichzeitiger Berücksichtigung des Drallsatzes. Der Verkehrsunfall **10**, 206–208 (1980)
- [Schimmelpfennig 82/1] Schimmelpfennig, K.-H., Hebing, N.: Das Energie-Ring-Verfahren – Graphische Lösung der Stoßgleichungen unter Einbeziehung der Formänderungsenergie. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **9**, 168–172 (1982)
- [Schimmelpfennig 82/2] Schimmelpfennig, K.-H.: Kollisionsgeschwindigkeitsberechnung bei eindimensionalen Fahrzeug/Fahrzeug-Kollisionen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **11**, 225–227 (1982)
- [Schimmelpfennig 83] Schimmelpfennig, K.-H., Hebing, N.: Der eindimensionale nicht plastische Stoß. Erweitertes Band-Schnitt-Verfahren. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **12**, 337–340 (1983)

- [Schimmelpfennig 89] Schimmelpfennig, K.-H., Schmedding, K.: Tangentialkomponentenverfahren. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **10**, 264–267 (1989)
- [Schimmelpfennig 91] Schimmelpfennig, K.-H., Hebing, N.: Die Kontaktpunktproblematik in der Unfallrekonstruktion – Energie-Doppelring- und Drehimpuls-Spiegel-Verfahren. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **91**(9), 259–263 (1991)
- [Seiffert 85] Seiffert, U.: Unfallfolgenmindernde Fahrzeugsicherheit. VDI Fortschrittsberichte, Reihe 12, Bd. 59. VDI-Verlag, Düsseldorf (1985)
- [Sherwood 09] Sherwood, C.P., Nolan, J.M., Zubay, D.S.: Characteristics of small Overlap Crashes. ESV Conference (2009)
- [Slibar 64] Slibar, A.: Die mechanischen Grundsätze des Stoßvorganges und ihre Anwendung. Zweite Arbeitstagung der GUVU. Karlsruhe (1964)
- [Slibar 73] Slibar, A.: Das Antriebs-Balance-Diagramm als optimales Hilfsmittel der Unfallanalyse. Der Verkehrsunfall **2**, 25–30 (1973)
- [Slibar 79] Slibar, A.: Aussagewert und Schranken der Kollisionsrückanalyse nach Indizienstand. Der Verkehrsunfall, **10**, 200–204 (1979)
- [STAPP 99] 43rd STAPP Car Crash Conference. 1999 Proceedings. Society of Automotive Engineers, Inc. Warrendale, PA, USA (1999)
- [States 80] States, J.D., Huelke, D.F., Baker S.P. et. al.: The Abbreviated Injury Scale 1980 Revision. American Association of Automotive Medicine, Morton Grove, Illinois 60053 USA (1980)
- [StBA 03] Todesursachen in Deutschland 2002. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden (2003)
- [StBA 11/1] Todesursachen in Deutschland 2010. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden (2011)
- [StBA 11/2] Verkehrsunfälle, Fachserie 8, Reihe 7. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden (2011)
- [StBA 12/1] Getötete und Verletzte bei Verkehrsunfällen nach Art der Verkehrsbeteiligung. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden (2012)
- [StBA 12/2] Unfälle mit Personenschäden, Verunglückte: Deutschland, Jahre, Unfalltyp/Unfallart, Ortslage, Schwere der Verletzung, GENESIS Datenbank. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden (2012)
- [Steffan 93] Steffan, H.: PC-Crash. Ein Computerprogramm zur Simulation von Verkehrsunfällen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **7/8**, 215–222 (1993)
- [Steffan 94] Steffan, H.: Bedienungshandbuch für das Verkehrsunfall-Simulationsprogramm PC-CRASH 4.0, Graz (1994)
- [Struble 87] Struble, D.E.: Generalizing CRASH3 for Reconstruction Specific Accidents. SAE 870041 (1987)
- [Stürtz 81] Stürtz, G.: Das Kind im Verkehrsunfall: Biomechanik, Anforderungen an die äußere und innere Sicherheit von Kraftwagen. Dissertation, TU Berlin (1981)
- [Szabo 66] Szabo, I.: Einführung in die Technische Mechanik. 7. Aufl. Springer-Verlag, Berlin (1966)
- [Szabo 72] Szabo, I.: Höhere Technische Mechanik. 5. Aufl. Springer-Verlag, Berlin (1972)
- [Tarriere 75] Tarriere, C., Fayon, A., Hartemann, F.: The contribution of physical analysis of accidents towards interpretation of severe traffic trauma. 19th Stapp Car Crash Conference. San Diego (1975)
- [Teoh 11] Teoh, E.R., Nolan, J.M.: Is Passenger Vehicle Incompatibility Still A Problem? Insurance Institute for Highway Safety (2011)
- [Unfallchirurg 10] Haasper, C., Junge, M., Ernstberger, A., Brehme, H., Hannawald, L., Langer, C., Nehmzow, J., Otte, D., Sander, U., Krettek, C., Zwipp, H.: Die Abbreviated Injury Scale (AIS). Potenzial und Probleme bei der Anwendung. Der Unfallchirurg **5**, 369 (2010)

- [VDI 97] VDI-Berichte 1354: Innovativer Insassenschutz im Pkw. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (1997)
- [VDI 99] VDI-Berichte 1471: Innovativer KFZ-Insassen- und Partnerschutz. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (1999)
- [VDI 01] VDI-Berichte 1637: Innovativer KFZ-Insassen- und Partnerschutz. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf (2001)
- [Wagner 68] Wagner, K., Wagner, H.-J. (Hrsg.): Handbuch der Verkehrsmedizin. Springer-Verlag, Berlin (1968)
- [Wagner 84] Wagner, H.-J. (Hrsg.): Verkehrsmedizin. Springer-Verlag, Berlin (1984)
- [Wagner 00] Wagner, O., Rau, H.: Bandbreite bei der Unfallrekonstruktion – Studie über die Rekonstruktionsergebnisse von drei als Unfälle aufbereiteten Kollisionsversuchen. In: 9. Jahrestagung des Europäischen Vereins für Unfallforschung und Unfallanalyse e. V. (EVU), S. 181–210. EVU, Berlin (2000)
- [Wegner 00/1] Wegner, C., Otte, D., Rau, H.: Deformationscharakteristik und Einflußparameter von Fahrrädern bei Kollisionen mit der Pkw-Front. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 2, 32–38 und 3, 62–70 (2000)
- [Wegner 00/2] Wegner, C., Otte, D., Rau, H.: Deformationscharakteristik und Einflußparameter von Fahrrädern bei Kollisionen mit der Pkw-Front. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (4), 115–120 (2000)
- [Wilde 81] Wilde, G.J.S.: Objektive und subjektive Sicherheit im Wechselwirkungsbereich Fahrer – Straße. In: Verkehrssicherheit, Seminar der Forschungsgruppe der Daimler-Benz AG. Berlin (1981)
- [Woldrich 87] Woldrich, H.: k-Verfahren – Konstruktionsmöglichkeit bei einem skalaren Stoßvorgang. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 1, 29–30 (1987)
- [Zeidler 82] Zeidler, F.: Die Analyse von Straßenverkehrsunfällen mit verletzten PKW-Insassen unter besonderer Berücksichtigung von versetzten Frontalkollisionen mit Abgleiten der Fahrzeuge. Dissertation, TU Berlin (1982)
- [Zeidler 97] Zeidler, F., Knöchelmann, F.: Der Einfluß der Prüfgeschwindigkeit von Frontalaufpralltests auf die Kompatibilität von realen Pkw-Pkw-Kollisionen. In: Innovativer Insassenschutz im Pkw. VDI Berichte 1354, 37–54 (1997)
- [Zeman 01] Zeman, V.: Beitrag zur Theorie des schießen zentralen Stoßes von Körpern sowie zur Simulation eines Zusammenstoßes von Kraftfahrzeugen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 3, 75–79 (2001)
- [Zomotor 87] Zomotor, A.: Fahrwerktechnik: Fahrverhalten. Vogel-Verlag, Würzburg (1987)

Weiterführende Literatur

- [AGU 96] AGU: Standards und Schutzkriterien für die Fahrzeugsicherheit. Zusammenstellung der Arbeitsgruppe für Unfallmechanik an der Universität und ETH Zürich, Zürich (1996) (unveröffentlicht)
- [AGU 97] AGU: Sicherheit von Leichtfahrzeugen. Bericht der Arbeitsgruppe für Unfallmechanik an der Universität und ETH Zürich, Zürich (1997)
- [Albertshofer 01] Albertshofer, G.: Insassenschutzeinrichtungen der neuen MAN-Lkw-Baureihe. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 5, 147–153 (2001)
- [Anselm 97] Anselm, D.: Die Pkw-Karosserie: Konstruktion, Deformationsverhalten, Unfallinstandsetzung. Vogel Verlag, Würzburg (1997)

- [Anselm 98] Anselm, D., Sporner, A.: Kollisionstypen bei Motorradunfällen – Unterschiede in Entstehung und Folgen. No. 8 Proceedings of the 1998 International Motorcycle Conference, S. 7–24. Institut für Zweiradsicherheit e. V., Bochum (1998)
- [Appel 77/1] Appel, H.: Möglichkeiten und Grenzen von örtlichen Unfallerhebungen. In: Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr, Heft 14. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch-Gladbach (1977)
- [Appel 77/1] Appel, H., Wanderer, U., Blödorn, J.: Unfallforschung: Westeuropäische Forschungsprogramme und ihre Ergebnisse. Eine Übersicht. Schriftenreihe FAT, Bd. 14. VDA, Frankfurt (1977)
- [Appel 77/2] Appel, H., Kramer, F., Heger, A., Otte, D.: Bewertung der äußereren Sicherheit von Kraftfahrzeugen – Möglichkeiten und Grenzen. In: Bewertungsverfahren für die Sicherheit von Personenkraftwagen. Verlag TÜV Rheinland, Köln (1983)
- [Appel 84/2] Appel, H.: Rekonstruktionsverfahren des Technischen Sachverständigen – Ein Überblick. 26. AFO/GUVU-Seminar, Köln (1984)
- [Appel 86] Appel, H., Otte, D., Wanderer, U.: Unfallforschung in der Bundesrepublik Deutschland und ihre nutzbaren Ergebnisse. Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr **56**, 48–54 (1986)
- [BASt 86] Straßenverkehrsunfallstatistik. Fachdienst Straßenverkehrsforschung, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach (1986)
- [Bäumler 89] Bäumler, H., Ungerer, H.: Die Anwendungsmöglichkeiten von Energierastern für den Bug von Personenkraftwagen in der Unfallrekonstruktion. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **9**, 245–248 und **10**, 277–282 (1989)
- [Bäumler 95] Bäumler, H.: Energetische Betrachtungen zur Rekonstruktion von Straßenverkehrsunfällen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **1**, 5–8 und **4**, 101–106 (1995)
- [Beermann 91] Beermann, H.J.: Auslaufwege und Stoßendgeschwindigkeiten bei Pkw-Pkw-Einfachkollisionen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **9**, 236–240 (1991)
- [Beermann 93] Beermann, H.J.: Auswirkungen unsicherer Bedingungen bei Rekonstruktionen von Pkw-Begegnungskollisionen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **1**, 2–10 (1993)
- [Berg 98/1] Berg, F.A., Bürkle, H., Schmidts, F.: Analyse der passiven Krafradsicherheit mit Unfallanalysen und Crashtests. In: Proceedings of the 1998 International Motorcycle Conference No. 8, S. 25–64. Institut für Zweiradsicherheit e. V., Bochum (1998)
- [Bosshard 00] Bosshard, R., Walz, F., Muser, M.H.: Delta-v- und EES-Bewertung nach Schadenfotos. Ergebnisse einer Feldstudie in der Schweiz – Beurteilung von Weichteilverletzungen im HWS-Bereich. In: 9. Jahrestagung des Europäischen Vereins für Unfallforschung und Unfallanalyse e. V. (EVU), S. 393–406. EVU, Berlin (2000)
- [Burg 82] Burg, H., Lindemann, M.: Unfallversuche Pkw-Pkw Kollisionen, Grundlagenuntersuchung. Verlag Information Ambs GmbH, Kippenheim (1982)
- [Burkhart 80] Burkhardt, F., Eberhardt, W., Himbert, G., Hör, E., Löhle, U.: Rekonstruktion von Verkehrsunfällen. DAT, Stuttgart (1980)
- [Danner 77] Danner, M.: Methode und Ergebnisbereiche der retrospektiven Untersuchung von realen Unfällen in der Unfallforschung der deutschen Autoversicherer. Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr **77**(14), 41–62 (1977)
- [Danner 82] Danner, M., Halm, J.: Technische Analyse von Straßenverkehrsunfällen. Kraftfahrzeugtechnischer Verlag, München (1982)
- [Danner 94] Danner, M., Halm, J.: Technische Analyse von Verkehrsunfällen. 2. Aufl. EUROTAX (International) AG, Pfäffikon, Schweiz (1994)

- [Deppe 91] Deppe, W.: Der Einfluß der Kontakt punkt lage beim Drall-Spiegelverfahren – das kontakt punkt varierte Drallfeld. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **3**, 71–72 (1991)
- [Eggers 91] Eggers, R., Compes, P.C.: Risikology of Motorcycle Riding: Strategic Aspects of Risk Analysis and Risk Control. In: Proceedings of the 1991 International Motorcycle Conference, S. 427–446. Institut für Zweiradsicherheit e. V., Bochum (1991)
- [EVU 92] Vorstellung PC-CRASH. EVU-Zeitschrift, **8** (1992)
- [Faerber 77] Faerber, E., Gülich, H.-A., Heger, A., Rüter, G.: Biomechanische Belastungsgrenzen, Literaturstudie über die Belastbarkeit des Menschen beim Aufprall. Bundesanstalt für Straßenwesen, Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr **3** (1976)
- [Faerber 91] Faerber, E.: Influence of Rigid Wall Impact Speed on Dummy and Vehicle Loadings. 13th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicle (ESV). Paris (1991)
- [FAT 84] Fußgängersicherheit – Ergebnisse eines Symposiums über konstruktive Maßnahmen am Auto. Schriftenreihe der FAT, Heft Nr. 42. Frankfurt (1984)
- [Friedewald 01] Friedewald, K.: Realbezogene Fahrzeugsicherheit. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **4**, 115–123 (2001)
- [Fucik 98] Fucik, R. (Hrsg.): Unfallaufklärung und Fahrzeugschaden, Handbuch des Verkehrsunfalls. Verlag Information Ambs GmbH, Kippenheim (1998)
- [Fürbeth 00] Fürbeth, V., Großer, W., Ammer, V.: Die Reaktionsaufforderung – eine mehr oder weniger lange Phase vor dem Reaktionspunkt. In: 9. Jahrestagung des Europäischen Vereins für Unfallforschung und Unfallanalyse e. V. (EVU), S. 295–304. EVU, Berlin (2000)
- [GTÜ 01] GTÜ-Schriftenreihe: Technische Analyse von Verkehrsunfällen anhand von Beispielen, Band 1. Verlag Information Ambs GmbH, Kippenheim (2001)
- [Hagen 65] Hagen, H.: Stoßvorgänge bei Verkehrsunfällen von Personenwagen, untersucht an Modellfahrzeugen. Dissertation, TU München (1965)
- [Hautzinger 85] Hautzinger, H. et al.: Genauigkeit der amtlichen Straßenverkehrsunfallstatistik. BASt, Bergisch-Gladbach (1985)
- [Jankovic 96] Jankovic, A., Simic, D.: Bezbednost Automobila (Kraftfahrzeug-Sicherheit). Verlag SKVER, Kragujevac (1996)
- [Kandler 01] Kandler, M., Frost, U., Bach, E., Langwieder, K., Gwehenberger, J.: Heckunterfahrschutz kontra Unfallfolgen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **4**, 105–108 (2001)
- [Kocherscheidt 82] Kocherscheidt, H.: Methoden, Ziele und Ergebnisse der BMW-Unfallforschung. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **12**, 343–347 (1991)
- [Krabbel 98] Krabbel, G.: Ein rechnerisches Schädel-Hirn-Modell zur Untersuchung dynamischer Belastungen des Kopfes. Dissertation, TU Berlin (1998)
- [Kramer 88] Kramer, F.: Analyse des Unfallgeschehens zur Ermittlung der Unfallkenngröße für Frontalkollisionen und der Verletzungsschwere sagittal belasteter PKW-Insassen. Forschungsbericht Nr. 325/88, TU Berlin (1988)
- [Kramer 98] Kramer, F.: Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen. Vieweg Braunschweig, Wiesbaden (1998)
- [Lamby 98] Lamby, M.: Fahrsimulationsprogramme für die Verkehrsunfallrekonstruktion am Beispiel des Programms CARAT 2.0. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik **7/8**, 215–224 (1998)
- [Lenz 90] Lenz, K.-H.: Gefährdung und Maßnahmen. Zur Entwicklung der Unfallrisiken und der Unfallforschung. In: BMV (Hrsg.) Vier Jahrzehnte Verkehrssicherheit. Bundesministerium für Verkehr, Bonn (1990)

- [Lipa 90] Lipa, R.: Die Festlegung der Kollisionsstellung und des Kontaktpunktes bei dem 90 Grad Kreuzungsunfall unter Beachtung der Verformung des Vorbau. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* **12**, 323–331 (1990)
- [Luff 84] Luff, K.: Rekonstruktion von Verkehrsunfällen aus gerichtsarztlicher Sicht. In: Wagner, (Hrsg.) *Verkehrsmedizin*, S. 412–422. Springer, Berlin/Heidelberg (1984)
- [Mackay 68] Mackay, G.M.: Injury And Collision Severity. *SAE Trans*, Bd. 77, Paper 68 07 79 (1968)
- [Mao 01] Mao, Y.: Auswirkungen unterschiedlicher Gewebefaltungen auf das Gefährdungs-/Schutzzpotential von Airbags. Dissertation, TU Berlin (2001)
- [Mattern 91] Mattern, R., Pleitschen, B., Zeidler, F.: ICS – eine Verletzungsfolgenskala zur Festlegung von Sicherheitsprioritäten in der Fahrzeugentwicklung. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* **1**, 25–30 (1991)
- [Müller 98] Müller, J.: Zum vektoriellen Geschwindigkeitsdiagramm. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* **9**, 245–249 (1998)
- [NHTSA 99] NHTSA: Safety Fact Sheet. Washington DC, November (1999)
- [Otte 91] Otte, D., Felten, G.: Requirements on Chin Protection in Full-Face for Motorcyclist Impact and Injury Situations. In: *Proceedings of the 1991 International Motorcycle Conference*, S. 229–266. Institut für Zweiradsicherheit e. V., Bochum (1991)
- [Otte 00] Otte, D., Richter, M., Kühnsebeck, H.-W., Mössinger, E., Blauth, M.: Einfluss der Unfallschwere und Art der Schmerzverarbeitung auf das Beschwerdebild der HWS-Distorsion. In: *9. Jahrestagung des Europäischen Vereins für Unfallforschung und Unfallanalyse e. V.* (EVU), S. 467–491. EVU, Berlin (2000)
- [Otte 01] Otte, D.: Besonderheiten des Kollisionsablaufes von Pkw bei Airbag-Nichtauslösung. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* **4**, 96–104 (2001)
- [Rathgelb 80] Rathgelb, G.: Handbuch des Verkehrsunfalls – UfaHa. Richard Boorberg Verlag, Stuttgart (1980)
- [Rau 76] Rau, H.: Möglichkeiten zur Verbesserung der Unfallerfassung. In: BMFT (Hrsg.) *Technologien für die Sicherheit im Straßenverkehr*, S. 43. TÜV Rheinland, Köln (1976)
- [Rau 76/2] Rau, H.: Manuskripte zur Lehrveranstaltung „Unfallanalyse I“, 1997 und „Unfallanalyse II“, 1999. Technische Universität Berlin, laufende Fortschreibung seit 1976
- [Rau 89] Rau, H., Leser, H.: Vergleichende Untersuchung von Aufwand und Genauigkeit herkömmlicher und neuerer graphischer Rekonstruktionsverfahren. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* **11**, 313–319 (1989)
- [Schimmelpfennig 84] Schimmelpfennig, K.-H.: Die Analyse von Serien-Auffahrunfällen mit Hilfe des Delta V-Schritt-Verfahrens. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* **3**, 73–75 (1984)
- [Schimmelpfennig 88] Schimmelpfennig, K.-H., Weber, M.: Sekundärstoß-Betrachtung. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* **6**, 159–160 (1988)
- [Schmidt 00] Schmidt-Cotta: Rechtliche und politische Aspekte der Unfalldatenspeicherung. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* **11**, 260–264 (2000)
- [Scholpp 88] Scholpp, G.: Entwicklung eines Modells zur Simulation von Fahrzeugunfällen und Anpassung an Crashtests. Diplomarbeit, TU Berlin (1988)
- [Steffan 00] Steffan, H., Moser, A.: Die Integration der elektronischen Fahrhilfen in Unfallsimulationsprogramme. In: *9. Jahrestagung des Europäischen Vereins für Unfallforschung und Unfallanalyse e. V.* (EVU), S. 151–160. EVU, Berlin (2000)
- [Vehicle 92] Vehicle Crash Data. *Accident Reconstruction Journal* **4**, 3 (1992)

- [Walsh 91] Walsh, W.H.: Crash Data Plans for the United States. 13th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicle (ESV), Paris (1991)
- [Weismayr 91] Weismayr, W.: EES-k Schnittverfahren. Berechnung der Geschwindigkeitsänderung bei Auffahr- und Frontalstößen, Auffinden des Kollisionsortes. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 4, 105–107 (1991)
- [Zeidler 79] Zeidler, F.: Deformationsverhalten von Kraftfahrzeugen bei Aufprallversuchen unter praxisgerechten Versuchsbedingungen. Der Verkehrsunfall 4(79), 76–81 und 5, 109–112 (1979)
- [Zobel 98] Zobel, R.: Demands for Compatibility of Passenger Cars. The Sixteenth International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Windsor, USA, June 1998, Proceedings Paper No. 98-S3-O-10, S. 729–741

Sachverzeichnis

A

Abgleiten, 49, 135, 144
Aktive Sicherheit, 11
Alleinunfälle, 18, 20, 177
ANALYSER PRO, 178
Anfangsbedingungen, 89, 123
Anknüpfungstatsachen, 28, 117, 149, 160, 183
Anstößrichtungen, 23, 24
Antriebs-Balanceverfahren, 112, 154
Arbeitssatz, 112
Aufprallart, 12, 20, 22, 44
Aufpralltyp, 20, 55
Aufwurfweite, 63
Ausgangsgrößen, 2, 46, 149
Auslaufbewegung, 117, 151
Auslaufphase, 11, 29, 85, 177
äußere Kräfte, 97, 117, 178
äußeres Produkt von Vektoren, XV

B

Band-Schnittverfahren, 173
Belastungsarten, 25
Belastungsgrenzen, 83
Bewegungsgleichungen, 127, 205
Bewegungstrajektorien, 65

C

CARAT, 178
CRASH3, 177, 206
Crashdauer, 89
Crashkinematik, 88
Crashphase, 11, 157

D

D.A.A.D., 178
Deformationsenergie, 47, 129, 132
Deformationskennungen, 88

Deformationslänge, 72
Deformationsweg, 90
Differenzialgleichungen, 122, 151
Drallsatz, 97, 100, 150
Drehimpuls, 105, 107, 163
Drehimpulsgleichungen, 111
Drehimpulssatz, 105, 163
Drehimpuls-Spiegelverfahren, 163, 167, 170
Drehpol, 86
Drehstoß, 106

E

ebene Scheibe, 101, 106, 121
ECE, 24, 77
EDCRASH, 177
EES, 47, 68, 144, 155, 159, 180
effektive Masse, 92
Eingangsgrößen, 130, 149, 152, 163
eingeprägte Kräfte, 97
Einlaufimpulse, 151, 167, 173
Einlaufphase, 11
elastischer Stoß, 124, 144
Energie-Doppelring-Verfahren, 179
Energie-Ringverfahren, 163, 169
Energiesatz, 112, 127, 158, 175
Ergänzungshypothese, 104, 126, 138
Ersatzmodell, 98, 157
Ersatzsteifigkeit, 122
Ersatzsystem, 98, 146, 157
Erweitertes Rhomboid-Schnittverfahren, 174
Eulersche Formel, 88
Exzentrischer Stoß, 125
exzentrischer Stoß, 110

F

Flugweite, 138

- Folgephase, 11, 29
 Fraktur, 26, 54
 Frontalaufprall, 22, 48, 63, 77, 144, 187
 Frontsteifigkeit, 75
 Fußgängerkollision, 70
- G**
 Gangpolbahn, 86
 Gefäßverletzungen, 26
 gerader Stoß, 115
 Gerader zentrischer Stoß, 107
 Geschwindigkeitsänderung, 47, 109, 140, 144
 Getötete, 14, 32, 59
 Gleithypothese, 104, 179
 Grafische Verfahren, 163
 Grunddaten, 30, 149
- H**
 Heckaufprall, 22, 81
- I**
 Impuls, 99, 105
 Impulserhaltungssatz, 108
 Impulssatz, 99, 105
 Impuls-Spiegelverfahren, 165
 In-Crashphase, 11
 In-Depth, 32, 40
 indirekte Krafteinwirkung, 25
 Individualrisiko, 8
 Innere Kräfte, 97
 Intrusion, 23, 49, 145
- K**
 Kinematik, 104, 151
 kinematische Betrachtung, 151
 klassische Stoßtheorie, 103
 Kollisionsarten, 17, 63, 150
 Kollisionsarten-Matrix, 18
 Kollisionsgeschwindigkeit, 47, 63, 73, 129, 138
 Kollisionsphase, 11, 28, 116
 Kollisionstypen, 19, 64
 Kompression, 95, 108
 Kontrollmöglichkeiten, 159
 Kraftgleichungen, 97, 152, 158
 Kraftmessung, 94
 Kraftrechnung, 97, 181
- L**
 Lebensbedrohung, 55
 Legalitätsprinzip, 31
- Letalitätsrate, 53
- M**
 MAIS, 20, 56
 Massenpunkt, 108, 150
 Massenträgheitsmoment, 101
 Massenträgheitstensor, 100
 mittlere Verzögerung, 52, 168
 Momentanpol, 85, 127
 monetäre Verletzungsfolgen, 56
- N**
 Nachfahren von Unfällen, 152
- O**
 objektive Sicherheit, 7
 Offset-Kollision, 135
 Organverletzungen, 26
- P**
 Passive Sicherheit, 11
 PC-CRASH, 178
 Pfahlaufprall, 82, 117
 physikalisches Pendel, 120
 Pkw/Fußgängerkollision, 70
 plastischer Stoß, 124
 Plausibilitätsprüfung, 157
 Post-Crashphase, 11
 Pre-Crashphase, 11, 159
 Primäraufprall, 63
 Primärerhebungen, 30, 39
- R**
 Rastpolbahn, 86
 Reaktionskräfte, 97, 114
 Rechtsprechung, 41
 reduzierte Pendellänge, 121, 127
 Regelkreis, 5
 Restitution, 90, 110, 144, 180
 retrospektive Erhebungen, 36
 Rhomboid-Schnittverfahren, 172
 Richtungshypothese, 104
 Risiko, 5
 Risikokompensation, 7
 Rückprallgeschwindigkeit, 115
 Rückwärts-Unfallrekonstruktion, 153, 155
 Rupturen, 26
 Rutschweite, 141

S

Schaden, 7, 31
Schiefer exzentrischer Stoß, 110
Schutzkriterien, 76
Schutzsysteme, 25
Schwerpunktsatz, 99, 122
schwerwiegende Unfälle, 31
Seitenaufprall, 22, 49
Sekundäraufprall, 63
Sekundärerhebungen, 31
Sicherheit, 57, 59
Sicherheitsforschung, 58, 76
Sicherheitsmaßnahmen, 11, 60
SMAC, 158, 177
Steinerscher Satz, 132
Stoffgesetze, 88
Stoßantrieb, 95
Stoßarten, 101
Stoßdauer, 102, 105
Stoßgleichungen, 101, 106, 126, 134, 152
Stoßmittelpunkt, 127
Stoßrechnung, 101, 129
Stoßtheorie, 102
Stoßzahl, 110
Stoßzahlhypothese, 104
Straßenverkehrsunfall, 7
Streubreiten, 183
Streuung, 56
stumpfe Gewalt, 25
subjektive Sicherheit, 7
subjektives Risiko, 7
Summenhäufigkeit, 63

T

Tangentialkomponenten-Verfahren, 179
Todesursachen, 9
Trägheitsradius, 171

U

Überschlag, 22, 65
Unbekannte, 146

Unfallanalyse, 44
Unfallart, 12
Unfallaufklärung, 39
Unfallaufnahme, 27, 34
Unfalldaten, 35, 142
Unfalldatenspeicher, 160
Unfälle mit Personenschäden, 32
Unfallerhebungen, 31
Unfallerhebungen am Unfallort, 32
Unfallfolgen, 31, 46
Unfallfolgenschwere, 46, 52
Unfallforschung, 27
Unfallgut, 30, 149
Unfallkenngroße, 47
Unfallkomponente, 1
Unfallmechanik, 85
Unfallphasen, 11
Unfallrekonstruktion, 149
Unfallschwere, 46
Unfallstatistik, 31
Unfallsystematik, 5
Unfalltyp, 12, 15
ungeschützter Verkehrsteilnehmer, 25

V

Verbrennungen, 54
Verhakungshypothese, 104, 112
Verletztenrate, 60
Verletzungsarten, 25
Verletzungsfolgekosten, 22, 55
Verletzungsschwere, 53
Verzögerungs-Substitutions-Methode, 179
Vorwärts-Unfallrekonstruktion, 156

W

Weichteilverletzungen, 26, 54
Wurfweiten, 73

Z

zentrischer Stoß, 107
Zweimassenschwinger, 122