

Hermann Appel | Gerald Krabbel | Dirk Vetter

Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion

Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion

herausgegeben von H. Burg und A. Moser

Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen

von F. Kramer

Leichtkollisionen

von K. Schmedding

Hermann Appel | Gerald Krabbel | Dirk Vetter

Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion

2. Auflage

Mit 145 Abbildungen

PRAXIS



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

Die Abbildung auf der Umschlagseite wurde uns freundlicherweise von TRW zur Verfügung gestellt.

Prof. Dr.-Ing. H. Appel studierte Maschinenbau an der Technischen Universität Braunschweig und war von 1960 bis 1964 Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Mechanik. Nach Tätigkeiten bei der deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, der Rheinstahl-Hanomag AG und der Volkswagen AG wurde er 1972 zum ordentlichen Professor an der Technischen Universität Berlin, Fachgebiet Kraftfahrzeuge, berufen. Lehr- und Forschungsfelder waren Unfallforschung, Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen, Schadstoffemissionen, Fahrzeugkonzepte, CAE im Automobilbau. Appel ist zusammen mit Prof. Tscherne Gründer der in der Vergangenheit stetig erweiterten „Verkehrsunfallforschung“ der Medizinischen Hochschule Hannover (1973) sowie der „Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr mbH Berlin“ (1983), die sich mit etwa 2000 Mitarbeitenden heute zu einem mittelständischen Entwicklungspartner der Automobilindustrie entwickelt hat. Appel wurde u.a. 1980 mit dem Safety Award of Excellence Engineering des DOT (USA), 1990 mit der Benz-Daimler-Maybach-Ehrenmedaille des VDI und 1998 mit dem Bundesverdienstkreuz ausgezeichnet.

Dr.-Ing. G. Krabbel studierte Maschinenbau mit der Fachrichtung Kraftfahrwesen an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Anschließend war er von 1990 bis 1997 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Berlin. Seitdem ist er in Dachau bei der Autoliv GmbH tätig und dort für Airbag-Entwicklungen mitverantwortlich.

Dipl.-Ing. D. Vetter studierte Fahrzeugtechnik an der Technischen Universität Berlin und war dort von 1995 bis 2001 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Straßen- und Schienenverkehr. Der Schwerpunkt in der Lehr- und Forschungstätigkeit war die Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen. Nach seiner Tätigkeit am Institut wechselte er im Frühjahr 2001 in die Firma IAT mbH in Berlin und arbeitet auf dem Gebiet des Insassenschutzes und des Fahrzeugsicherheitsversuchs.

Das Buch erschien bis 2002 unter dem gleichen Titel im Verlag INFORMATION Ambs GmbH, Kippenheim

2. Auflage 2002

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2002

Lektorat: Ewald Schmitt

Vieweg+Teubner Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.

Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



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

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.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

ISBN-13: 978-3-528-04123-6 e-ISBN-13: 978-3-322-83030-2
DOI: 10.1007/978-3-322-83030-2

VORWORT ZUR ZWEITEN 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 Zusatzhypothesen. Grundlagen und Anwendung, Theorie und Praxis sollen verbunden, Prinzipielles und Methodisches betont werden. Die Grundlagen für das Verständnis von modernen Unfallrekonstruktionsverfahren, ob analytisch, grafisch oder rechnergestützt angelegt, ob in Vorwärts- oder Rückwärtsrechnung gehalten, ob auf Stoßrechnung oder Kraftrechnung basierend, werden dargestellt und an anwendungsnahen Beispielen demonstriert.

Die technische Unfallrekonstruktion ist ein vergleichsweise junger Wissenschaftsbereich. Sein Anfang liegt in den vierziger Jahren 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 zweiten Auflage des erstmals im Jahre 1994 erschienenen Buches werden die Abschnitte Unfallsystematik und Unfallforschung neu gestaltet, der Abschnitt Unfallmechanik verbessert 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 Zusatzhypothesen? 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. Den Studenten der Fachrichtungen Fahrzeugtechnik, Sachverständigenwesen oder Fahrzeugsicherheit dient es als Vorlesungsskript zu den Vorlesungen „Unfallforschung und Unfallmechanik“ und „Biomechanik und Kraftfahrzeugsicherheit“.

Das Buch wendet sich vornehmlich an Unfall- und Kraftfahrzeug-Sachverständige, seien 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.

Vorwort zur zweiten Auflage

Bei der Fortschreibung des Vorlesungsskriptes haben über 25 Jahre hinweg wissenschaftliche Mitarbeiter und Studenten mitgewirkt, so die Herren Prof. Dr.-Ing H. Rau, Dr.-Ing A Kühnel, Prof. Dr -Ing. Fl. Kramer, Dipl.-Ing. D. Otte, Dipl.-Ing. G. Schöckenhoff, Dipl.-Ing. U Wanderer, Dipl.-Ing. Th. Deter u.a.. Bei der vorliegenden Überarbeitung und Neugestaltung des Buches haben Frau E. Trebbin und Herr cand.-ing. W. Winata tatkräftig geholfen Ihnen allen haben wir sehr zu danken.

Berlin, den 30. September 2001

Hermann Appel, Gerald Krabbel, Dirk Vetter

0 Inhaltsverzeichnis

VORWORT	5
0 INHALTSVERZEICHNIS	7
1 EINLEITUNG	11
2 UNFALLSYSTEMATIK	
2.1 Definitionen: Unfall, Risiko, Sicherheit	13
2.2 Zeitliche Phasen des Unfalls	18
2.3 Unfallart und Unfalltyp	19
2.4 Kollisionsart und Kollisionstyp	22
2.5 Aufprallart und Aufpralltyp	24
2.6 Belastungs- und Verletzungsarten des Menschen	27
3 UNFALLFORSCHUNG	
3.1 Bearbeitungskette von der Unfallerhebung bis zur Unfallforschung	29
3.2 Unfallerhebungen	30
3.2.1 Polizeiliche Unfallerhebungen	32
3.2.2 Erhebungen am Unfallort durch spezielle Forschungsteams	33
3.2.3 Retrospektive Unfalluntersuchungen	35
3.3 Unfallrekonstruktion und Unfallaufklärung, Rechtsprechung	39
3.4 Unfallanalyse	42
3.5 Unfallschwere, Unfallfolgenschwere	43
3.5.1 Unfallschwere, Unfallkenngröße	44
3.5.2 Unfallfolgen, Unfallfolgenschwere	50
3.6 Unfallforschung, Sicherheitsforschung	55
3.7 Ausgewählte Ergebnisse der Unfallanalyse, Unfallforschung und Sicherheitsforschung	56
4 UNFALLMECHANIK	
4.1 Kinematische Grundlagen	79
4.2 Crashkinematik, Crashpulse, Stoßziffer (Stoffgesetze)	82
4.2.1 Crashkinematik, Deformationskennungen	82
4.2.2 Stoßziffer	88
4.3 Kraftrechnung	90
4.3.1 Schwerpunktsatz	92
4.3.2 Drallsatz	93
4.4 Stoßrechnung	94

0 Inhaltsverzeichnis

4.4.1	Stoßarten	94
4.4.2	Stoßtheorien ..	95
4.4.3	Ergänzungshypothesen ...	96
4.4.4	Impulssatz.....	97
4.4.5	Drehimpulssatz	98
4.4.6	Stoßgleichungen für die ebene Scheibe	98
4.4.7	Gerader zentrischer Stoß zweier Scheiben	100
4.4.8	Schiefer exzentrischer Stoß zweier Scheiben	103
4.5	Arbeitssatz (Energiesatz).....	105
4.5.1	Arbeitssatz für starre Körper	105
4.5.2	Arbeitssatz für deformierbare Körper im statischen Gleichgewicht	106
4.5.3	Arbeitssatz allgemein.....	107
4.5.4	Arbeitssatz für den Wandaufprall eines Fahrzeugs	107
4.5.5	Arbeitssatz für die gerade, zentrische Kollision zweier Fahrzeuge.....	108
4.5.6	Arbeitssatz für den exzentrischen Aufprall eines Fahrzeugs auf einen starren Pfahl.....	109
4.5.7	Arbeitssatz für die Auslaufbewegung nach dem Stoß	109
4.5.8	Berechnung der Stoßziffer für einen Wandaufprall.....	111
4.6	Anwendungsbeispiele zur Kraftrechnung	112
4.6.1	Physikalisches Pendel	112
4.6.2	Frontalkollision zweier Fahrzeuge....	113
4.7	Anwendungsbeispiele zur Stoßrechnung	118
4.7.1	Exzentrischer Stoß gegen eine drehbar gelagerte Scheibe	118
4.7.2	Kollision Pkw-Baum	121
4.7.3	Pkw-Pkw-Seitenkollision ...	128
4.7.4	Pkw-Pkw-Offset-Frontalkollision	130
4.7.5	Kollision Pkw-Fußgänger	133
4.7.6	Frontalaufprall ohne und mit Abgleiten, Einfluss auf Geschwindigkeits- änderung und Energieabsorption.....	139
4.8	Festlegung der Unbekannten in Ersatzsystemen	141
5	UNFALLREKONSTRUKTION	
5.1	Unfallrekonstruktionsverfahren.....	143
5.1.1	Rückwärts-Unfallrekonstruktion, insbesondere Rückwärts-Kollisionsrekonstruktion	147

0 Inhaltsverzeichnis

5.1.2	Vorwärts-Unfallrekonstruktion, insbesondere Vorwärts-Kollisionsrekonstruktion	150
5.1.3	Kontrollmöglichkeiten	153
5.1.4	Unfalldatenspeicher	154
5.2	Grafische Rekonstruktionsverfahren	155
5.2.1	Antriebs-Balance-Verfahren	157
5.2.2	Impuls-Spiegelverfahren	159
5.2.3	Drehimpuls-Spiegelverfahren	162
5.2.4	Energie-Ringverfahren	165
5.2.5	Rhomboid-Schnittverfahren	167
5.2.6	Band-Schnittverfahren	169
5.3	Rechnerische Rekonstruktionsverfahren	172
5.4	Anmerkungen und Ergänzungen zu den vorgestellten Rekonstruktionsverfahren	179
6	ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN, BEZEICHNUNGEN	
6.1	Abkürzungen	185
6.2	Formelzeichen, Bezeichnungen	188
7	LITERATUR	191
8	ANHANG	
8.1	Energieraster von Fahrzeugen beim Frontalaufprall, unterschiedliche Massen, unterschiedliche Motoranordnungen	201
8.2	Ausgewählte Erhebungsbogen der Verkehrsunfallforschung Hannover	203
8.3	Klassifizierung der Fahrzeugbeschädigungen nach dem Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft	208
8.4	Schutzkriterien und Belastungsgrenzen unter stoßartiger Belastung (inoffizielle Zusammenstellung der Arbeitsgruppe für Unfallmechanik der ETH Zürich) ..	209
8.4.1	Schutzkriterien und Belastungsgrenzen des erwachsenen Menschen ..	209
8.4.2	Schutzkriterien und Belastungsgrenzen des Kindes ..	211
8.5	Verletzungsschutz der Insassen, Ausblick	212
9	SACHWORTVERZEICHNIS	213

1 EINLEITUNG

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. Unfallsachen 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 Sicherheit, 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 Unfallmechanik 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 Wiedergabetreue 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

1 Einleitung

möglichen Toleranzen der Eingangsgrößen ablegt. Hier sind 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 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 Impulssatz, Drehimpulssatz und Zusatzhypothesen behandelt. Variationen der Zusatzhypothesen 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 modernen grafischen Verfahren wie z.B. Impuls- oder Drehimpulsspiegelverfahren werden an „Paradebeispielen“ erläutert.

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]), Verlag Information Ambs 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 UNFALLSYSTEMATIK

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 Kraftfahrzeugs 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 Bild 2.1.

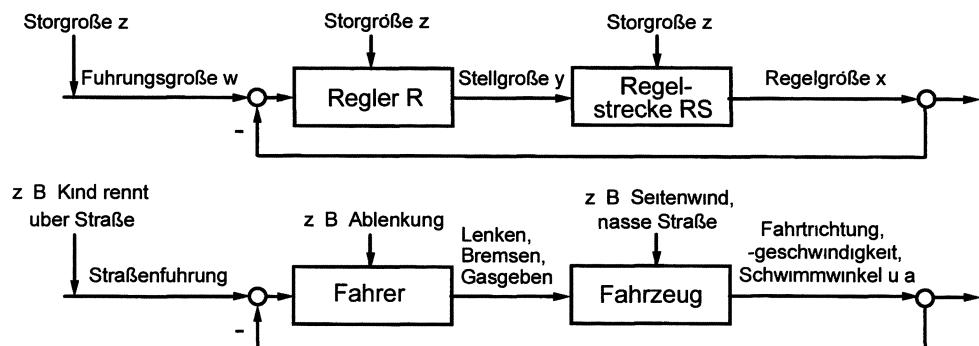


Bild 2.1 Einfache Darstellung des Regelkreises „Fahrer-Fahrzeug-Umfeld“

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 Kraftfahrzeugs in zwei Ebenen, der Führungs- und der Stabilisierungsebene, abspielt. **Bild 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.

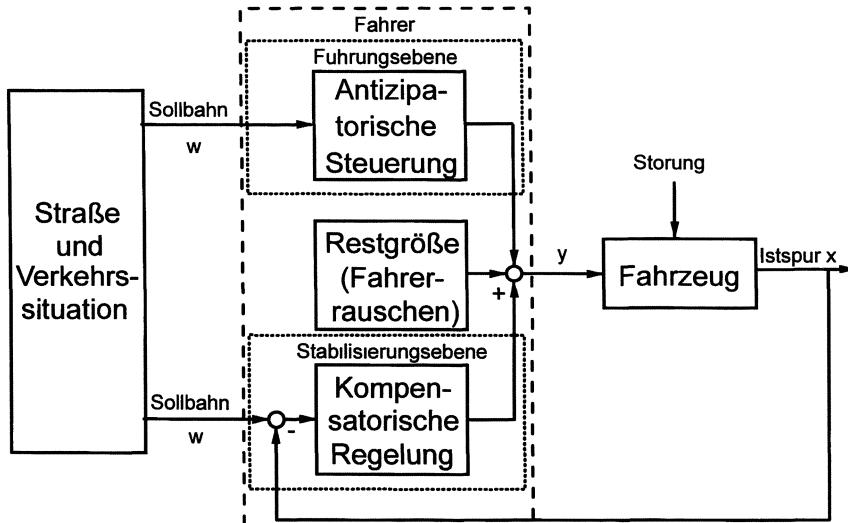


Bild 2.2 Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens [Zomotor 87]

Diese Fahrertätigkeit 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 Fahrzeuggeschwindigkeit 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 Kompressionsregelung (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 einer Unfallart verbundene Risiko 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, Verletzungsfolgekosten) gekennzeichnet.

2 Unfallsystematik

Versicherungstechnisch wird Risiko als Produkt von Schadenshäufigkeit [%] und Schadenshöhe [DM] 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 $\approx 1 / \text{angestrebte Vorsicht}$.

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

- tatsächliche Sicherheit = objektive Sicherheit — subjektive Sicherheit

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

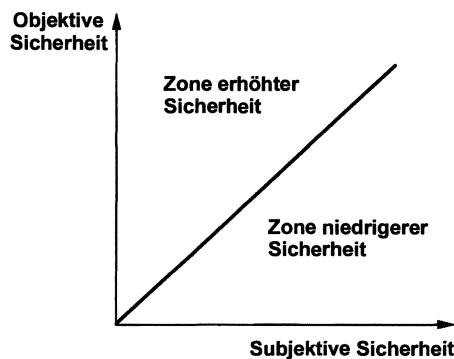


Bild 2.3 Zusammenhang zwischen objektiver und subjektiver Sicherheit

Bezieht man ein Risiko auf bestimmte, über die gesamte Lebenszeit einer Person homogene Expositionsbedingungen, so spricht man von einem Individualrisiko oder dem mittleren Pro-Kopf-Risiko bei lebenslanger Exposition. **Bild 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.

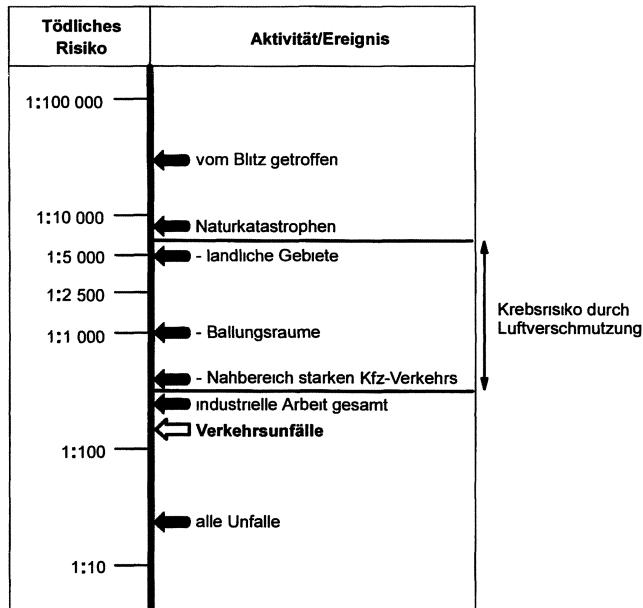


Bild 2.4 Lebenslange Individualrisiken für tödliche Verletzungen durch Unfälle und Krebsrisiko

Den Angaben von [LAI 91] soll die Abschätzung über das Risiko für tödliche Verletzungen bei Straßen-Verkehrsunfällen hinzugefügt werden, bezogen auf das Jahr 1998 und die Bundesrepublik Deutschland. Insgesamt wurden 7.792 Personen getötet, die Zahl der Einwohner betrug 82,057 Millionen. Legt man diese Zahlen für 70 Jahre zu Grunde, dann folgt daraus das Individualrisiko für tödliche Verletzungen (TV) im Straßenverkehr:

$$\text{Risiko}_{\text{TV}} = \frac{7.792 \text{ Getötete/Jahr} \times 70 \text{ Jahre}}{82,057 \text{ Mio Einwohner}} \approx 1/150 \text{ TV/Einw.}$$

Das Risiko für schwere Verletzungen SV (108.890 im Jahre 1998) und für leichte Verletzungen LV (388.429 im Jahre 1998) beträgt demnach:

$$\text{Risiko}_{\text{SV}} = 1/11 \text{ SV/Einw}$$

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

Man erkennt, dass das Risiko, bei Verkehrsunfällen getötet zu werden, im Verhältnis zu anderen, natürlichen Expositionen, besonders hoch ist, aber auch einen beträchtlichen Anteil am Todesrisiko bei allen Unfällen hat. Eine Aufteilung der Todesursachen bei Gewaltanwendung und bei Unfällen zeigt die Dominanz des Verkehrsunfalls vor anderen Unfallarten (siehe Bild 2.5) und unterstreicht damit auf andere Weise die große Bedeutung und das hohe Risiko des Verkehrsunfalls.

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 Bild 2.6 und Bild 2.7.

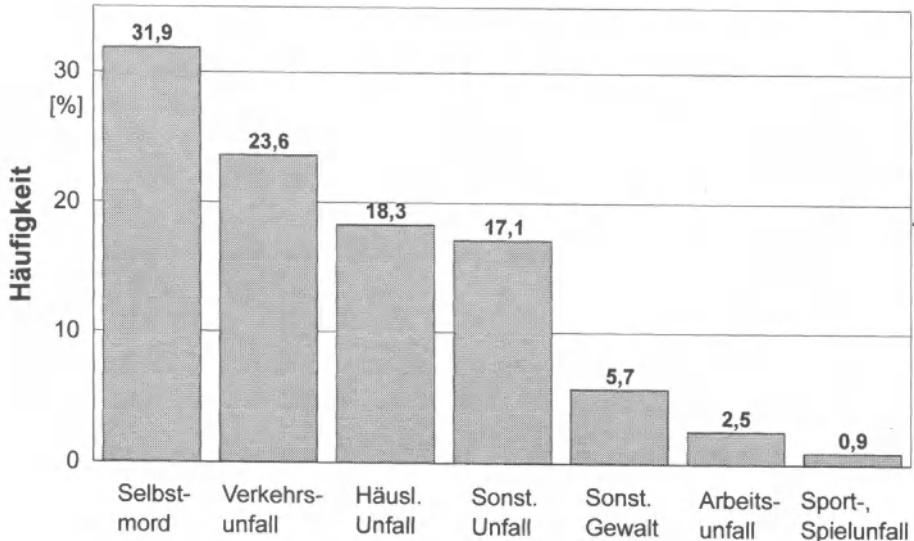


Bild 2.5 Unfälle und Gewalt, Anteile der Todesursachen in Deutschland 1989
[Kramer 98]

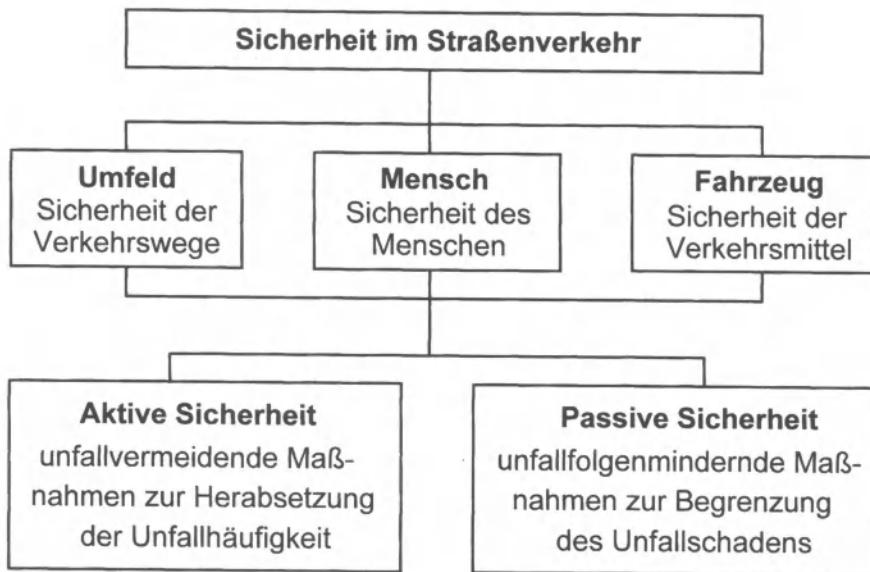


Bild 2.6 Einteilung der Sicherheit im Straßenverkehr

	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, Konditionssicherheit, Bedienungssicherheit, Wahrnehmungssicherheit	Selbstschutz der Insassen, Airbag, Fußgängerschutz, Kompatibilität, Energieabsorption der Struktur, Zellensteifigkeit
Umfeld	Verkehrsfluss-Steuerung und Verkehrsführung, Straßenführung und -bau, Entschärfen von Unfallschwerpunkten	Sicherung der Unfallstelle, Vermeidung von Folgeunfällen, Entschärfung des Straßenrandes (Bäume, Leitplanken)

Bild (Tabelle) 2.7 Einteilung der aktiven und passiven Sicherheit im Straßenverkehr mit Beispielen für Sicherheitsmaßnahmen

2.2 ZEITLICHE PHASEN DES UNFALLS

Entsprechend dem zeitlichen Verlauf eines Unfalles 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 Fahrzeuges sowie des Umfeldes bestimmt (z.B. durch Fahrwerkeigenschaften, Bremsverhalten, Beladung des Fahrzeuges, gefährliche Kreuzung). Aus der Sicht des Unfallgutachters sind u. a. in der Auslaufphase die mittleren Reibwerte zwischen Fahrzeug und Untergrund für die Rekonstruktion besonders wichtig. 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) 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 der Rettungsdienste) geprägt.

2 Unfallsystematik

Zur Einlaufphase zeigt das Bild 2.8 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 man den Straßenverkehrsunfall als ein Ereignis definieren, bei dem innerhalb des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug-Umfeld die Regelgröße (z.B. tatsächlicher seitlicher Abstand des Fahrzeugs vom rechten Fahrbahnrand) die Führungsgröße (ideal vorgegebener seitlicher Abstand des Fahrzeugs vom rechten Straßenrand) unzulässig weit überschreitet

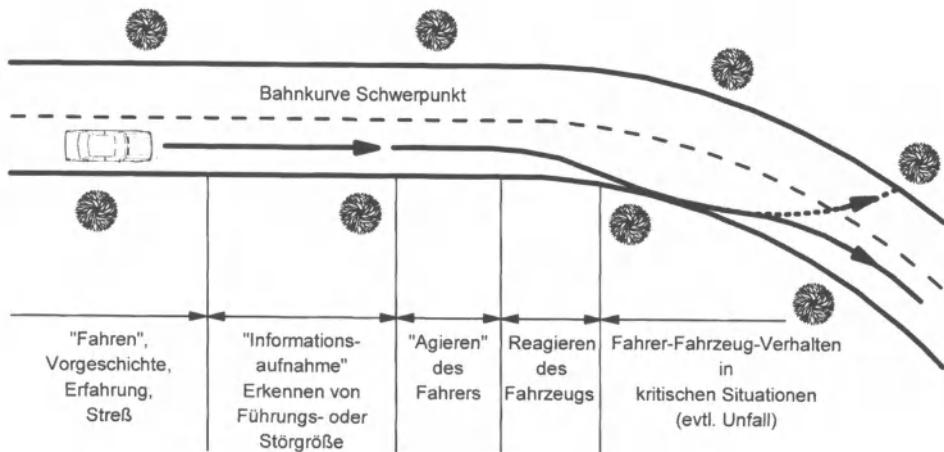


Bild 2.8 Zeitlicher Ablauf einer kritischen Situation am Beispiel einer Kurvenfahrt

Bild 2.8 Zeitlicher Ablauf einer kritischen Situation am Beispiel einer Kurvenfahrt

2.3 UNFALLART UND UNFALLTYP

Für Zwecke der Unfallanalyse, Unfallforschung und Sicherheitsforschung (s. Abschnitt 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

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 Bild 2.9 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.

2 Unfallsystematik

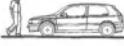
Bezeichnung	Unfallart	Unfalltyp	Kollisionsart	Kollisionstyp	Aufprallart	Aufpralltyp
Bezug	Betrachteter oder am schwersten betroffener Kontrahent	Art der Konflikt-auslösung (Einteilung der Polizei)	Betroffene Kollisions-kontrahenten	Geometrische Konstellation bei der Kollision	Ort der Beschädigung bzw.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

Bild 2.9 Einteilung des Unfallgeschehens (mit Beispielen)

Die (vereinfachte) Verkehrsunfallanzeige der Polizei enthält Merkmale der o.g. Unfallkategorien unter den dortigen Überschriften Unfallart, Unfalltyp, Unfallursachen, Hindernis, 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 Hindernissen (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).

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 die Bundesrepublik Deutschland im **Bild 2.10** vorgenommen.

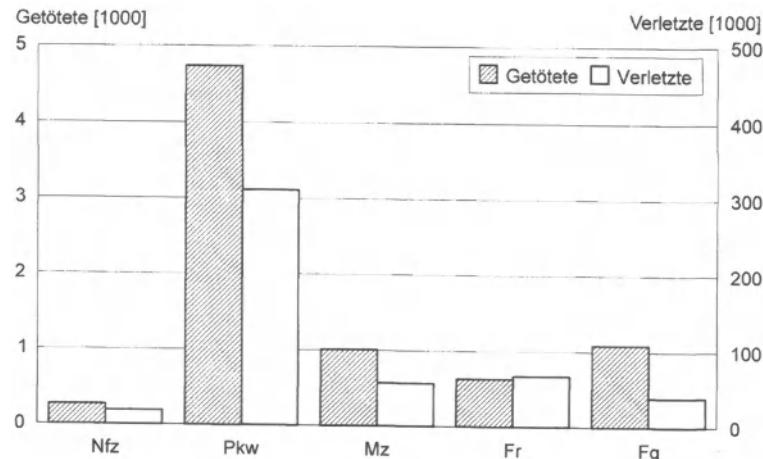


Bild 2.10 Verletzte und Getötete der Beteiligten bei verschiedenen Unfallarten (Deutschland 1998) [StBA 99]

Man erkennt, 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 gefährlichste Unfallart der Fußgängerunfall ist, da hier das Verhältnis von Getöteten zu Verletzten am höchsten ist.

Der **Unfalltyp** beschreibt die Situation des Verkehrsablaufes beim Unfall, siehe **Bild 2.9**. Hier sind sicherlich unterschiedliche Festlegungen denkbar. Schließt man sich der Einteilung an, wie sie in der polizeilichen Unfallaufnahme vorgenommen wird, so ergeben sich folgende sieben Unfalltypen [StBA 99]:

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

Die Häufigkeiten dieser Unfalltypen sind, unterschieden nach Ortslage, in **Bild 2.11** dargestellt. Bei den innerorts stattfindenden Unfällen zeigen erwartungsgemäß die EinbiegeKreuzungs-Unfälle eine ausgeprägte Dominanz, während bei Unfällen außerorts die Fahrunfälle und die Unfälle im Längsverkehr vorherrschen.

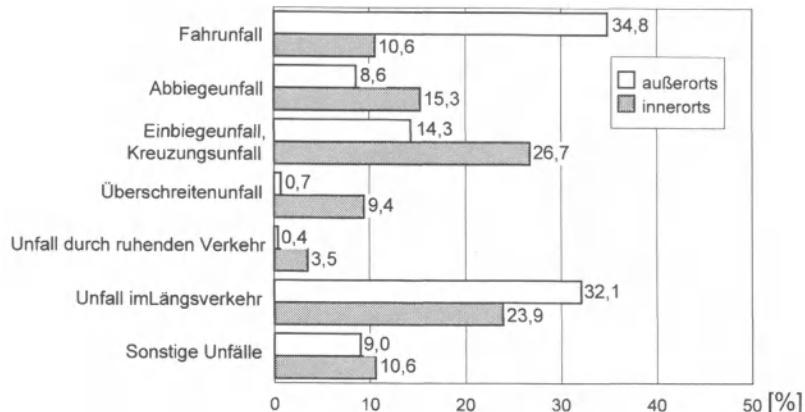


Bild 2.11 Häufigkeiten der Unfalltypen für Unfälle außerorts und innerorts im Jahr 1998 [StBA 99]

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 98]. 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.

In den **Bildern 2.12** und **2.13** 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. Die Kollisionsarten-Matrizen enthalten daher z.B. nur etwa 90 % aller im Straßenverkehr Getöteten.

Aus den **Bildern 2.12** und **2.13**, die sich auf das Unfallgeschehen in Deutschland im Jahre 1998 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- und der Pkw/Mz-Kollision (**Bild 2.12**)
- die Kollisionsarten mit den größten Zahlen der Getöteten sind der Pkw-Alleinunfall und die Pkw/Pkw-Kollision, gefolgt von der Pkw/Fg- und der Nfz/Pkw-Kollision (**Bild 2.13**).

2 Unfallsystematik

	Nfz	Pkw	Mz	Fr	Fg	Alleinunfälle
Nfz	2329	22352	3103	3587	2702	3213
Pkw		104490	33064	43148	27551	44824
Mz			883	1727	1531	10511
Fr				3757	3403	9016
Fg					0	0

Bild (Tabelle) 2.12 Kollisionsarten-Matrix für Kollisionen mit Verletzten (Anzahl der Alleinunfälle und der Unfälle mit zwei Beteiligten, Deutschland 1998) [StBA 99]

	Nfz	Pkw	Mz	Fr	Fg	Alleinunfälle
Nfz	58	593	119	148	177	100
Pkw		988	408	271	647	1898
Mz			26	20	20	283
Fr				9	12	129
Fg					0	0

Bild (Tabelle) 2.13 Kollisionsarten-Matrix für Kollisionen mit Getöteten (Anzahl der Alleinunfälle und der Unfälle mit zwei Beteiligten, Deutschland 1998) [StBA 99]

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 den Unfallsachverständigen zwar nützlich und zumindest interessant, kann aber über die polizeilichen Erhebungen und damit über die Angaben des Statistischen Bundesamtes nicht erfolgen. Eine derartige Vertiefung erfolgt auf der Basis spezieller Unfallerhebungen (s. Abschnitt 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 Bild 2.14 die möglichen und im realen Unfallgeschehen beobachteten Kollisionstypen dargestellt. Für die Frontalkollision, die Seitenkollision und den Auffahrungsfall 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 Daten der örtlichen Unfallerhebungen an der Medizinischen Hochschule Hannover (MHH) [Richter 84, Kramer 98], bei denen nur Unfälle mit Verletzten (AIS 1+) berücksichtigt werden, ergeben sich folgende Häufigkeiten.

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 %
Auffahrungsfall	Kollisionstypen IX und XI	4,0 %
	Kollisionstypen X und XII	2,5 %
		100,0 %

2 Unfallsystematik

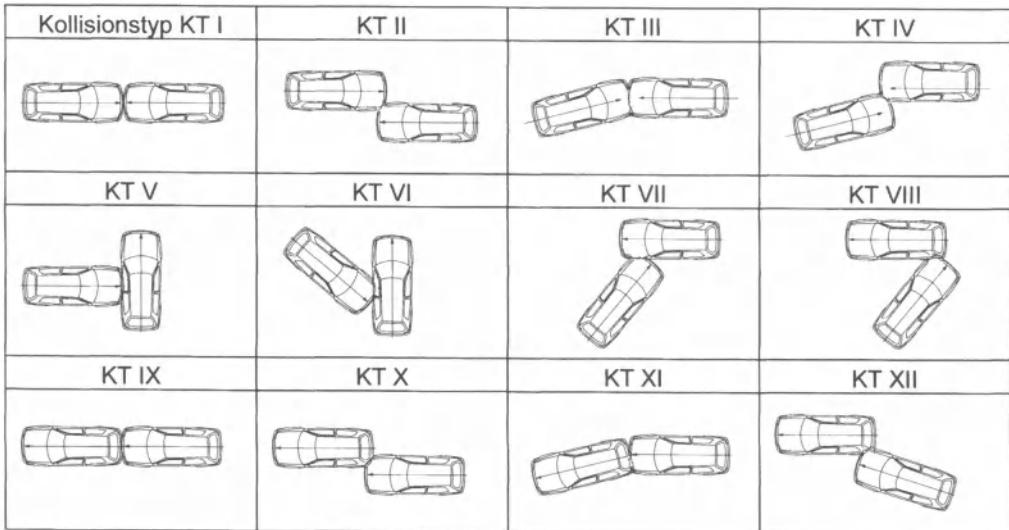


Bild 2.14 Kollisionstypen der Pkw-Pkw-Unfälle

Man erkennt die Dominanz der Frontalkollision mit etwa 55 % vor der Seitenkollision mit etwa 38 %. Die Kollisionstypen nach Bild 2.14 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 gesetzlich vorgeschriebene Crashtests an die Kollisionstypen I und II bei der Frontalkollision und V bei der Seitenkollision an.

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:

- 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 Seitenauftprall mit 27 %, siehe Bild 2.15 [Kramer 98]). Wählt man als Kriterium Getötete oder Verletzungsfolgekosten, so zeigt sich die besondere Gefährdung durch den Seitenaufprall. Neueste Untersuchungen belegen, dass der prozentuale Anteil der beim Seitenaufprall

Getöteten nahezu den der beim Frontalaufprall Getöteten erreicht. Hierin drückt sich die inzwischen hohe Schutzwirkung von Gurten und Front-Airbags aus. Würde man nicht nur Unfälle mit Verletzten, sondern alle Unfälle zu Grunde legen, würde der Anteil des Heckaufpralls stark ansteigen. Berücksichtigt man nur Reiselimousinen als Pkw, steigt der Anteil des Überschlags, da diese öfter in Alleinunfälle mit Überschlag verwickelt sind. Aus diesen Anmerkungen möge man ersehen, dass Ergebnisse von Unfalluntersuchungen in starkem Maße vom Untersuchungsmaterial und dessen Abgrenzungen abhängen (siehe z.B. Unterschiede zwischen **Bild 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.

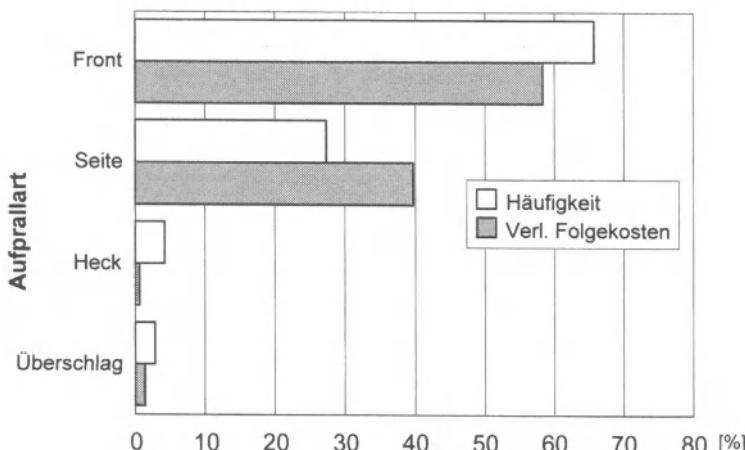


Bild 2.15 Aufprallarten bei Pkw-Kollisionen nach Häufigkeit und nach Verletzungsfolgekosten [Kramer 98]

Der **Aufpralltyp** spezifiziert die pauschalen Angaben der Unfallart, indem für Beschädigungen und für Stoßrichtungen genauere Angaben gemacht werden. Bei den 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“ (VIDI) [SAE J224 79], des Beschädigungsgrades oder der heute gültigen „Collision Deformation Classification“ (CDC) [SAE J224 94] erfolgen, siehe **Bild 2.16**.

Die **Bilder 2.17** und **2.18** enthalten quantitative Angaben zu den Häufigkeiten der Beschädigungen und der Anstoßrichtungen im Frontbereich von Pkw. Man erkennt, dass der häufigste Aufpralltyp beim Frontalaufprall der Schrägaufprall vorn links mit teilweiser Überdeckung (Offset) ist. In der Europäischen Gesetzgebung ist dies mit dem Frontaufprall nach ECE-R 94 bzw. Richtlinie 96/79/EG, abgesehen von der schrägen Anstoßrichtung, berücksichtigt worden, siehe **Bild 3.41**. 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 **Bilder 3.41 bis 3.45**.

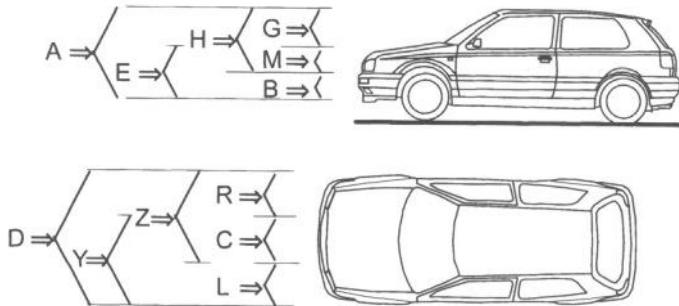


Bild 2.16 Einteilung der Aufpralltypen für frontal kollidierende Pkws nach der Collision Deformation Classification (CDC) [SAE J224 94]

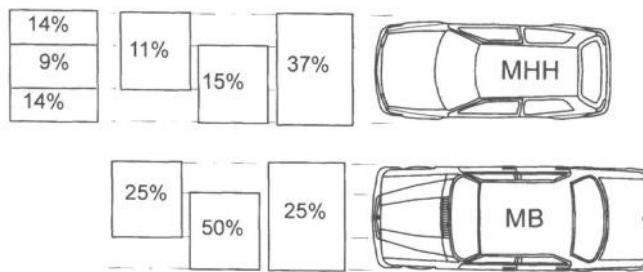


Bild 2.17 Häufigkeiten der Aufpralltypen für die Pkw-Front nach der CDC. Ergebnisse der Verkehrsunfallforschung der MHH und der MB-Unfallforschung [Appel 73]

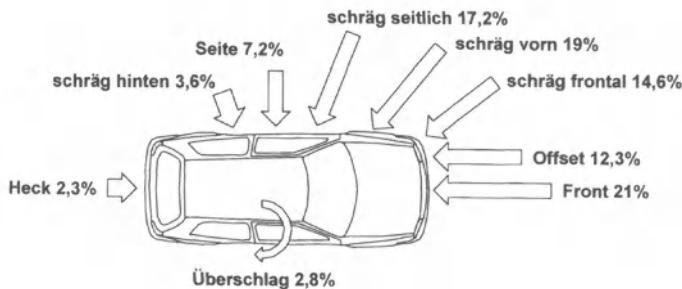


Bild 2.18 Häufigkeit von Anstoßrichtungen beim Pkw-Aufprall. Anstöße links und rechts zusammengefasst. Nach Verkehrsunfallforschung der MHH [Appel 98]

2.6 BELASTUNGS- UND VERLETZUNGSSARTEN 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-Schutzbekleidung einschließlich Helm
- Verbundsicherheitsglas
- Sicherheitsgurt mit Straffer und Kraftbegrenzer
- 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. Contre-coup-Verletzungen an der stoßabgewandten Seite des Gehirns, Schädel-Hirn-Traumata, Hyperextensionen oder Hyperflexionen der Gelenke oder der Wirbelsäule durch die Trägheitswirkung des Kopfes gegenüber im Thorax eingeleiteten Kräften). Kennzeichnend für Verletzungen infolge indirekter Krafteinwirkung ist, dass keine Prellungen, äußere Hämatome, Weichteilverletzungen zugeordnet werden können.

2 Unfallsystematik

In etwas feinerer Unterteilung zeigt Bild 2.19, daß bei angegurteten Pkw-Insassen (kein Airbag) die direkte Krafteinwirkung als Belastungsart mit ca. 60 % dominiert. Der Airbag wird diesen Anteil, zumindest bei schweren Verletzungen, vermindern. Für die **Verletzungsart** der Verunglückten lässt sich folgende vereinfachte Unterteilung angeben.

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

Die häufigsten Verletzungen bei Verkehrsunfällen sind die Weichteilverletzungen, gefolgt von Frakturen und Organverletzungen, siehe Bild 2.20.

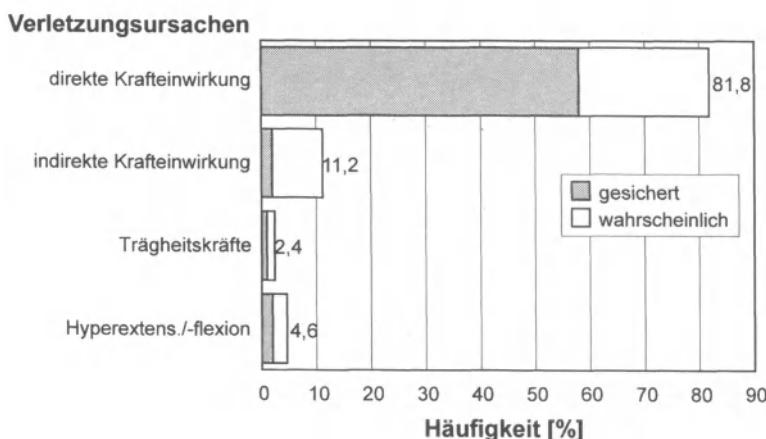


Bild 2.19 Aufteilung der Belastungsarten für angegurtete Pkw-Insassen [Kramer 98]

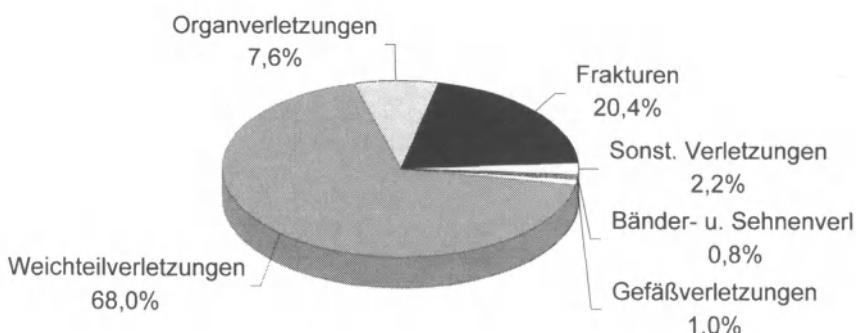


Bild 2.20 Aufteilung der Verletzungsarten für angegurtete Pkw-Insassen beim Pkw-Frontalaufprall [Kramer 98]

3 UNFALLFORSCHUNG

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 **Bild 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.

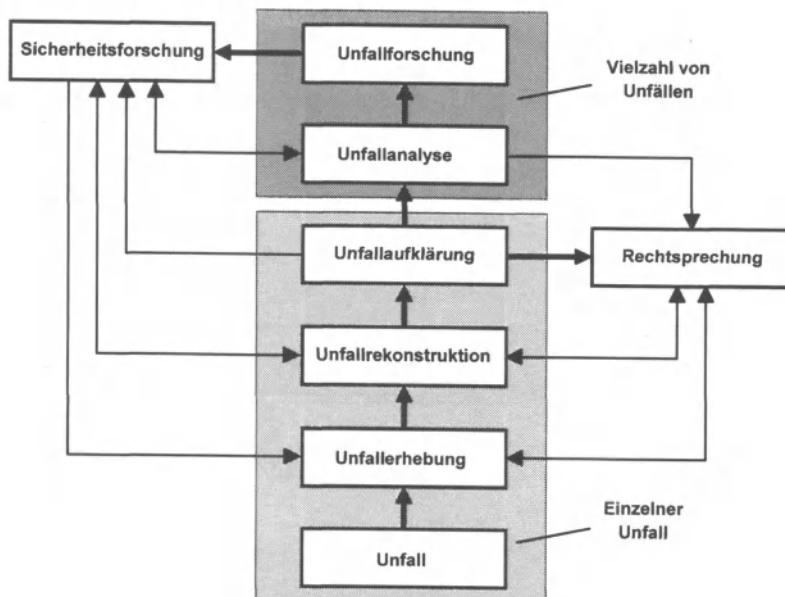


Bild 3.1 Bearbeitungskette Unfallerhebung - Unfallforschung

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.

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 **Bild 3.2**. Die Unfallerhebungen erfolgen im allgemeinen durch die Polizei, in Sonderfällen durch Unfallsachverständige, durch Krankenhäuser, durch spezielle Forschungsteams von Universitäten, Fahrzeugherrstellern 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.

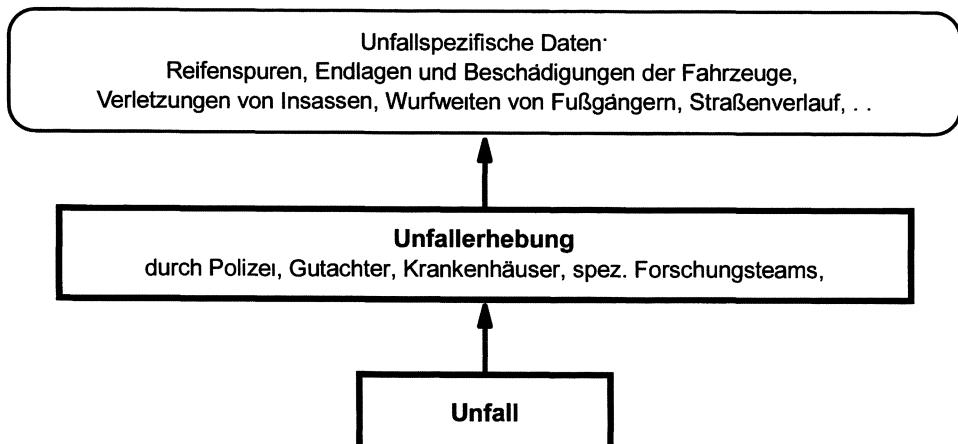


Bild 3.2 *Unfall und Unfallerhebung*

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

- Einlaufphase
- Kollisionsphase
- 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 . . .).

3 Unfallforschung

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 81] wird folgende Einteilung getroffen [DIN 92, ISO 95]:

- allgemeine Unfalldaten
- Daten vom Unfallort
- Daten vom Unfallfahrzeug
- Daten von Unfallbeteiligten
- sonstige Unfalldaten.

Neben diesen „unfallspezifischen Daten“ werden später für die Unfallrekonstruktion allgemein gültige „Grundlagendaten“ oder „Grunddaten“ benötigt, s. Abschnitt 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 äußeren 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 **Bild 3.3**) und ihrem Auftrag unterschiedlich. Im **Anhang 8.2** sind als Beispiele einige Unfall-Erhebungsbögen des interdisziplinären Forschungsteams an der Medizinischen Hochschule Hannover beigefügt.

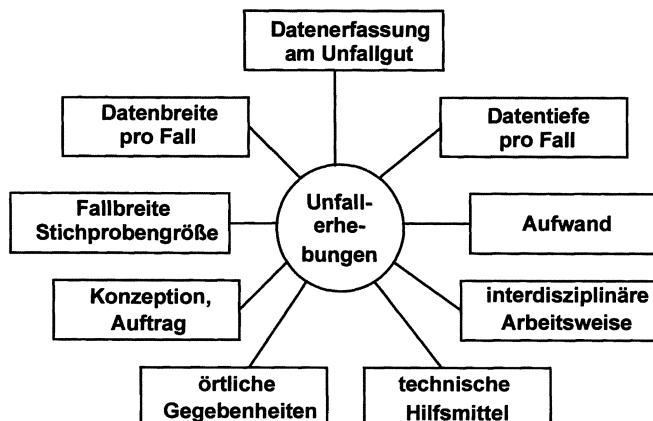


Bild 3.3 Besonderheiten bei Unfallerhebungen je nach Gegebenheiten, Aufnahmезweck und Art der Unfallaufklärung

3 Unfallforschung

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)
- 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 **Bild 3.4**. Rechtsgrundlage für die Zusammenstellung der Straßenverkehrsunfalldaten ist mit der letzten Änderung im Jahre 1994 das „Gesetz zur Durchführung einer Straßenverkehrsunfallstatistik“. 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.

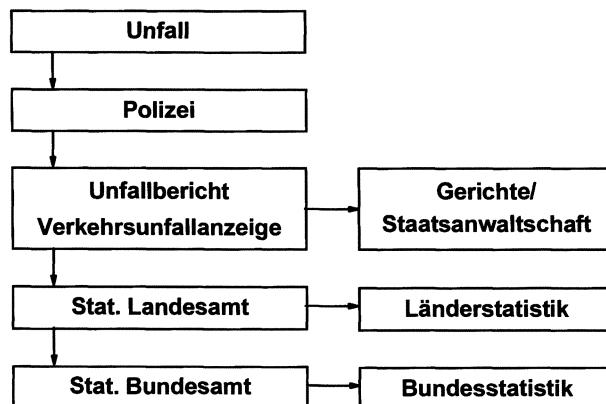


Bild 3.4 Verwendung der Daten der polizeilichen Unfallaufnahme

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

3 Unfallforschung

schwerwiegenden Unfalls mit Personenschaden 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 Personenschaden 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 Sachschaden 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 Abschnitt 3.5 gegeben. Aus der Sicht der vertieften Unfallaufklärung oder der Unfallforschung liegen Unzulänglichkeiten der Art und des Umfanges 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:

- stärker verbreitete Einführung 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 Abschnitt 5.1.4).

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 Unfallspuren 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 drei Jahrzehnten in ver-

3 Unfallforschung

schiedenen 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 1.000 Fälle aller Unfallarten mit jeweils bis zu 1.500 Daten aufgenommen. In der Zwischenzeit wird das Programm von einigen Automobilfirmen unterstützt, wobei den Firmen die Erhebungen von Unfällen mit ihren Fahrzeugtypen überlassen werden. In Dresden ist im Jahre 1999 an der dortigen Technischen Universität ein zweites Team installiert worden, das nach der gleichen Erhebungsmethode wie in Hannover arbeitet. Ziel ist auch hier die Aufnahme von etwa 1.000 Unfällen pro Jahr. Die Finanzierung erfolgt durch die deutschen Automobilhersteller und Zulieferer über die Forschungsvereinigung Automobil Technik (FAT) des Verbandes der Deutschen Automobilindustrie (VDA). Die erhobenen Daten werden in einer Datenbank GIDAS (German In-Depth Accident Study) gespeichert und unter verschiedenen Aspekten ausgewertet.
- Die Firmen DC bzw. BMW betreiben seit etwa 1960 bzw. 1970 Untersuchungen von Unfällen, an denen ihre Pkw, Lkw oder Motorräder beteiligt sind [Zeidler 82]
- Die Firma VW hat im Jahre 1999 ein Team aufgebaut, das im Raum Wolfsburg Unfallerhebungen am Unfallort mit den daran sich anschließenden Untersuchungen vornimmt.
- In den USA wurde im Jahre 1979 unter Förderung der NHTSA das InDepth-Untersuchungsprogramm NASS begonnen. Etwa 25 über die USA verteilte Teams nehmen in ihrer Umgebung Unfälle auf. 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 5.000 Unfälle pro Jahr untersucht, wobei pro Unfall etwa 400 Daten aufgenommen werden. Gesonderte Unterprogramme konzentrieren sich auf spezielle Sicherheitsbereiche und Untersuchungsmethoden, so z.B. FARS für Unfälle mit tödlichen Verletzten.
- In Großbritannien nimmt die „Accident Research Group“ der Universität in Birmingham seit Ende der 60er Jahre Unfälle am Unfallort auf. Dabei konzentrieren sich die Erhebungen meist auf spezielle Unfallarten. Inzwischen beteiligt sich das TRL nicht nur unterstützend, sondern mit eigenen Teams an derartigen Untersuchungen. Es werden zwischen 50 und 100 Unfälle pro Jahr aufgenommen [Mackay 68].
- In Frankreich sind drei Untersuchungsteams im Auftrage von INRETS installiert. Die Automobilfirma PSA Peugeot Citroen unterstützt das Vorhaben. Umfang und Datentiefe ähneln dem MHH-Programm.
- In Holland werden von der dortigen Sicherheitsbehörde TNO seit September 1999 Unfälle mit motorisierten Zweirädern in dem Programm „In depth accident research“ untersucht. Pro Jahr sollen etwa 200 Unfälle vor Ort aufgenommen und danach rekonstruiert werden. Die Ergebnisse sollen die Regierung bei dem Bemühen unterstützen, bis zum Jahre 2010 die Zahl der im Straßenverkehr Verunglückten zu halbieren.

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 Unfall-

3 Unfallforschung

rekonstruktion bis hin zur Unfallforschung durchgeführt [Otte 82]. Ein interdisziplinäres Team aus Medizinern, Technikern und ggf. Psychologen arbeitet im Dreischichtbetrieb und fährt unmittelbar nach der Meldung eines Unfalls mit Personenschaden 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 Personalressourcen 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 der befragende Psychologe glaubhafte Aussagen der Beteiligten erhält, 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 mittels Stereo-fotographie festgehalten, 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 8.2**) mit jeweils etwa zehn bis dreißig Einzelangaben. Die Bögen 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 Verletzungursachen.

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:

3 Unfallforschung

- 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 Unfalleingangsgrößen, Sicherheitseigenschaften und Verletzungsausgangsgrößen systematisch darstellte, war lange Zeit Ausgangspunkt aller Nutzen/Kosten-Analysen im Sicherheitsbereich.
- GDV (ehemals HUK-Verband) sammelt die den Versicherungen in Deutschland vorliegenden Unfallgutachten, in denen es um zivilrechtliche Auseinandersetzungen geht. Vorzugsweise handelt es sich um die Erfassung von Fahrzeugen, bei denen im Rahmen von Kaskoversicherungen Schadensansprüche zu regulieren sind. Neben der polizeilichen Verkehrsunfallanzeige liegen üblicherweise die Unfallrekonstruktion bzw. Unfallaufklärung auf Grund der strafrechtlichen Auseinandersetzung und der hier eingebrochenen Vorgutachten vor, so dass die Nacharbeiten und Überprüfungen hierauf aufsetzen können. Hinzu kommen ggf. Heilungsverläufe, Befragungen, Obduktionsbefunde. Auf Basis von Einzelfällen und auf statistischer Basis werden zu wechselnden Schwerpunktthemen (z.B. Schutzwirkung von Sicherheitsgurten oder von Airbags) Auswertungen vorgenommen, siehe z.B. [HUK 94].
- 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].
- 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.
- Automobilhersteller wie DC, VW oder BMW unterhalten eigene Unfallforschungsteams, die teilweise vor Ort Unfälle aufnehmen, teilweise die beschädigten Fahrzeuge (DC z.B. im Stuttgarter Raum) später eingehend untersuchen und teilweise von der MHH 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 bewahrt haben. Die deformierbare Lenkanlage ist z.B. aus derartigen Untersuchungen zu Beginn der 50er Jahre hervorgegangen [Gögler 68].
- 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 **Bild 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 der MHH 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. **Bild 3.6** stellt die wichtigsten, mit Unfallerhebungen und weiterführenden Unfalluntersuchungen befassten Institutionen nach Erhebungszielen zusammen.

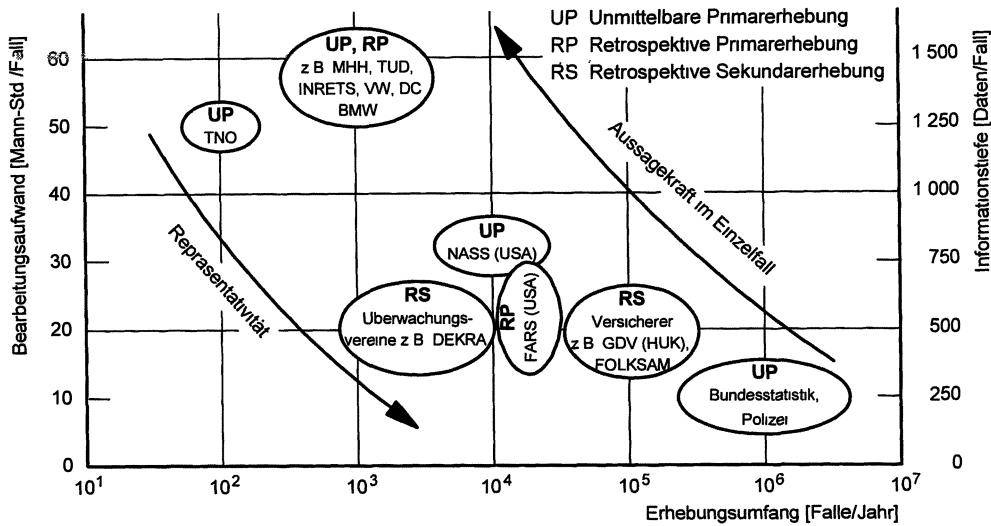


Bild 3.5 Erhebungsumfang, Bearbeitungsaufwand und Informationstiefe bei Unfallerhebungen (qualitativ bis quantitativ)

Institution	Erhebungs-, Untersuchungsziel	Datenverwendung	Art der Erhebung
Polizei	Tatbestandssicherung zur Schuldfrage	Strafrecht, Zivilrecht, Unfallstatistik	unmittelbare Primärerhebungen
MHH, TUB, TRL, INRETS, TNO	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
GDV, 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

Bild (Tabelle) 3.6 Übersicht der unfallerhebenden und unfalluntersuchenden Institutionen

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 **Bild 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.
- 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.

3 Unfallforschung

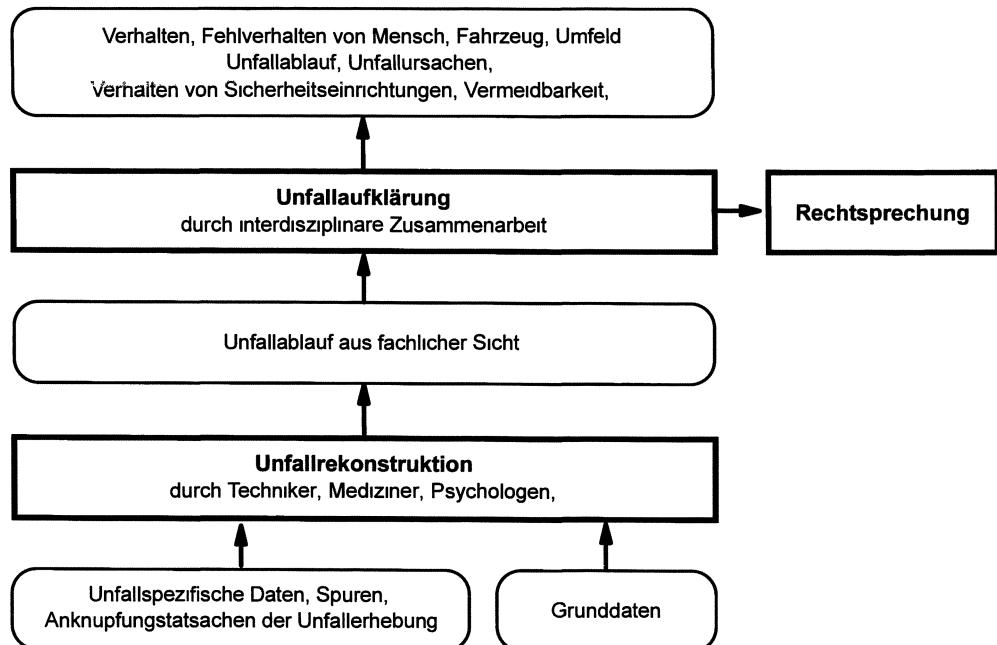


Bild 3.7 Unfallrekonstruktion und Unfallaufklärung eines Unfalls

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 Grundlagendaten 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]

- 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

3 Unfallforschung

Von der Unfallaufklärung werden spezielle Antworten zu Fragestellungen aus der Sicht der Rechtsprechung (siehe **Bild 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 Ergebnisse der Unfallaufklärung zusammen mit Aussagen von Unfallbeteiligten bzw. Unfallzeugen maßgeblich für die Urteilsfindung, siehe **Bilder 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 Unfallablaufes mittels Computer-Simulation).

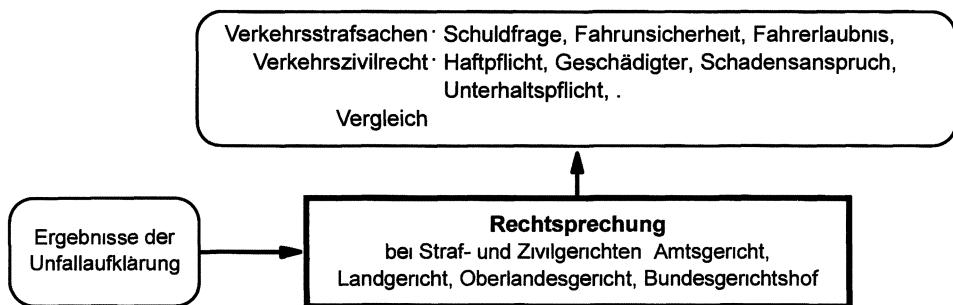


Bild 3.8 Rechtsprechung und Unfallaufklärung

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, s. **Bilder 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 Seitenauftprall enthalten.

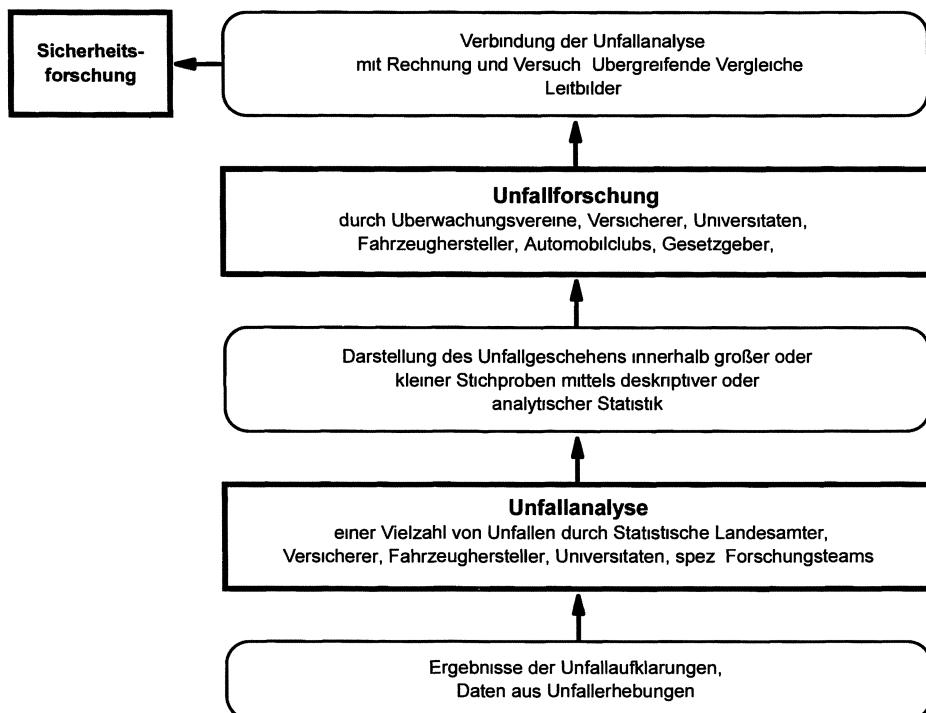


Bild 3.9 Unfallanalyse und Unfallforschung

Beispiele für die auswertenden Institutionen und für die angestrebten Ergebnisse sind in den **Bildern 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 **Bild 3.10** die von der Unfallanalyse zu erwartenden Ergebnisse, Angaben und Inhalte.

3 Unfallforschung

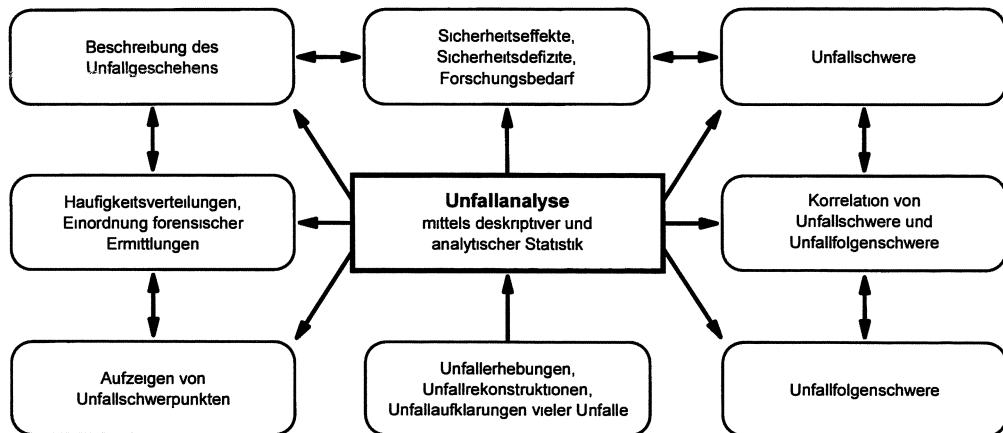


Bild 3.10 Ausgewählte Bereiche und Ziele der Unfallanalyse

Die wichtigsten Ergebnisse der deskriptiven Statistik finden sich in den vom Statistischen Bundesamt jährlich fortgeschriebenen Straßenverkehrsunfalldaten, z.B. [StBA 99]. Als Teil und zur Vorbereitung der analytischen Statistik sind Korrelationen von Unfallschwere und Unfallfolgenschwere von besonderer Bedeutung. Die beiden Begriffe werden im Abschnitt 3.5 erläutert, ausgewählte, neue Ergebnisse der Unfallanalyse im Abschnitt 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 Bild 3.11 ist in allgemeiner Weise der Zusammenhang von Unfallschwere und Unfallfolgenschwere dargestellt.

3 Unfallforschung

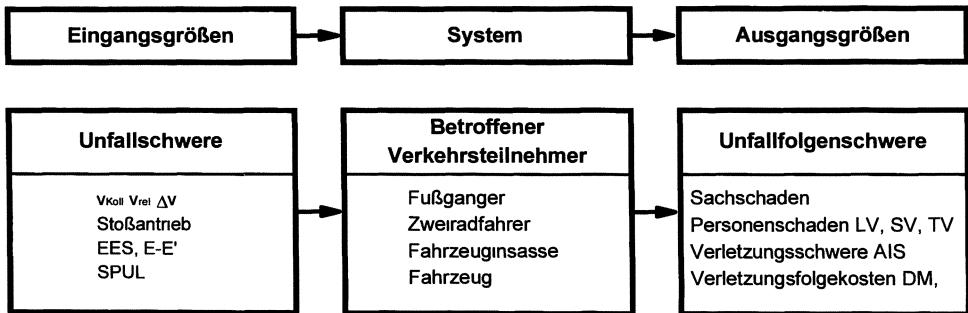


Bild 3.11 Unfallschwere und Unfallfolgenschwere als Eingangs- und Ausgangsgrößen im Unfallgeschehen bzw. in der Unfallforschung

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 über eine monetäre Bewertung zusammengeführt werden [Appel 73, 84/1, Kramer 82, 90, 98].

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 Kraftwagen mit ungeschützten Verkehrsteilnehmern ist das wichtigste Maß für die Unfallschwere die

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

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 äußereren 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, undefinierbares Hindernis zu der gleichen bleibenden Energieabsorption $E - E'$ führen würde. Formelmäßig lautet also die Definition

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

3 Unfallforschung

EES kann von erfahrenen Sachverständigen mit einer Genauigkeit von etwa $\pm 5 \text{ km/h}$, die Deformationsenergie kann ggf. aus Energierastern (siehe **Anhang 8.1**) ermittelt werden, sofern diese vorliegen.

Beim geraden, zentralen Front-, Heck- oder Seitenstoß (siehe z.B. Bild 3.13) kann man unter der Voraussetzung linearer Kraft-Deformationskennung eine Beziehung zwischen der EES und den Deformationen ableiten [Burg 84, Danne 99], wenn man die Gesamtdeformationsenergie kennt oder abschätzt:

$$EES_1 = \sqrt{\frac{2 * W_{Def} * s_1}{(s_1 + s_2) * m_1}} \quad EES_2 = \sqrt{\frac{2 * W_{Def} * s_2}{(s_1 + s_2) * m_2}}$$

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 Abschnitt 4.5.5), leichter abzuschätzen oder vorzugeben sind als EES_1 und EES_2 . Dies wird nur in Ausnahmefällen zutreffen.

In **Bild 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 Abschnitt 4 erläutert.

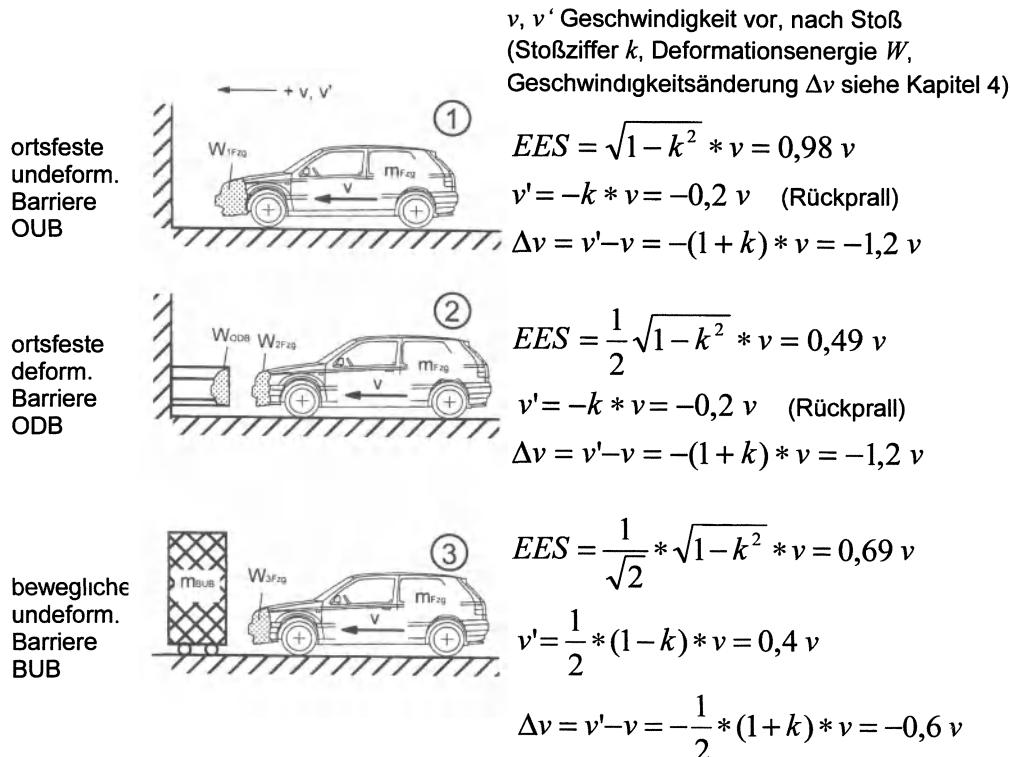


Bild 3.12 Unfallschweren EES und Δv eines Fahrzeugs beim Frontalaufprall auf verschiedene Hindernisse (Annahmen: $k=0,2$, $m_{BUB}=m_{Fzg}$, $W_{ODB}=W_{2Fzg}$)

3 Unfallforschung

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

- Δv (des seitlich gestoßenen Fahrzeugs)
- EES (des seitlich gestoßenen Fahrzeugs)
- Intrusion (des seitlich gestoßenen Fahrzeugs)
- v_{Koll} Kollisionsgeschwindigkeit des stoßenden Fahrzeugs. Mit nahezu dieser Geschwindigkeit wird der Insasse im gestoßenen Fahrzeug anfangs getroffen, da die Seite „weicher“ als die Front ist. Seitenversteifungen und Seitenairbags sollen hier in Zukunft Verbesserungen, d.h. eine Minderung der Kontaktgeschwindigkeit bringen

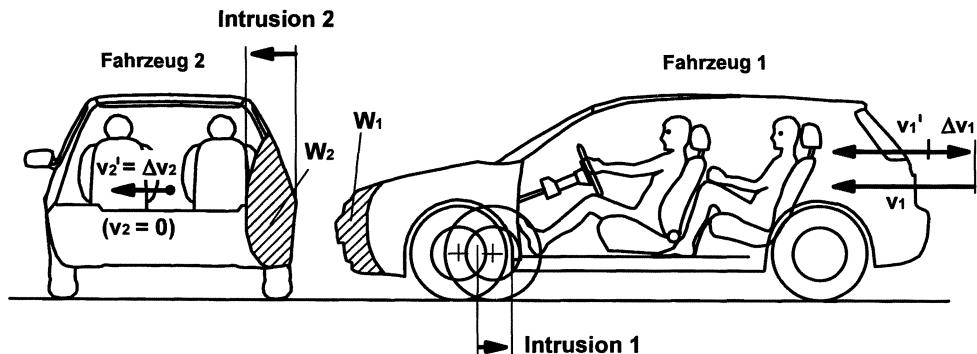


Bild 3.13 Größen zur Beschreibung der Unfallschwere bei der Pkw/Pkw-Seitenkollision
 Stoßendes Fahrzeug 1 : Δv_1 , EES_1 , Intrusion 1
 Gestoßenes Fahrzeug 2 : Δv_2 , EES_2 , Intrusion 2, v_1

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 $|\Delta v| = 2 \cdot v_{Koll}$, EES dagegen Null. Bei Stoßen mit Abgleiten ist EES bei steigender Kollisionsgeschwindigkeit nahezu konstant, während $|\Delta v|$ mit v_{Koll} abnimmt, siehe Abschnitt 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

3 Unfallforschung

Experten bei etwa ± 5 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 Abschnitt 4 und insbesondere 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 Abschnitt 4.4.7 und 4.5.5:

Fall der beweglichen, undeformierbaren Barriere (BUB)

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

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

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

Fall der beweglichen, deformierbaren Barriere (BDB)

Δv wie oben

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

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

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:

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

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

Daraus folgt, dass bei einer Frontalkollision zweier gleicher Fahrzeuge idealerweise sowohl die Geschwindigkeitsänderung wie die *EES* und auch die Crashpulse dem Aufprall auf eine

3 Unfallforschung

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 Seitenauftprall, aber auch beim Frontalaufprall (Fußverletzungen, Prellschlagsyndrom)
- Art des Crashpulses, z.B. bei verspäteter Auslösung des Airbags
- **SPUL = $\Delta v * a_m$** Spezifische Unfall-Leistung. Diese von [Kramer 90, 98] 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 Bild 3.14 gezeigt, wie die Anstoßfläche, die Anstoßrichtung, der Deformationsgrad und die Art des Zusammenpralls in einem siebenstöckigen Index beschrieben wird. Der VIDI kennzeichnet die Änderungen der inneren Abmessungen des Fahrzeugs. In einem ebenfalls siebenstöckigen 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 im Bild 2.16. Heute hat der CDC den VDI weitgehend abgelöst
- **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 8.3. 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 Abschnitt 4, ableiten.

3 Unfallforschung

Mit $m_1 * a_{\max 1} = m_2 * a_{\max 2}$, $a_m = \frac{1}{2} a_{\max}$

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

folgt $a_{\max 1} = \frac{m_1 * EES_1^2 + m_2 * EES_2^2}{m_1 * (s_1 + s_2)}$

$$a_{\max 2} = \frac{m_1 * EES_1^2 + m_2 * EES_2^2}{m_2 * (s_1 + s_2)}$$

Für den Aufprall gegen eine starre Wand gilt:

$$\frac{1}{2} * m * a_{\max} * s = \frac{1}{2} * m * EES^2$$

$$a_{\max} = \frac{EES^2}{s}$$

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/s² bei einer maximalen Verzögerung a_{\max} von 320 m/s².

3 Unfallforschung

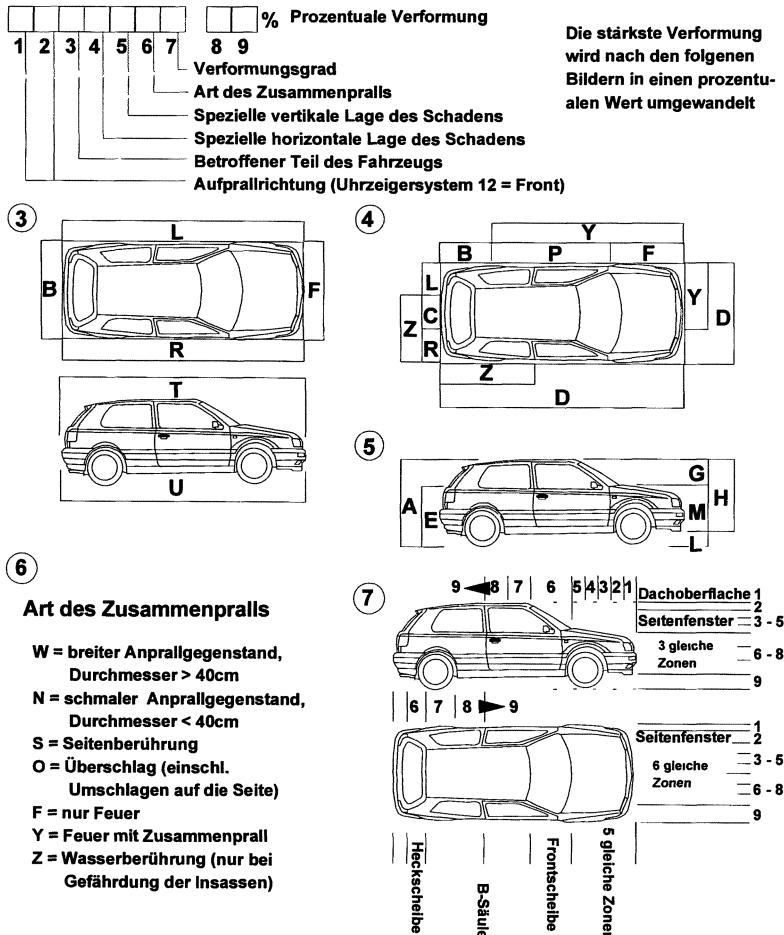


Bild 3.14 VDI Vehicle Deformation Index [SAE J224]

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 Verletzungen 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 98]. 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

3 Unfallforschung

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 in der 4. Auflage aus dem Jahre 1990 [AAAM 90, Kramer 98]. Für die sieben Körperregionen

- Kopf
- Hals
- Thorax
- Abdomen
- Wirbelsäule
- Extremitäten und knöchernes Becken
- Körperoberfläche, Haut

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 **Bild 3.15** gezeigt [States 80, AAAM 90, Kramer 98]. Zusätzlich wird für jede AIS-Klasse der statistisch ermittelte Wert der Letalitätsrate angegeben, dem Hauptkriterium für die AIS-Einteilung [Appel 73, Kramer 98]. Man erkennt, dass der Zusammenhang zwischen AIS-Wert und Grad der Lebensbedrohung nichtlinearprogressiv 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 **Bild 3.16**.

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 gebildet, wobei die Quadratur die Progressivität der AIS-Skala widerspiegelt:

$$ISS = AIS_1^2 + AIS_2^2 + AIS_3^2$$

3 Unfallforschung

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 98].

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 Hirnstammbulbung, 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

Bild (Tabelle) 3.15 Verletzungsschweregrad nach AIS, Verletzungsbeispiele und Letalitätsrate [Kramer 98]

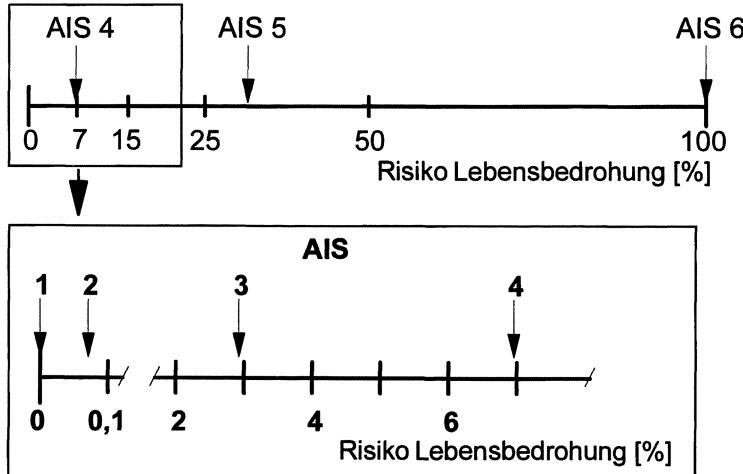


Bild 3.16 Zusammenhang zwischen AIS-Skalierung und der Grad der Lebensbedrohung bzw. der Letalitätsrate

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 zwischen 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 Bild 3.17 am Beispiel der MAIS von verunglückten Pkw-Insassen (bei Frontalkollisionen) in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsänderung Δv veranschaulicht [Otte 98]. Man kann z.B. 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. Man kann also im Sinne der Unfallrekonstruktion leider nicht von Δv oder v_{Koll} auf MAIS bzw. AIS 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 1997 ermittelt [Kramer 98] folgende Kosten für die einzelnen MAIS-Werte:

3 Unfallforschung

- MAIS 0: unverletzt DM 0,-
- MAIS 1: gering verletzt DM 13.000,-
- MAIS 2: mäßig verletzt DM 69.000,-
- MAIS 3: schwer verletzt DM 240.000,-
- MAIS 4: bedeutend verletzt DM 550.000,-
- MAIS 5: kritisch verletzt DM 1.400.000,-
- MAIS 6: maximal verletzt DM 1.800.000,-

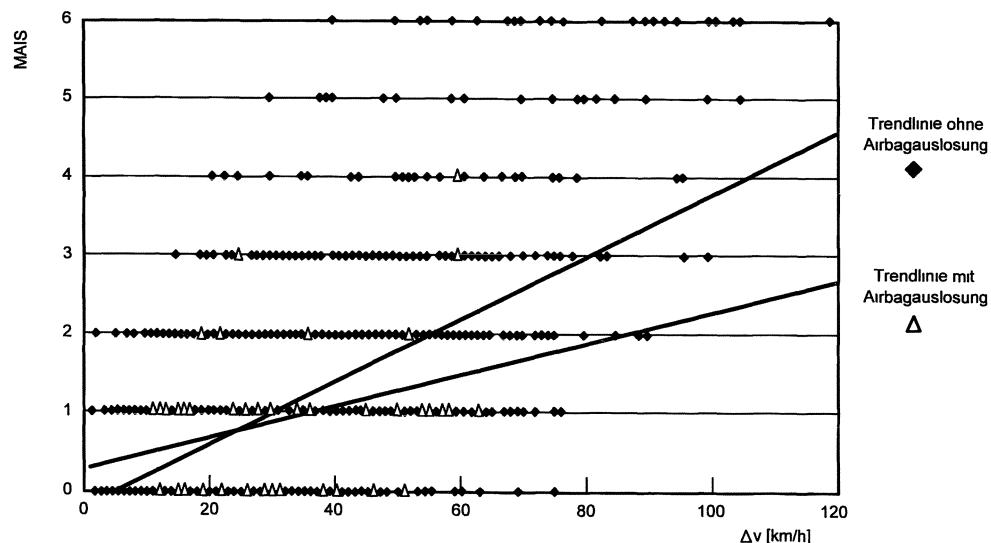


Bild 3.17 Verletzungsschwere MAIS in Abhängigkeit von Δv bei Pkw-Frontalkollision ohne und mit Airbag. Pkw-Insassen bei Frontalkollision mit Pkw, Lkw oder Objekt

Anhand der MAIS-Kosten kann man die volkswirtschaftlichen Verluste berechnen, die z.B. im Jahre 1997 allein durch Personenschäden bei Straßenverkehrsunfällen in Deutschland entstanden sind. Dazu werden vereinfachend und näherungsweise den in der amtlichen Statistik ausgewiesenen Leichtverletzten die Verletzungsschwere MAIS 1, den Schwerverletzten MAIS 3 und den tödlich Verletzten MAIS 6 zugewiesen:

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

$$\text{Verletzungsfolgekosten 1997} = 385.680 * \text{DM } 13.000 + 115.414 * \text{DM } 240\,000 +$$

$$8.549 * \text{DM } 1.800.000$$

$$= \text{DM } 48.101.400.000,-$$

Man erkennt, dass Straßenverkehrsunfälle mit Verletzungsfolgekosten von etwa 48 Mrd. DM allein aus ökonomischer Sicht der Volkswirtschaft der Bundesrepublik Deutschland einen sehr großen Stellenwert haben, unabhängig von nichtmonetären, ethischen und menschlichen Bewertungen.

3.6 UNFALLFORSCHUNG, SICHERHEITSFORSCHUNG

Unfallforschung (s. **Bild 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, s. **Bild 3.18**. Wesentliche 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, s. **Bilder 3.9, 3.10, 3.18 und 3.19**, sind fließend und überlappend, scharfe Grenzen lassen sich nicht immer angeben. Das Spektrum der Arbeits- bzw. Zielbereiche der Sicherheitsforschung ist in **Bild 3.19** 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 **Bild 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 Abschnitt 3.7.

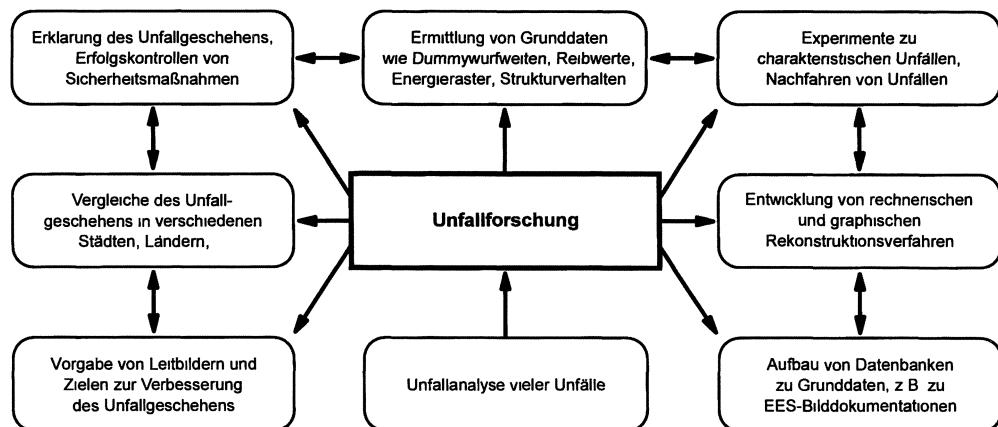


Bild 3.18 Unfallforschung, ausgewählte Bereiche und Ziele

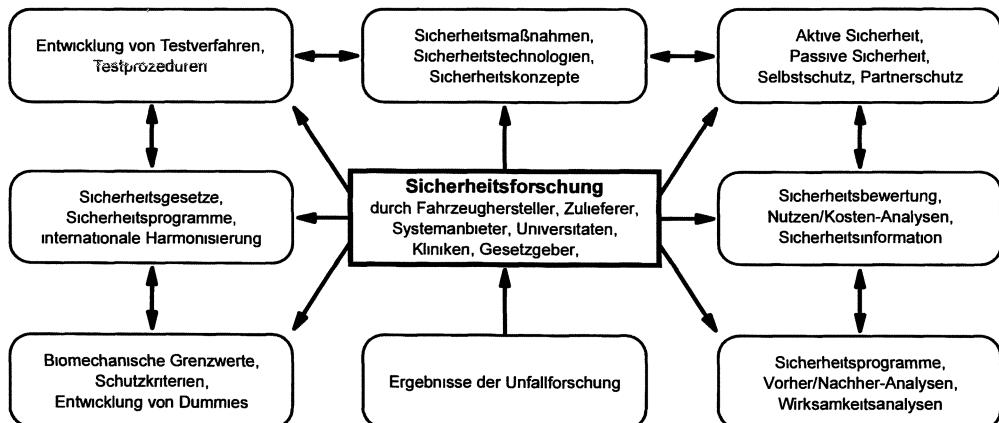


Bild 3.19 Sicherheitsforschung, ausgewählte Bereiche und Ziele

3.7 AUSGEWÄHLTE ERGEBNISSE DER UNFALLANALYSE, UNFALLFORSCHUNG UND SICHERHEITSFORSCHUNG

Im Abschnitt 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]. Bei der Auswahl der Bilder 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, 98]. 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 Bilder 3.20 bis 3.24 beziehen sich auf allgemeine statistische Angaben. Die Zahl der Getöteten in Deutschland ist seit 1970 auf ein Drittel zurückgegangen. Darin drückt sich die Erhöhung der aktiven und der passiven Sicherheit vom Fahrzeug, Umfeld und Verkehrsteilnehmer aus. Betrachtet man als Maß der aktiven Sicherheit die Zahl der Unfallfahrzeuge, bezogen auf den Fahrzeugbestand, so ergibt sich ebenso ein Rückgang um den Faktor drei. Das plausible Maß der passiven Fahrzeugsicherheit, die Verletzungskosten pro Unfall, zeigt sogar ein Rückgang um den Faktor fünf [Kramer 98]. Die Zahl der Verletzten ist etwa gleich geblieben, die Verletztenrate (Bezug Verkehrsleistung) aber ebenfalls deutlich gesunken. Besonders hoch, bezogen auf den Anteil an der Gesamtbewölkerung, ist die Zahl der Getöteten bei den Jugendlichen im Alter zwischen 18 und 25 Jahre. Im internationalen Vergleich schneiden die alten Bundesländer gut, die

neuen schlecht 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. Die stetig auf der Grundlage der Unfallforschung verbesserte passive Sicherheit von Pkw ist in ihrer zeitlichen Entwicklung in Bild 3.20 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 Bild 3.24. Demgegenüber sind Pkw-Insassen um den Faktor zehn, Motorradfahrer um den Faktor 100 stärker gefährdet.

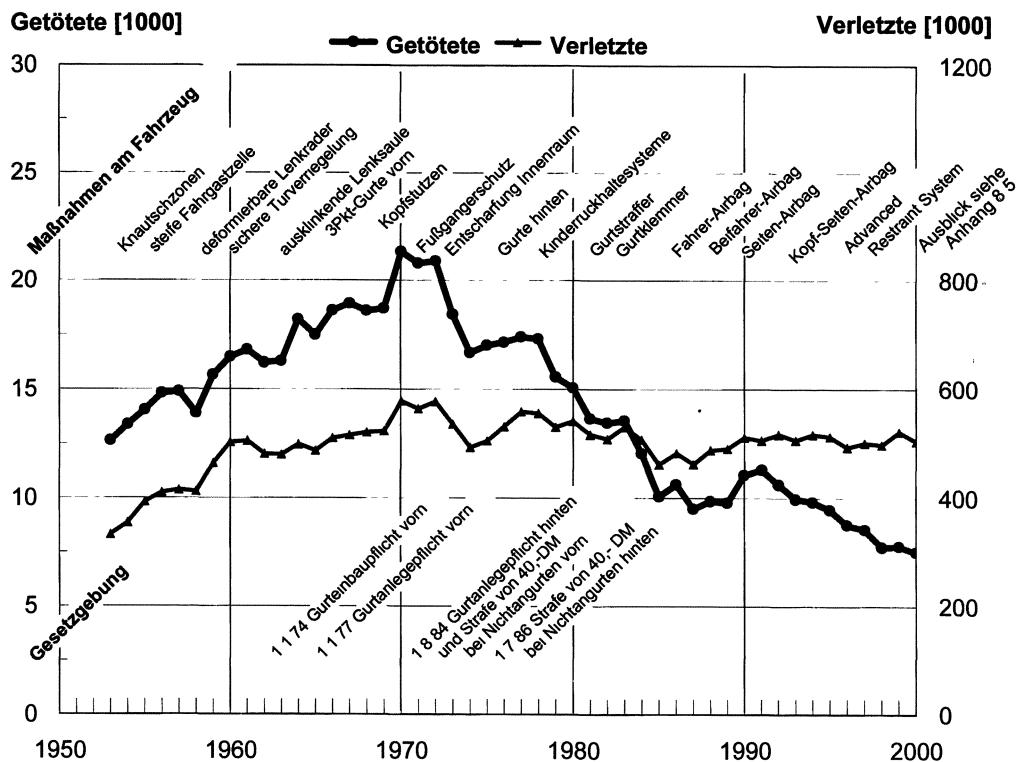


Bild 3.20 Zeitlicher Verlauf der im Straßenverkehr Verletzten und Getöteten 1953 bis 1999, Bundesrepublik Deutschland, bis 1990 nur alte Bundesländer. Angabe einiger Sicherheitsmaßnahmen und gesetzlicher Regelungen [StBA 99, Angabe der BASt 2001]

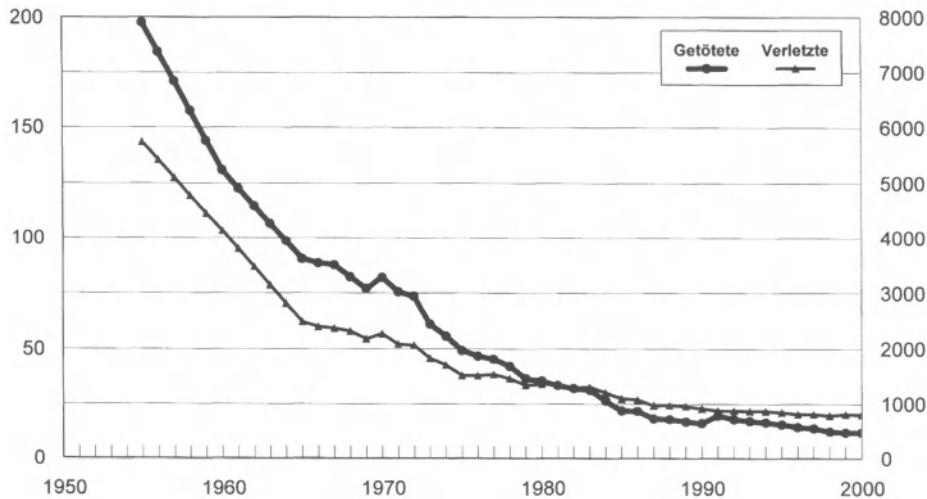


Bild 3.21 Zeitlicher Verlauf der Getöteten- und Verletztenrate im Straßenverkehr, 1953 bis 2000, Verkehrsleistung als Bezug, Bundesrepublik Deutschland, bis 1990 nur alte Bundesländer [StBA 99]

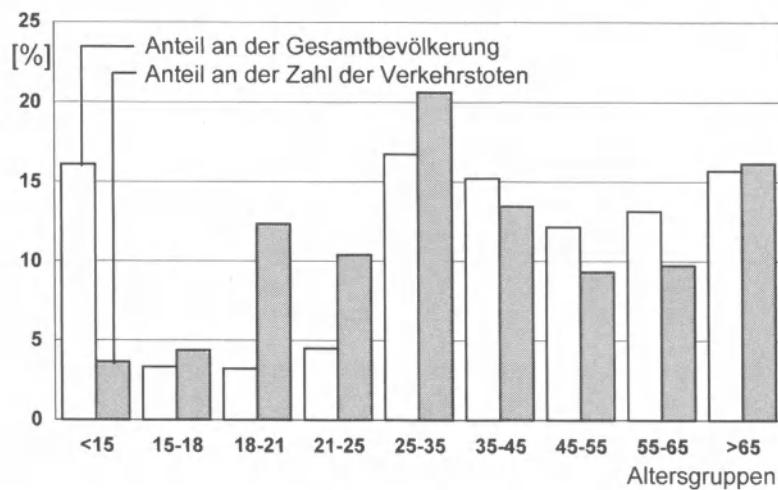


Bild 3.22 Anteil von Altersgruppen an der Gesamtbevölkerung und an den Verkehrstoten in der Bundesrepublik Deutschland [StBA 99]

3 Unfallforschung

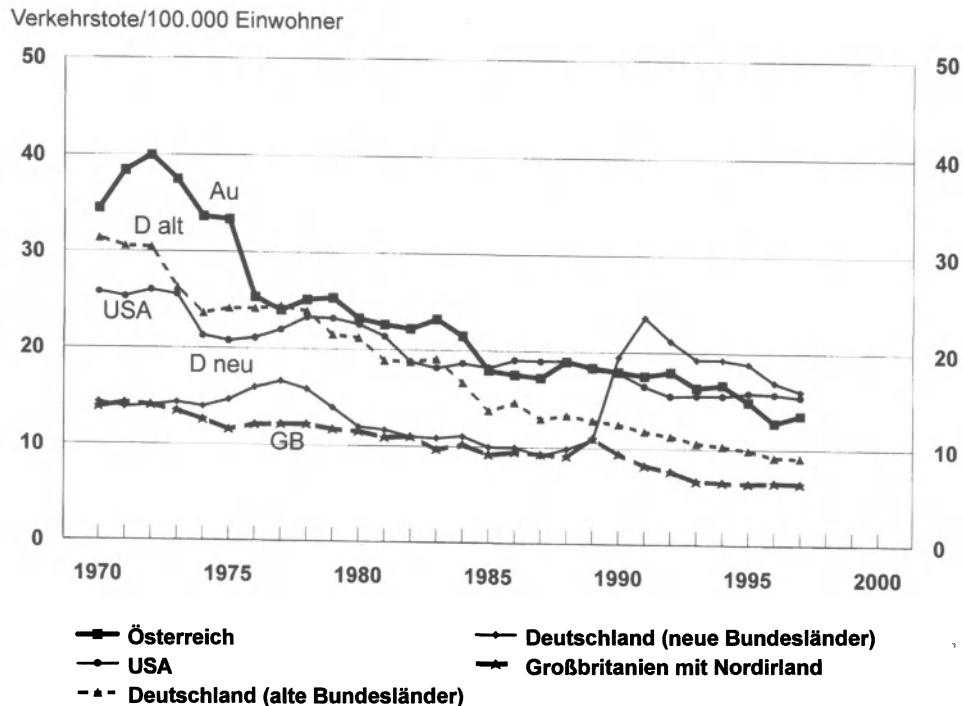


Bild 3.23 Zeitlicher Verlauf der im Straßenverkehr Getöteten 1970 bis 1997, internationaler Vergleich [StBA 99]

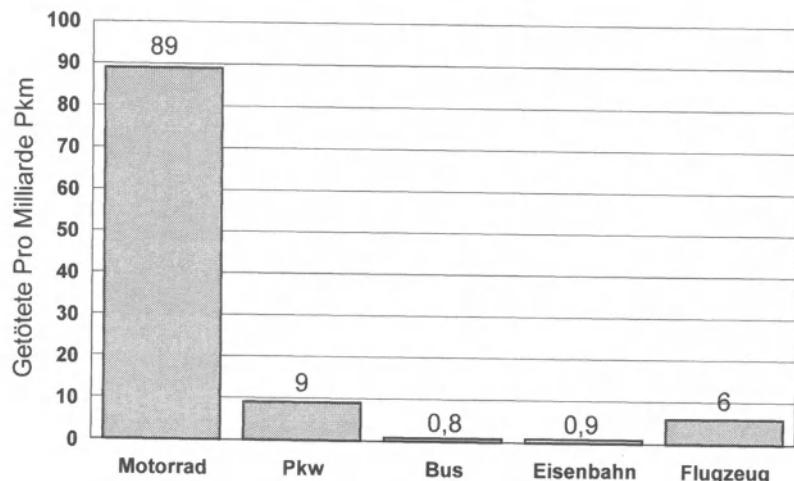


Bild 3.24 Getötetenrate (Getötete pro Milliarde Personen-Kilometer) nach Art der Verkehrsbeteiligung in Deutschland 1992 [StBA 94]

3 Unfallforschung

In den Bildern 3.25 und 3.26 sind zwei Beispiele für die Bewegungsabläufe von Unfallopfern dargestellt. Beim Vergleich der Bewegungstrajektorien des angefahrenen Fußgängers ist festzustellen, dass die Leiche (PMTO Post Mortal Test Object) 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 Bilder 3.27 bis 3.29 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 differenzierter: am häufigsten ist der Aufprall auf Straßen-Objekte im Zusammenhang mit Pkw-Kollisionen, am gefährlichsten ist der Frontalaufprall.

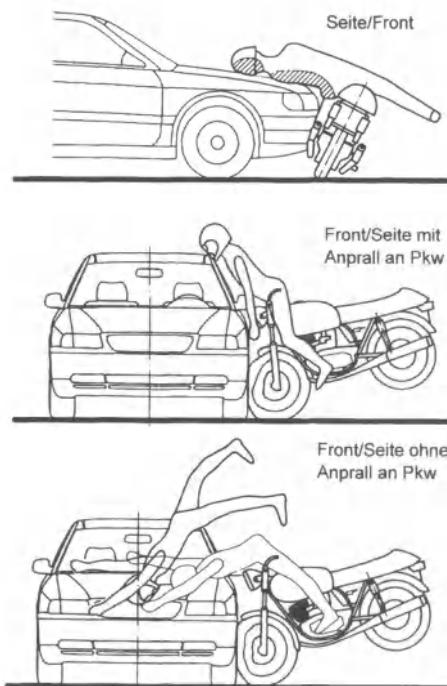


Bild 3.25 Drei Kollisionstypen bei der Kollisionsart Motorrad/Pkw mit charakteristischen Bewegungsabläufen der Motorradfahrer

3 Unfallforschung

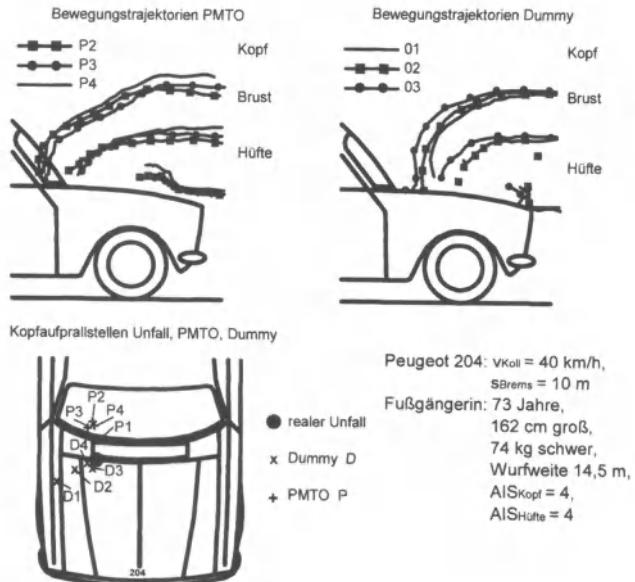


Bild 3.26 Nachfahren eines realen Pkw/Fußgänger-Aufpralls im Labor. Vergleich von Bewegungstrajektorien und Kopfaufprallstellen [KOB 82, Heger 82, Appel 84/3]

Kollisionstyp Nfz/Pkw	Verunglückte im Pkw		Davon getötete Pkw-Insassen		Anzahl der Unfälle	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
Front/Front	69	25,2	17	53,1	43	23,2
Front/Seite	55	20,1	7	21,9	40	21,6
Front/Heck	29	10,6	2	6,3	19	10,3
Heck/Front	51	18,6	2	6,3	35	18,9
Seite/Front	46	16,8	4	12,5	30	16,2
Sonstige (z B Streifkollision)	24	8,8	--	--	18	9,7
Gesamt	274	100,0	32	100,0	185	100,0

Bild 3.27 Kollisionstypen bei der Kollisionsart Nfz/Pkw bei Unfällen mit Getöteten oder Schwerverletzten im Pkw. Stichprobe: 185 Unfälle des GDV [Anselm 00]

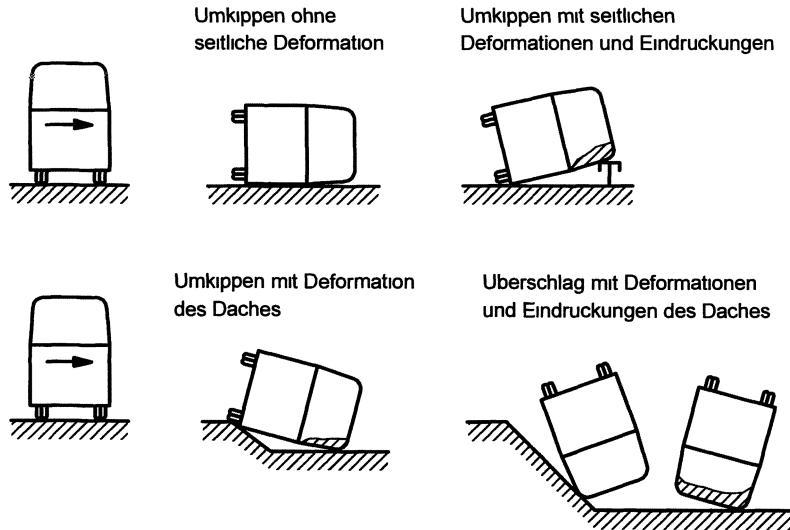


Bild 3.28 Aufprallarten beim Umkippen und Überschlagen von Reisebussen (nach Riebeck, MAN)

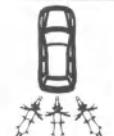
Kollisionstypen Motorräder		Verletzungsschwere Motorradfahrer			
		Unverletzt	AIS 1	AIS 2+	
100% n = 922			100%		
Typ 1 n = 64 7,0%		Kopf Thorax Beine	76,8% 82,4% 13,9%	15,6% 10,2% 68,7%	7,6% 7,4% 17,4%
Typ 2 n = 123 13,3%		Kopf Thorax Beine	83,6% 83,7% 8,9%	8,5% 8,1% 65,3%	7,9% 8,2% 25,8%
Typ 3 n = 48 5,2%		Kopf Thorax Beine	80,2% 69,2% 24,0%	8,6% 27,6% 69,3%	11,2% 3,2% 6,7%
Typ 4 n = 204 22,1%		Kopf Thorax Beine	82,1% 76,8% 25,4%	10,7% 18,3% 64,0%	7,2% 4,9% 10,6%
Typ 5 n = 111 12,1%		Kopf Thorax Beine	78,7% 87,1% 20,5%	15,5% 9,3% 63,3%	5,8% 3,6% 16,2%
Typ 6 n = 39 4,2%		Kopf Thorax Beine	86,4% 82,0% 23,4%	6,3% 17,2% 54,7%	7,3% 8,8% 21,9%
Typ 7 n = 334 36,1%	Objekt	Kopf Thorax Beine	78,5% 76,6% 43,9%	10,8% 13,5% 41,9%	10,7% 10,0% 14,2%
n = 107	nicht zu- zuordnen				

Bild 3.29 Kollisionstypen und Verletzungsschweren bei der Kollisionsart Motorrad/Pkw.
 Stichprobe: 922 InDepth-Fälle der MHH mit verletzten Motorradfahrern [Otte 98].
 Anmerkung: „Objekt“ enthält freien Sturz, Kollision mit Fg, Fr und Mz

3 Unfallforschung

In den Bildern 3.30 bis 3.33 sind die Summenhäufigkeiten von Kollisionsschweren gezeigt: ν_{Koll} bei Motorradunfällen, EES und Δv beim Pkw-Frontalaufprall. Diese Art der Auftragung hat sich in der Unfallanalyse gegenüber Dichteveerlungen durchgesetzt. Beispielsweise erkennt man, 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 (Bild 3.31). Aus derartigen Ergebnissen der Unfallanalyse resultieren die Festlegungen für 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 (Bild 3.33).

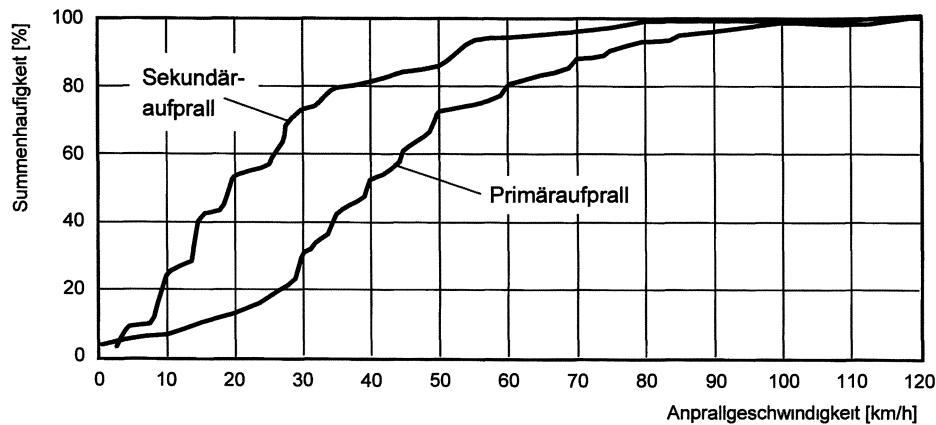


Bild 3.30 Summenhäufigkeit der Anprallgeschwindigkeiten von Motorrädern beim Primär- bzw. Sekundäraufprall. Stichprobe: 402 bzw. 143 InDepth-Fälle der MHH mit verletzten Motorradfahrern [Otte 98]

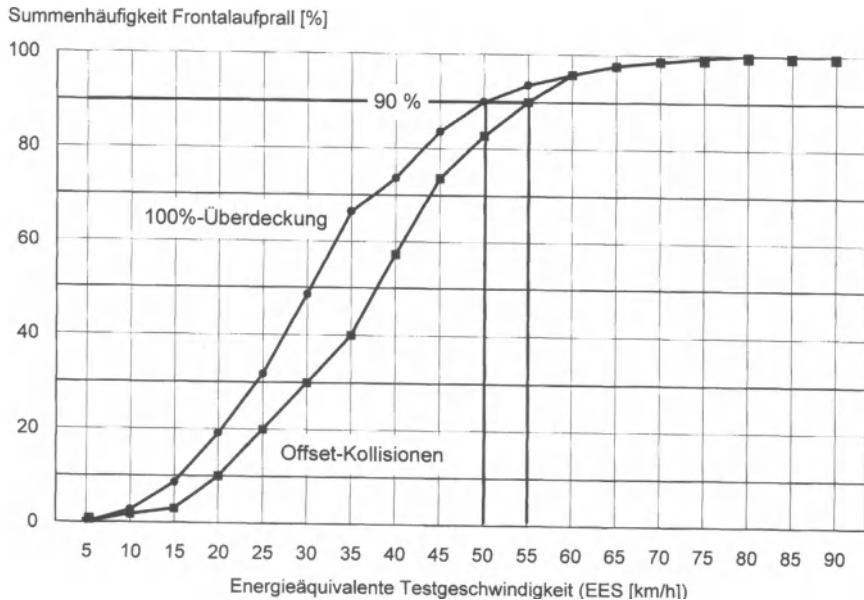


Bild 3.31 Summenhäufigkeit der Unfallschwere EES beim Pkw-Frontalaufprall für zwei verschiedene Aufpralltypen (nur Unfälle mit Verletzten, nach DC 1990)

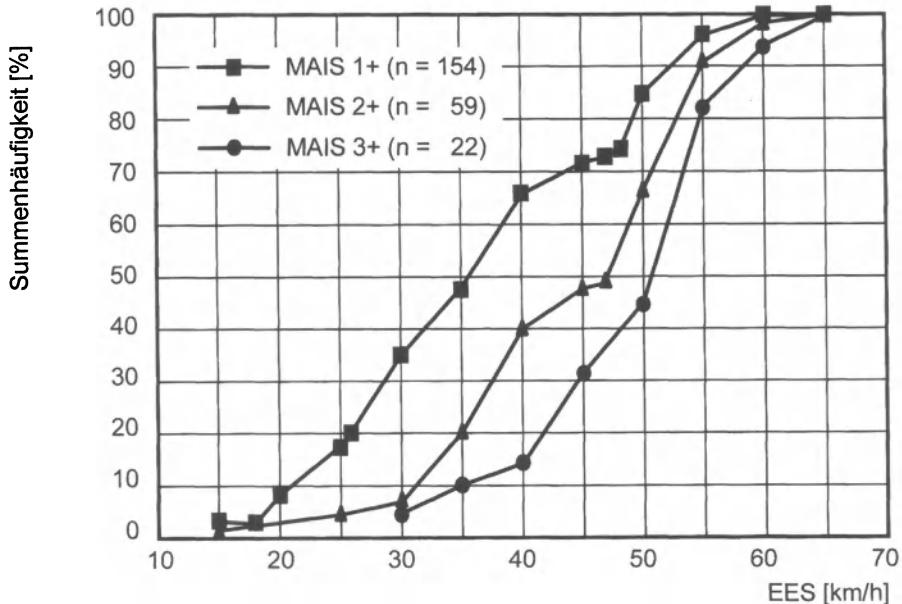


Bild 3.32 Summenhäufigkeit der Unfallschwere EES für verschiedene Verletzungsschweren bei Pkw/Pkw-Frontalkollisionen mit Überdeckungsgraden kleiner 50 %, angegurtete Frontinsassen in MB-Fahrzeugen, n=235 [Zeidler 97]

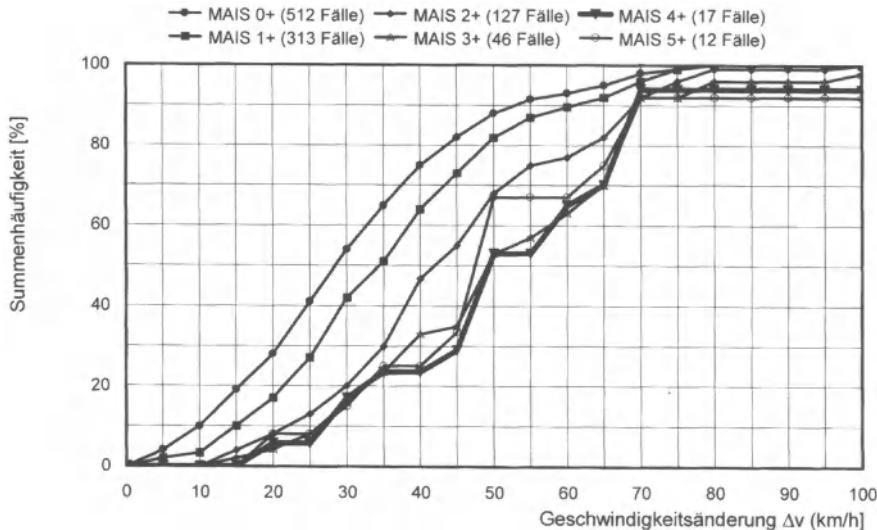


Bild 3.33 Summenhäufigkeit der Unfallschwere Δv für Pkw-Fahrer mit verschiedenen Verletzungsschweren in Frontalkollisionen [Appel 99]

Es folgen einige Bilder zu verschiedenen Korrelationen zwischen Geschwindigkeiten, Verletzungsschweren, Wurfweiten u.ä. Das Bild 3.34 bezieht sich auf den Pkw-Frontal- und Seitenauftprall. Es stellt für jeweils vier Bereiche der Unfallschwere Δv die Anteile von Verletzungsschweren dar. Man erkennt beispielsweise, 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 Seitenauftprall deutlich. Bei Pkw/Fußgängerkollisionen ist an Hand von gerichtsmedizinischen Untersuchungen der Universität Heidelberg der in Bild 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.

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]. 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. Maßnahmen dazu sind im Anhang 8.5 aufgelistet.

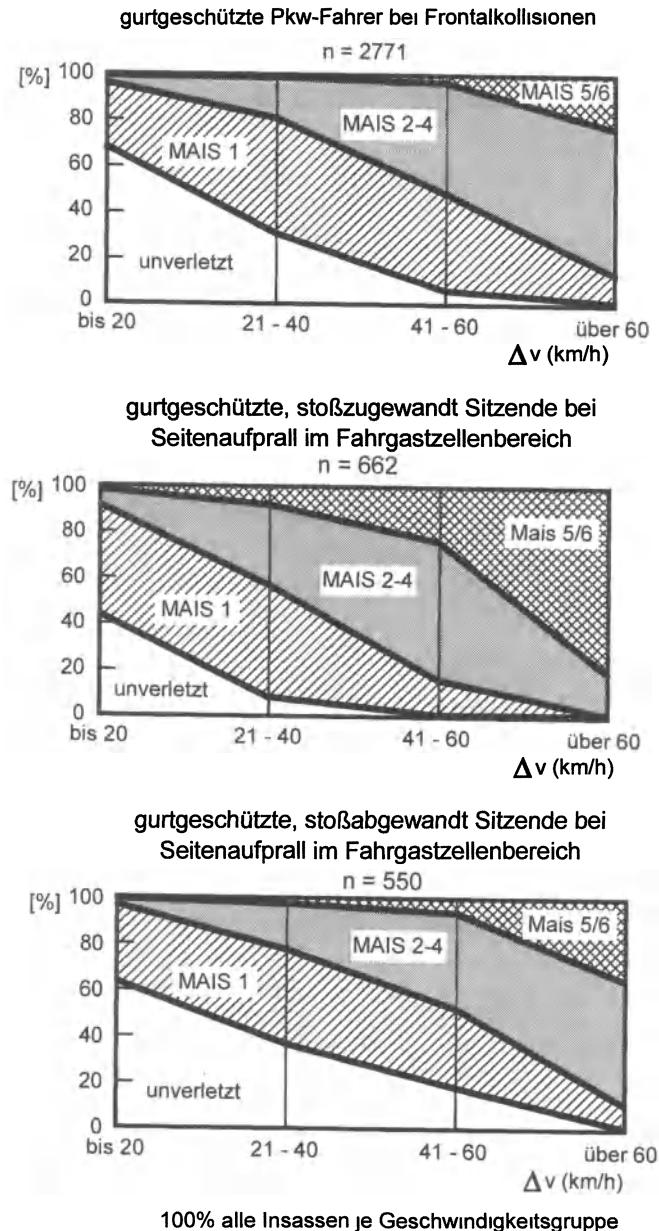


Bild 3.34 Verletzungsschweren von Pkw-Insassen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsänderung Δv bei Frontal- und Seitenkollisionen (Verkehrsunfallforschung MH Hannover)

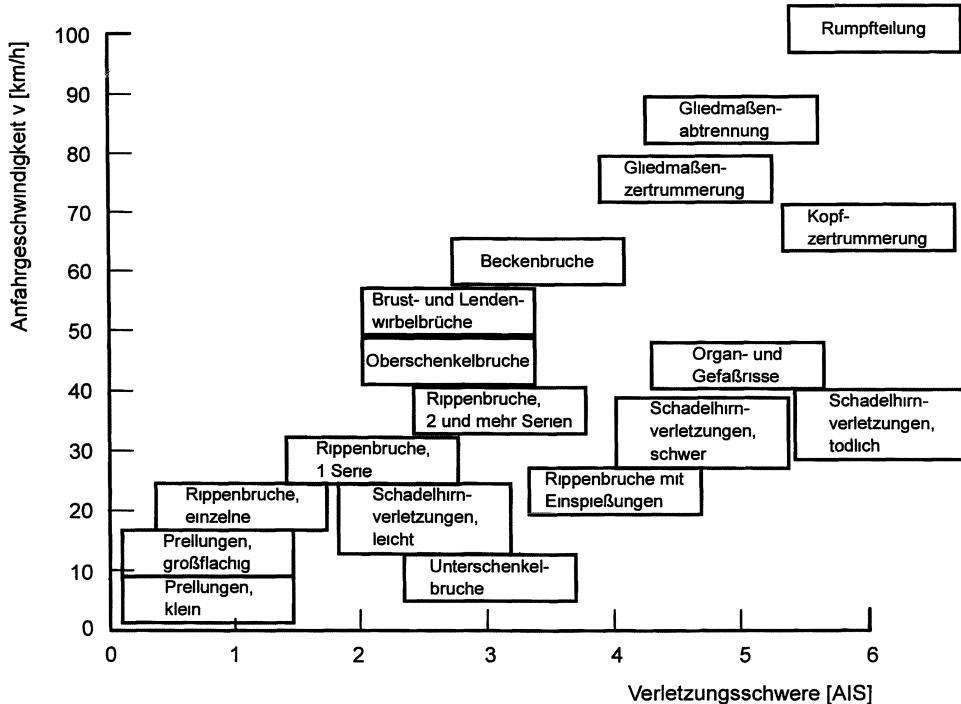


Bild 3.35 Zusammenhang von Verletzungsschwere, Verletzungsart und Aufprallgeschwindigkeit bei Pkw/Fußgänger-Kollisionen [Appel 84/3]

Die realen Wurfweiten der von Pkw angefahrenen Fußgänger und Radfahrer hängen u.a. von der Aufprallstelle am Fahrzeug ab. Die Bilder 3.36 und 3.37 zeigen hierzu neuere, an Hand realer Unfälle ermittelte Ergebnisse der Unfallforschung an der MHH. Bild 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 Bilder 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 ermittelt wurden. Die Überdeckungen und die Aufprallgeschwindigkeiten waren 100 % und 48 km/h beim Test nach FMVSS 208, 50 % und 56 km/h beim AMS-Test und 40 % und ca. 50 km/h beim ADAC-Test. Die Deformationslängen bei den Offset-Tests sind mit 70 bis 90 cm selbstverständlich größer als bei den Voll-Tests mit 35 bis 55 cm. Rechnet man die Kräfte vereinfacht als Produkt von Masse und Verzögerung und nimmt man eine lineare Kraft/Weg-Kennung an, dann ergeben sich bei den Offset-Tests Steifigkeiten zwischen 300 und 800 kN/m, bei den Voll-Tests zwischen 1.000 und 1.800 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 100 %. Näherungsweise kann man die Ergebnisse der Offset- mit denen der Voll-Tests vergleichbar machen, indem man eine Normierung der Überdeckungen vornimmt. Dann sind hier die Steifigkeiten der Offset-Tests mit den Faktoren 2,0 (AMS) bzw. 2,5 (ADAC) zu multiplizieren.

Im Zuge einer kompatiblen Strukturauslegung müssen die Steifigkeiten aller Pkw in gleicher Höhe liegen, damit das leichtere Fahrzeug das schwerere in die Deformation zwingen kann. Das stellt besonders hohe Anforderungen an das leichte Fahrzeug. Bei einer Erhöhung der

3 Unfallforschung

Testgeschwindigkeiten wird diese Aufgabe immer schwieriger bzw. unmöglich, da das schwere Fahrzeug die notwendige Steifigkeit vorgibt und das kleine folgen muss [Appel 73, 98, 00, Zobel 98].

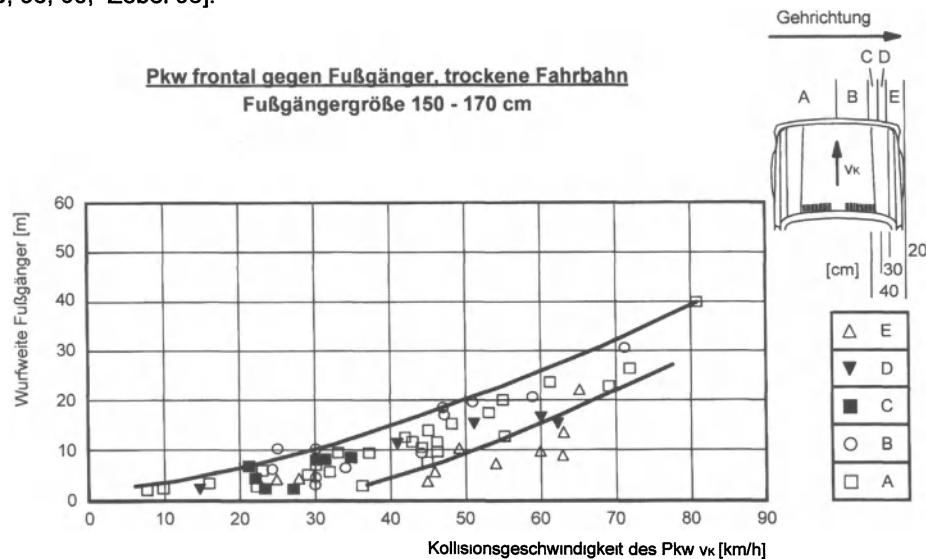


Bild 3.36 Wurfweiten von Fußgängern mit einer Körpergröße von 150 bis 170 cm in Abhängigkeit von der Kollisionsgeschwindigkeit des Pkw, unterschieden nach der Anprallstelle an der Pkw-Front. Stichprobe: 60 InDepth-Fälle [Otte 89]

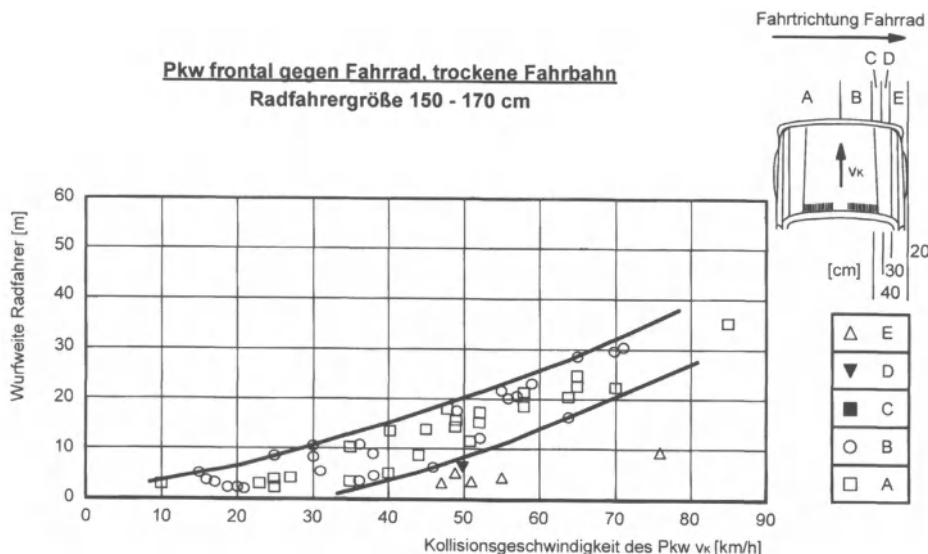


Bild 3.37 Wurfweiten von Radfahrern mit einer Körpergröße von 150 bis 170 cm in Abhängigkeit von der Kollisionsgeschwindigkeit des Pkw, unterschieden nach der Anprallstelle an der Pkw-Front. Stichprobe: 56 InDepth-Fälle [Otte 89]

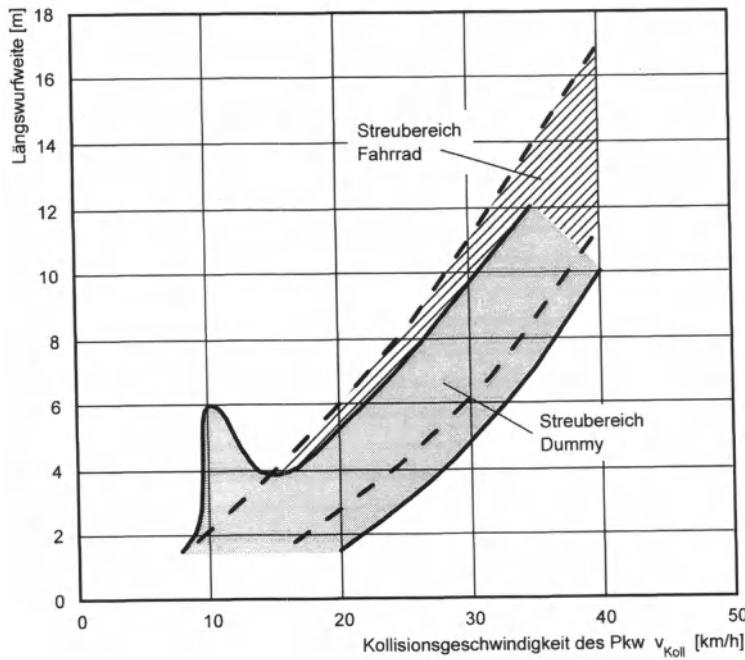


Bild 3.38 Wurfweiten des Dummies und des Fahrrades beim seitlichen Vollstoß eines Pkw gegen ein Fahrrad mit darauf sitzendem Dummy. Eingrenzung der Einzelwerte nach [Wegner 00/1, 00/2]

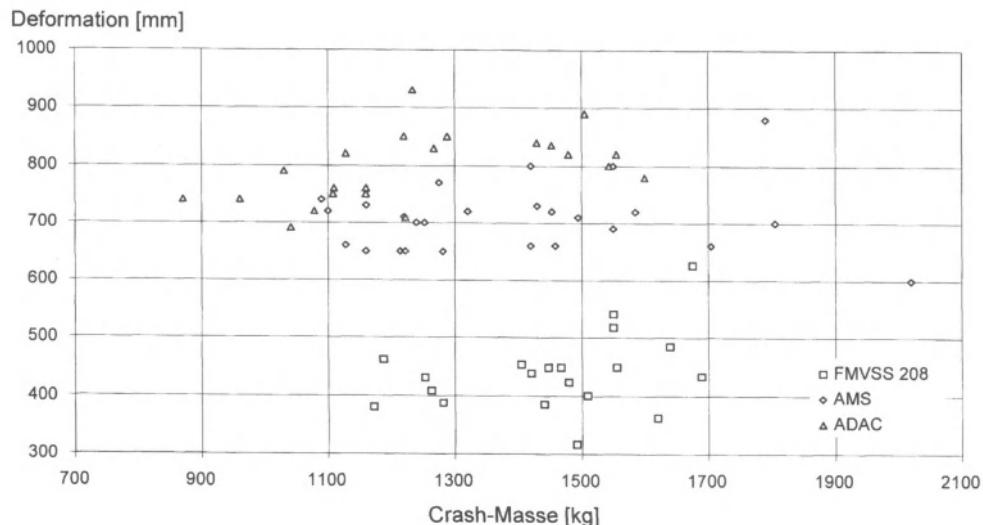


Bild 3.39 Deformationslängen von Pkw als Funktion der Crash-Masse bei unterschiedlichen Frontalcrash-Bedingungen. Überdeckungen:
100 % (FMVSS), 50 % (AMS), 40 % (ADAC) [ACEA 98, EUCAR 99, Appel 99]

3 Unfallforschung

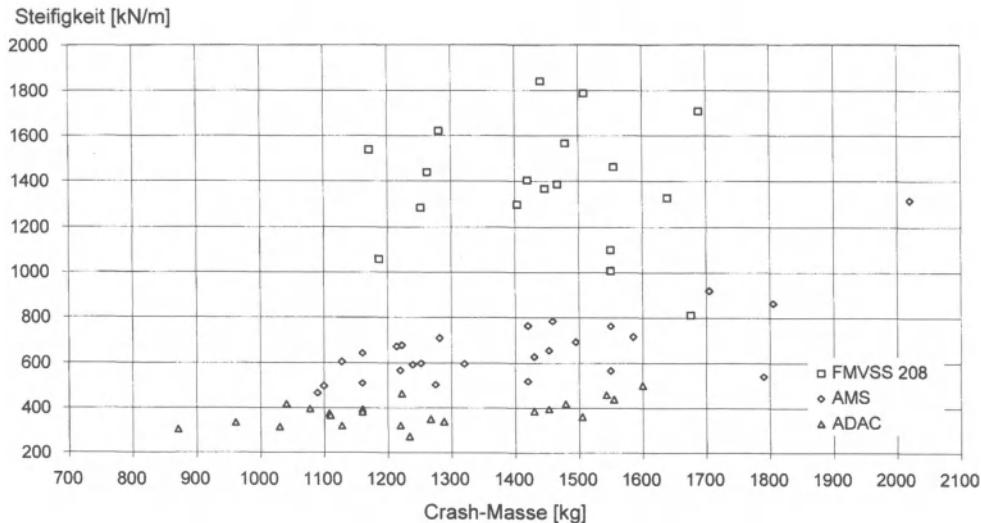


Bild 3.40 Frontsteifigkeiten von Pkw als Funktion der Crash-Masse. Überdeckungen: 100 % (FMVSS), 50 % (AMS), 40 % (ADAC) [ACEA 98, EUCAR 99, Appel 99]

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 vorgeschrieben, seitens des Gesetzgebers in Vorbereitung oder von Dritten zur Information der Öffentlichkeit durchgeführt, ist in den Bildern 3.41 bis 3.47 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 als „Final Rule“ gerade erlassen worden. Im Mittelpunkt stehen hierbei Kinder, aber auch Erwachsene, die in sog. OOP-Situationen (Out of Position) von 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 (Bild 3.46) 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 ist noch in der Diskussion (Bild 3.47). Der Vorschlag ist aus verschiedensten Gründen heftiger Kritik ausgesetzt.

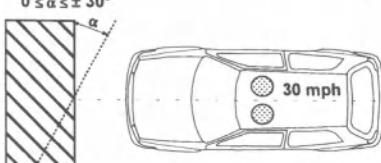
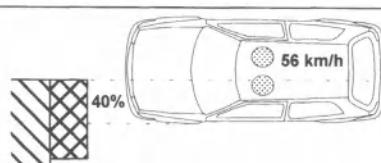
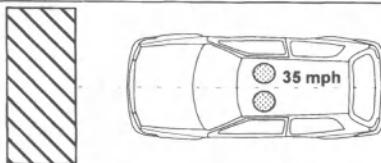
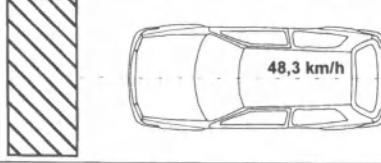
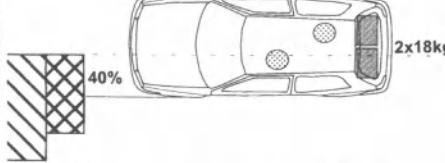
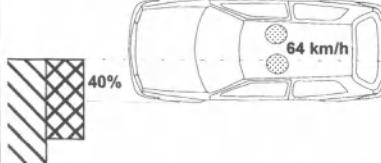
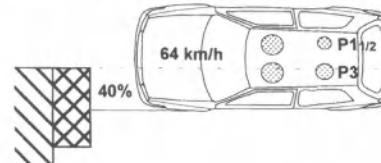
Testverfahren Frontalaufprall	Hindernis Aufprallwinkel	Überdeckung Geschwind.	Gesetz Anwendung
	0UB 0° bis $\pm 30^\circ$	100 % 48,3 km/h	ja FMVSS 208
	ODB 0°	40 % 56 km/h	ja ECE-R 94 Stufe II seit 1.10.1998
	0UB 0°	100 % 56 km/h	nein NCAP
	0UB 0°	100 % 48,3 km/h	ja ECE-R 12
	ODB 0° (0UB)	40 % variabel f(m), max. 64 km/h	nein ADAC ab 1998 (bis 1998)
	ODB 0° (0UB)	40 % 64 km/h (56 km/h)	nein AMS ab Mitte 1998 (bis 1998)
	ODB 0°	40 % 64 km/h	nein Euro NCAP

Bild 3.41 Übersicht über die Crashtests für den Frontalaufprall (Dummy Hybrid III 50 % für Erwachsene, Dummy P1½ und P3 für Kinder im Alter von 1½ und 3 Jahren)

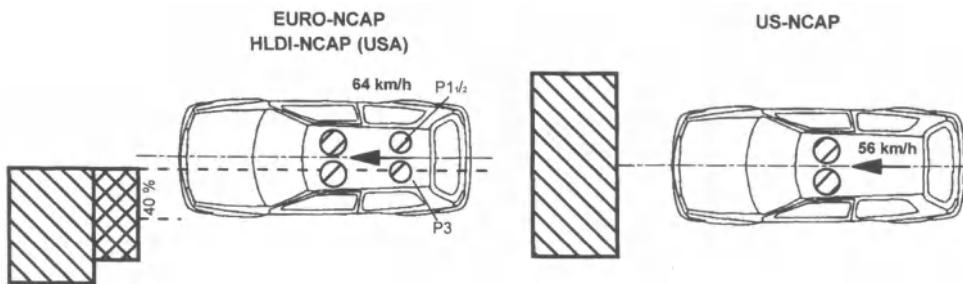
3 Unfallforschung

Testverfahren Seitenauftprall	Hindernis Aufprallwinkel	Überdeckung Geschwind.	Gesetz Anwender
	BDB mit 1368 kg aus 63°	33,5 mph (= 54 km/h, entspricht $V_{\text{barriere}, \text{längs}} \approx$ 48,3 km/h und $V_{\text{Fzg.}, \text{längs}} \approx$ 24,1 km/h)	ja FMVSS 214
	BDB mit 950 kg aus 90°, Barriere über Boden 300 mm	50 km/h	ja ECE-R 95 ab 1.10.1998
	BDB mit 950 kg aus 90°, Barriere über Boden 300 mm	50 km/h	nein Euro NCAP
	BDB mit 1368 kg aus 63°	38,5 mph (= 62 km/h, entspricht $V_{\text{barriere}, \text{längs}} \approx$ 55,2 km/h und $V_{\text{Fzg.}, \text{längs}} \approx$ 28,2 km/h)	nein SINCAP, jetzt als LINCAP bezeichnet

Bild 3.42 Übersicht über die Crashtests für den Seitenauftprall (P1½ und P3 Kinderdummy für das Alter von 1½ und 3 Jahren)

Testverfahren Heckauftprall	Hindernis Aufprallwinkel	Überdeckung Geschwind.	Gesetz Anwender
2 Hybrid III 50%	BUB mit 1800 kg	100 % 48,3 km/h	FMVSS 301
1 Hybrid III 50% 1 Kinderdummy P3	BUB mit 1100 kg	100 % 35-38 km/h	ECE-R 34

Bild 3.43 Übersicht über die Crashtests für den Heckauftprall



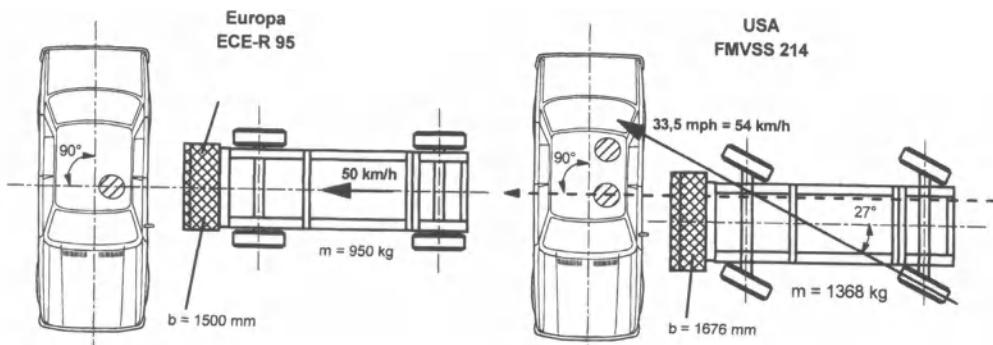
Barriere: Defo -Barriere aus Aluwabenmaterial,
40% Offset und Stoßstangennachbildung

Verwendete Dummies: 2 x Hyrbid III auf den vorderen
Sitzplätzen, EURO-NCAP zusätzlich mit 2 Kinderdummies
(P1½, P3), aktive und passive RHS (Gurt und Airbag)

Barriere: starre Barriere, 100% Überdeckung

Verwendete Dummies: 2 x Hybrid III auf dem vorderen
Sitzplatz Im Gegensatz zum gesetzlichen Test der FMVSS 208
werden hier neben passiven auch aktive RHS (Gurte) verwendet

Bild 3.44 Verbrauchertests für den Pkw-Frontalaufprall (P1½ und P3 Kinderdummy für das Alter von 1½ und 3 Jahren)



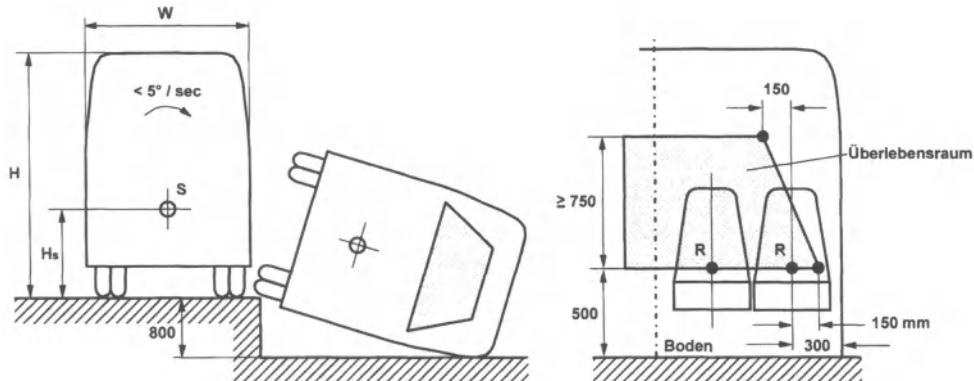
Barriere: Deformierbare Stoßfront besteht aus sechs Elementen mit unterschiedlicher Steifigkeit (Aluminumwaben oder Hartschaum)
Unterkante des Deformationselements befindet sich 300 mm über der Fahrbahnoberfläche Die Masse der Barriere beträgt 950 kg

Verwendete Dummies: EuroSID 1 wird stoßseitig auf dem Vordersitz positioniert

Barriere: Deformierbare Stoßfront besteht aus einer homogenen Aluwabenstruktur mit einer nachgebildeten Stoßstange Die Steifigkeit der Stoßfront ist entsprechend einem durchschnittlichen Kleintransporter gewählt worden Die Masse der Barriere beträgt 1368 kg Unterkante des Deformationselements befindet sich 279 mm über der Fahrbahnoberfläche

Verwendete Dummies: US-SID (DOT SID) stoßseitig auf dem Vordersitz und der hinteren Sitzbank

Bild 3.45 Gesetzlich vorgeschriebene Verfahren für den Pkw-Seitenauftprall



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

Bild 3.46 Gesetzlich vorgeschriebener Umsturzversuch für Reisebusse zur Überprüfung der Dachfestigkeit (ECE-R 66)

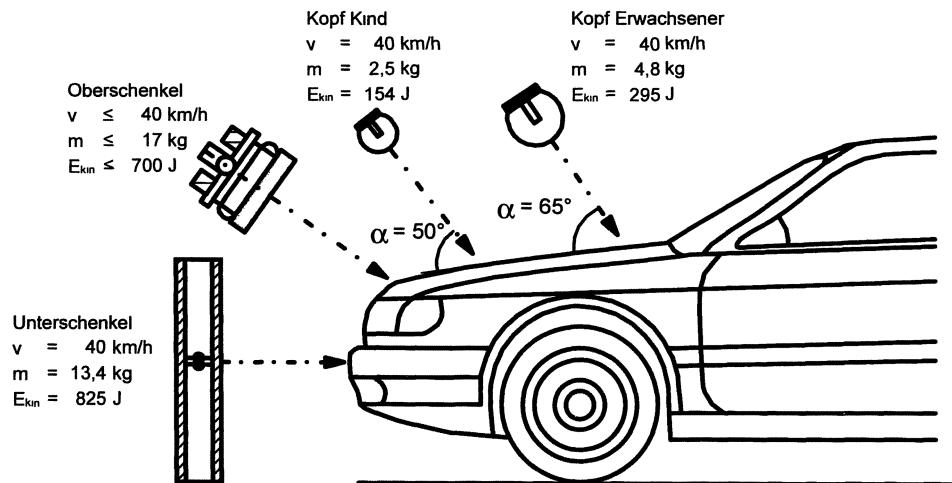


Bild 3.47 Komponenten-Testverfahren mit Impaktoren für die Pkw/Fußgänger-Kollision (Vorschlag der EEVC-WG17 [EEVC 98])

Im **Bild 3.48** 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 dem **Bild 3.48** 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 Dummys im Frontal- und Seitentest einzuhalten sind, sind auszugsweise in den **Bildern 3.48** bis **3.50** angegeben. In sehr differenzierten Angaben finden sich Schutzkriterien und Toleranzgrenzen im **Anhang 8.4** und in [Seiffert 74, Faerber 76, Wagner 84, Krabbel 98, Kramer 89, 98].

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 die 5 %-Frau kleiner 700, HIC₁₅ für das dreijährige Kind kleiner 570, Brustindrückung kleiner 76, 50, 42 mm je nach Stoßrichtung und Rückhaltesystem, Halskriterium Nij kleiner 1,0.

3 Unfallforschung

Korperteil	Mechanische Größe	Belastungsgrenzen
Ganzer Körper	Beschleunigung $a_{x,max}$	40 80 g
	Beschleunigung a_x	40 . 45 g über 160 220 ms
Gehirn	Beschleunigung $a_{x,max}, a_{y,max}$	100 300g WSU-Kurve mit z B 60 g bei $t > 45$ ms
	HIC (Head Injury Criterion), HPC	1000 (Schutzkriterium)
	rotatorische Beschleunigung	1 800 7 500 rad/s ²
Knöcherner Schädel, Stirn	Beschleunigung $a_{x,max}, a_{y,max}$	80. 300 g je nach Größe der Stoßfläche
	Beschleunigung $a_{x,max}$	120 200 g,
	Stirnkraft	4000 6000 N
Halswirbelsäule	Beschleunigung $a_{x,max}$ (gemessen am Thorax)	30 40 g
	Beschleunigung $a_{y,max}$ (gemessen am Thorax)	15. 18g
	Kraft F_x	1 200 2 600 N Scherbelastung
	Flexion α_{max} (Neigung, vorwärts)	80° 100°
	Extension α_{max} (Streckung, rückwärts)	80° 90°
Thorax	NIC (Neck Injury Criterion)	15 m ² /s ² (Schutzkriterium)
	Beschleunigung $a_{x,max}$	40 60 g (für $t > 3$ ms) > 60 g (für $t < 3$ ms)
	Kraft F_x (äußere Kontaktkraft)	4 000. 8 000 N
Becken, Oberschenkel	Thorax-Kompression frontal D_x	7,6 cm
	Kraft F_x	6 400 12 500 N bei Krafteinleitung im Knie
Schienbein	Beschleunigung $a_{y,max}$	50 80 g (gemessen am Becken)
	Kraft F_x (axial)	2 500 5 000 N
	Moment M_x (Biegung)	120 170 Nm

Bild 3.48 Mechanische Belastungsgrenzen des Menschen unter stoßartiger Belastung
[Seiffert 85]

3 Unfallforschung

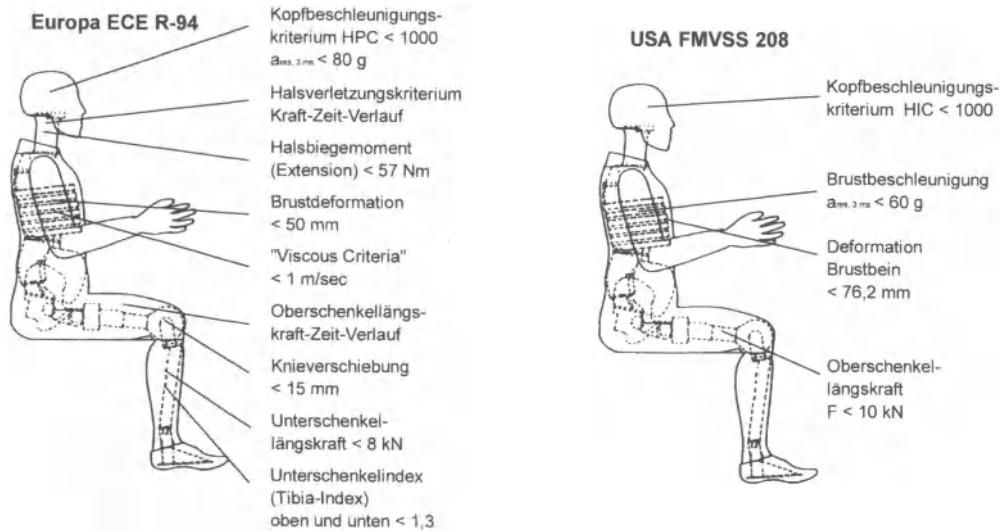


Bild 3.49 Schutzkriterien am Hybrid III-Dummy beim Frontalaufprall (Stand 2001)

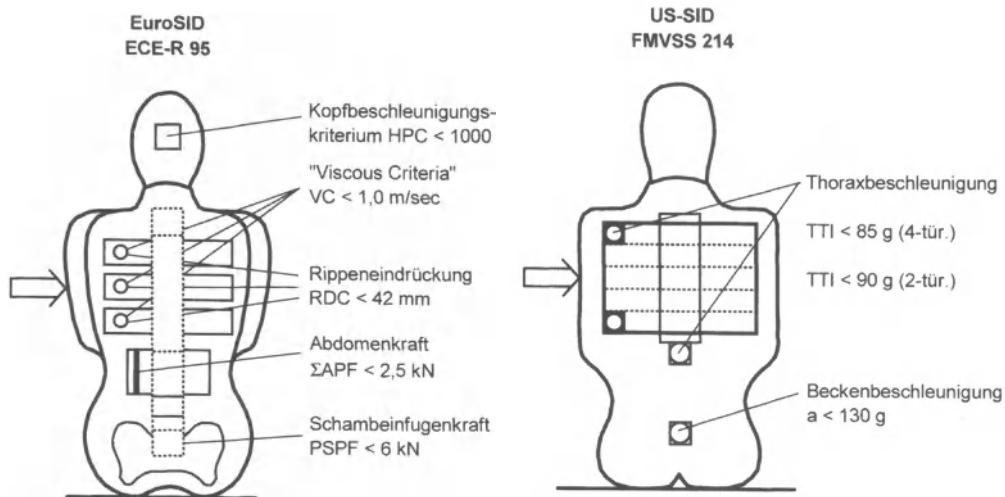


Bild 3.50 Schutzkriterien an den Seiten-Aufprall-Dummys beim Seitenauftprall

4 UNFALLMECHANIK

4.1 KINEMATISCHE GRUNDLAGEN

Die Bewegung eines Fahrzeugs 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 Bild 4.1.

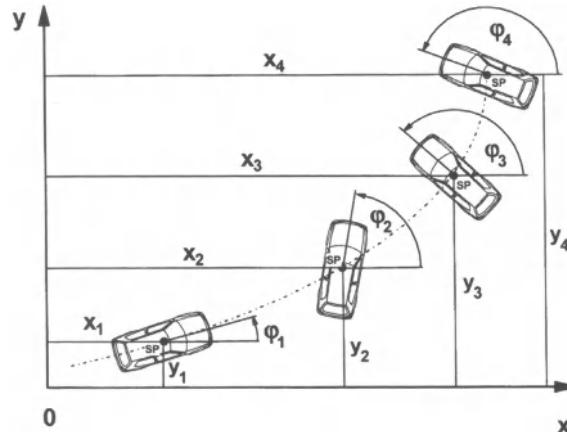


Bild 4.1 Bewegung eines Fahrzeugs als starre Scheibe, Bahnkurve des Schwerpunktes

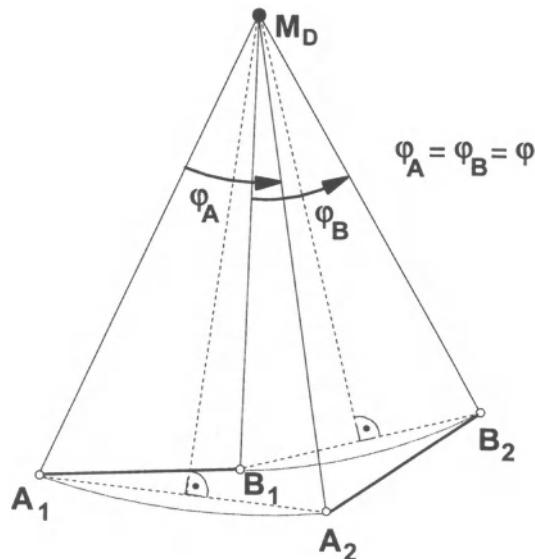


Bild 4.2 Konstruktion des gemeinsamen Drehpols M_D für endliche Lageänderungen einer Scheibe [Szabo 66]

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 Bild 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 Bild 4.3.

Für die Unfallrekonstruktion bedeutet dies z.B.: liegen in einem Zeitpunkt t , 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 .

Die Geschwindigkeit v_{P_i} eines Punktes P_i zum Zeitpunkt t , steht senkrecht auf der Strecke M_iP_i und es gilt:

$$v_{P_i} = \omega_i * \overline{M_i P_i}$$

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

$$v_{S_i} = \omega_i * \overline{M_i S_i}$$

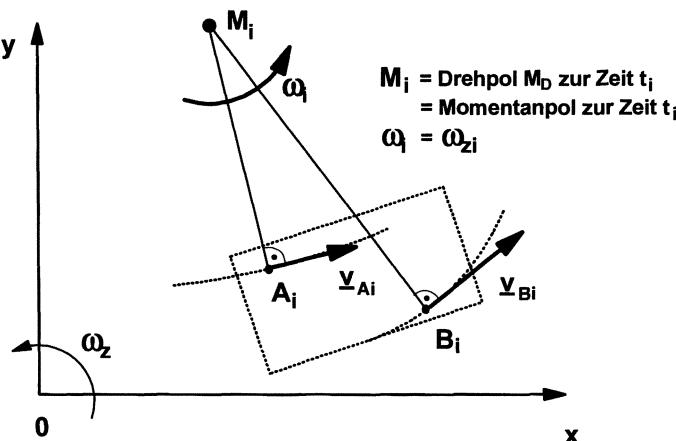


Bild 4.3 Bestimmung des Momentanpols M zum Zeitpunkt t_i

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 Krümmungsmittelpunkt 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 Bild 4.4 ist diese Überlegung mit endlichen Verschiebungen dargestellt.

Es gilt:

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

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

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

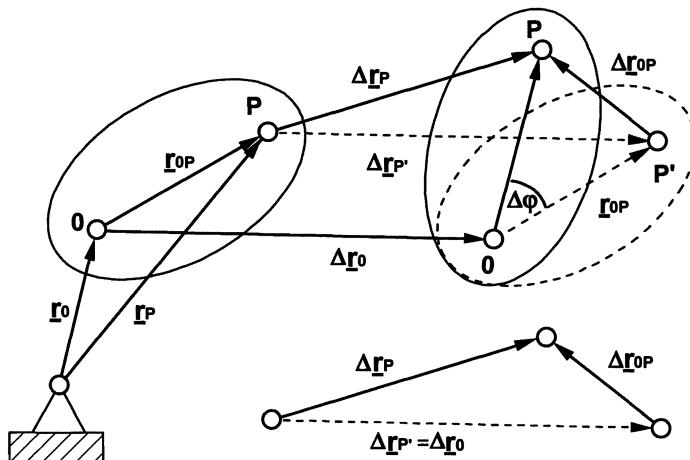


Bild 4.4 Allgemeine Bewegung eines starren Körpers: Translation und Rotation

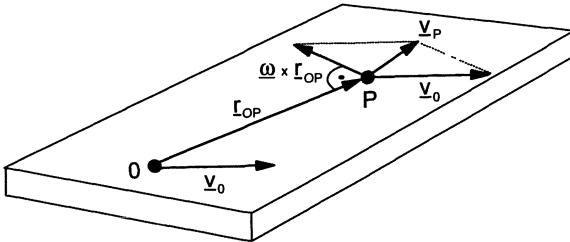


Bild 4.5 Geschwindigkeitszustand der ebenen Bewegung einer Scheibe

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 Geschwindigkeitszustand 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 **Bild 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.

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 **Bild 4.6** sind die gemessenen Beschleunigungsverläufe einer Fahrzeugfamilie (Baujahr ca. 1980, VW) beim 50 km/h-Wandaufprall gezeigt. Näherungsweise lassen sich die Verläufe durch ein Trapez wiedergeben, siehe **Bild 4.7**. Unter Vorgabe der Anfangsbedin-

gungen ($x=0$ und $\dot{x}=v_0$) erhält man durch Integration Geschwindigkeit und (Deformations-)Weg in Abhängigkeit von der Zeit. Die kinematischen Beziehungen zwischen Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg lauten allgemein:

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

$$\ddot{x} = \int \ddot{x} dt + \dot{x}_0 \quad \ddot{x} = \frac{d\dot{x}}{dt}$$

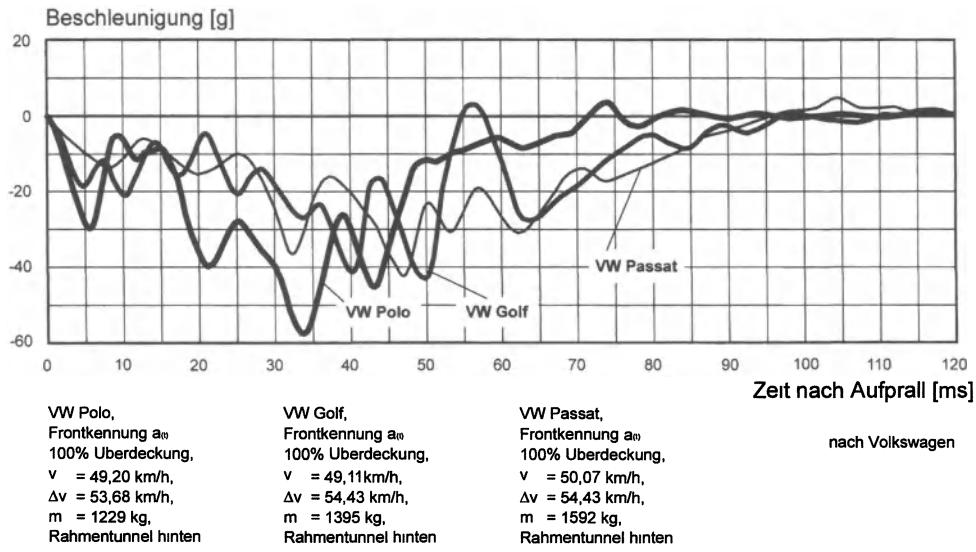


Bild 4.6 Gemessene Beschleunigungs-Zeit-Verläufe (am Rahmen hinten) unterschiedlich großer und schwerer Pkw (VW Polo, VW Golf und VW Passat) beim 50 km/h-Wandaufprall. Fahrzeuge der 80er Jahre

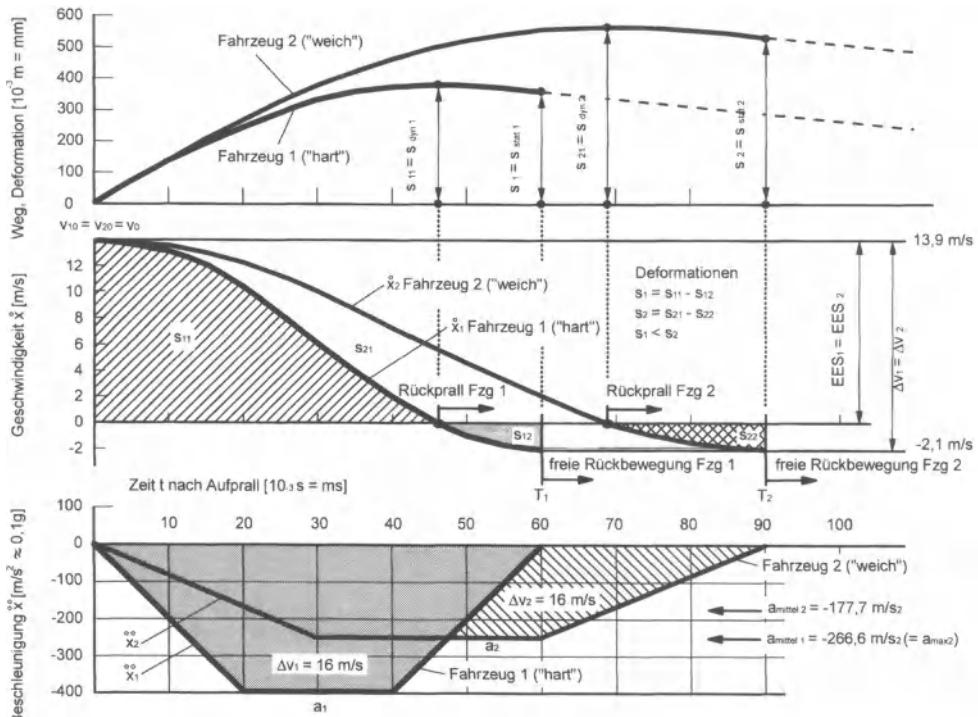


Bild 4.7 Idealisierte Beschleunigungs-Zeit-Verläufe eines kleinen und eines großen Pkw beim 50 km/h-Wandaufprall. Durch Integration gewonnene Verläufe von Geschwindigkeit und Weg (Restitutionskoeffizient $k=0,15$)

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. Man kann aus dem **Bild 4.7** Folgendes erkennen:

- die (zeitbezogen) mittleren Verzögerungen des kleinen (und leichten) Fahrzeuges sind mit ca. 27 g gegenüber 18 g deutlich höher als die des großen (und schweren) Fahrzeugs;
- infolgedessen ist die Crashdauer mit ca. 60 ms gegenüber 90 ms deutlich kleiner;
- die mittleren Kräfte sind beim kleinen Fahrzeug mit ca. 331.830 N höher als beim großen Fahrzeug mit 286.560 N. Das ist trotz der kleineren Masse der (unter gleichen Aufprallbedingungen) der höheren Verzögerung bzw. dem kürzeren Deformationsweg geschuldet. Im Hinblick auf Fzg-Fzg-Kollisionen ist diese Art einer „kompatiblen“ Strukturauslegung wünschenswert;
- es ergibt sich mit dem gemessenen Beschleunigungsverlauf und der gemessenen Anfangsgeschwindigkeit ein deutlicher Rückprall, der Restitutionskoeffizient (Stoßziffer) k (siehe Abschnitt 4.4.2 und 4.4.7) errechnet sich zu 0,15. Wegen der Teilelastizität der Fahrzeugstruktur beträgt also die Geschwindigkeitsänderung Δv beim Barrieraufprall 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.

4 Unfallmechanik

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 50 km/h) bezieht sich nicht auf die dynamische, sondern auf die bleibende (statische) Verformung und ist infolgedessen kleiner als Δv .

Unter Elimination der Zeit erhält man den Zusammenhang $\ddot{x}(x)$ zwischen Beschleunigung und Weg. In **Bild 4.8** sind diese Verläufe für die drei Fahrzeuge aus **Bild 4.6** dargestellt. Durch Multiplikation der Beschleunigung mit der als konstant angenommenen Crashmasse würden sich die Stoßkräfte (Strukturkräfte, Deformationskräfte)

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

ergeben. Wie z. B. **Bild 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.

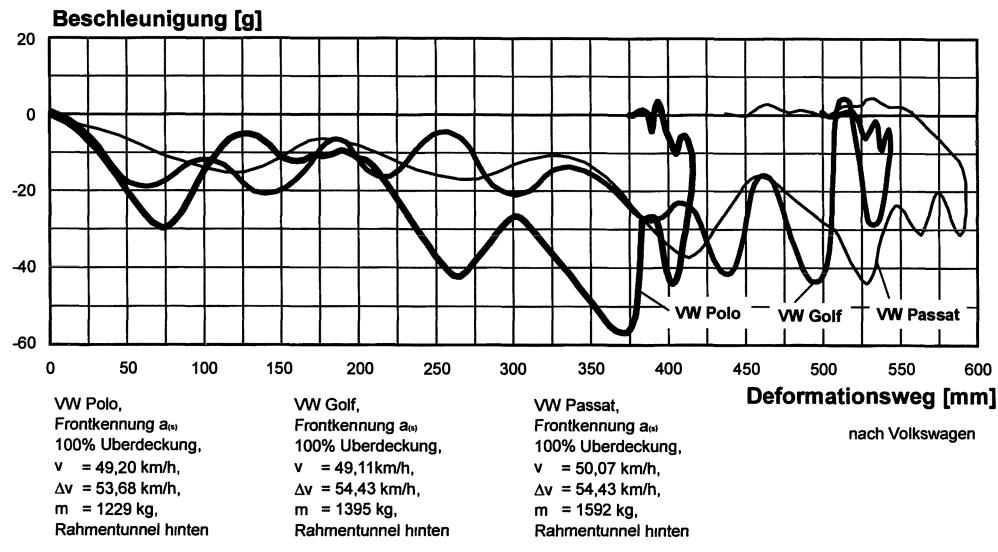


Bild 4.8 Beschleunigungs-Weg-Verläufe unterschiedlich großer und schwerer Pkw (VW Polo, VW Golf und VW Passat) beim 50 km/h-Wandaufprall, gewonnen aus den zugehörigen gemessenen Beschleunigungs-Zeit-Verläufen im **Bild 4.6**.
Fahrzeuge der 80er Jahre

Der Integrationsprozess über der Zeit und der nachfolgende Eliminationsprozess der Variablen t und x ist in **Bild 4.9** anhand eines idealisierten Verlaufes grafisch gezeigt. So erhält man mit den sog. „sechs kinematischen Diagrammen“ alle möglichen Kombinationen von x , \dot{x} , \ddot{x} und t . Für überschlägige, anschauliche Betrachtungen mag diese Vorgehensweise nicht nur theoretisch, sondern auch praktisch nützlich sein, auch wenn heute Rechner diese Prozesse schnell erledigen.

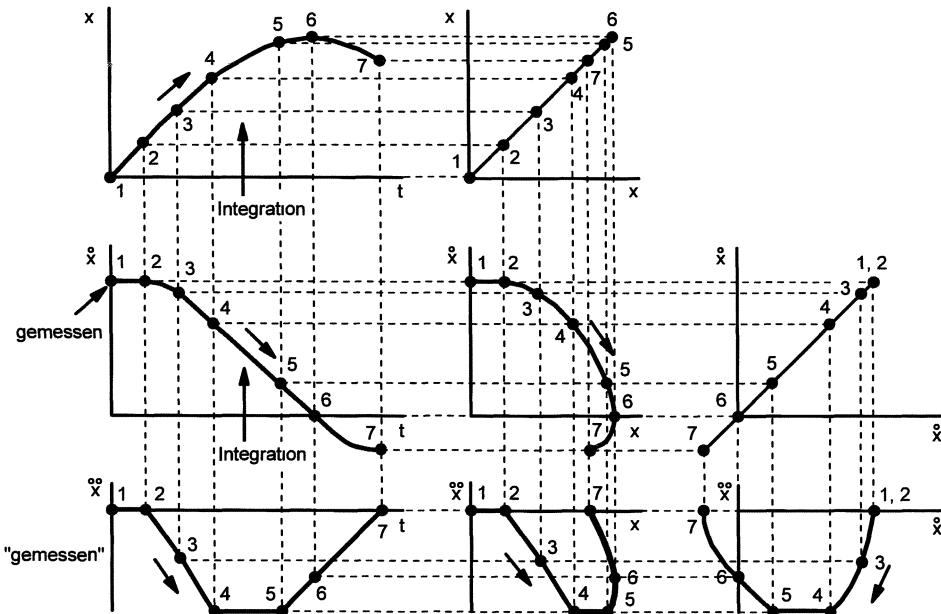


Bild 4.9 Idealisierter Wandaufprall eines Fahrzeugs. Die sechs kinematischen Diagramme zur Übertragung des gemessenen zeitabhängigen Beschleunigungsverlaufes auf alle anderen x -, \dot{x} -, \ddot{x} -, t -Kombinationen.

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

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

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 Frontmotor) 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 Aufnehmern gemessen. Eine Aufteilung in Segmente erlaubt die differenzierte Bestimmung der Teilkräfte nach Baugruppen des Vorderwagens (siehe Bild 4.10). Messtechnisch ist das Verfahren der Kraftmessungen allerdings sehr aufwendig.

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.

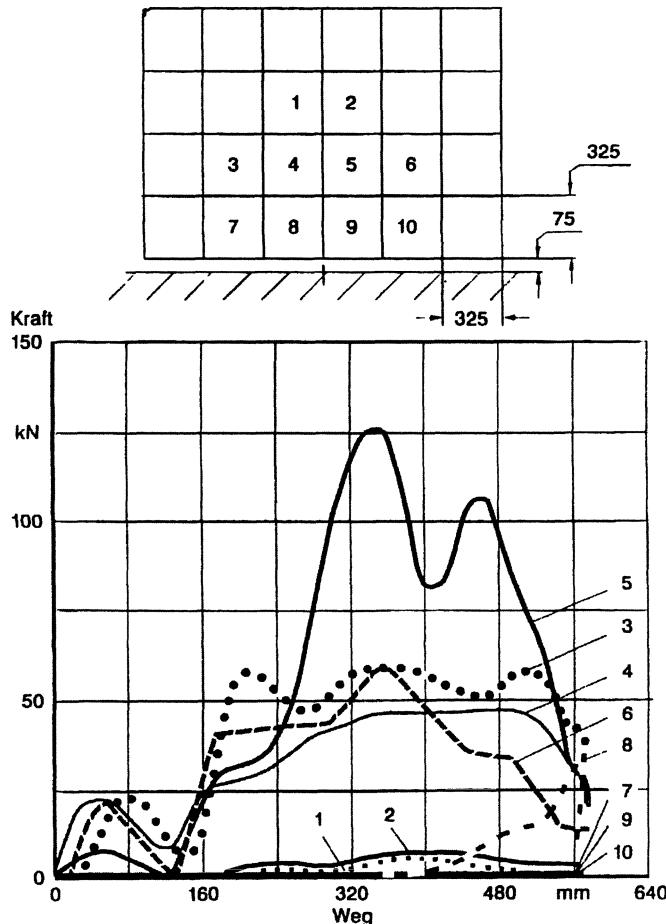


Bild 4.10 Gemessene Kraft-Weg-Verteilung unterschiedlicher Frontstrukturbereiche eines Pkw beim Frontalaufprall gegen die OUB [Seiffert 85]

Bild 4.11 zeigt die statische, bleibende Fahrzeugdeformation in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit gegen eine OUB mit voller Überdeckung der Fahrzeugfront. Es ergibt sich der erwartete Anstieg der statischen Deformation mit der Aufprallgeschwindigkeit. In **Bild 4.12** sind die bleibenden Deformationen beim Wandaufprall mit 30 mph 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.

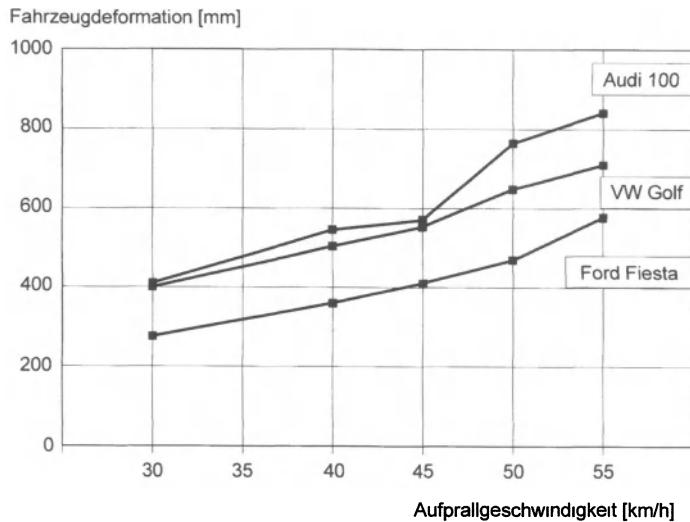


Bild 4.11 Zusammenhang zwischen Fahrzeugdeformation und Aufprallgeschwindigkeit verschiedener Pkw beim Frontalaufprall gegen eine OUB [Faerber 91]

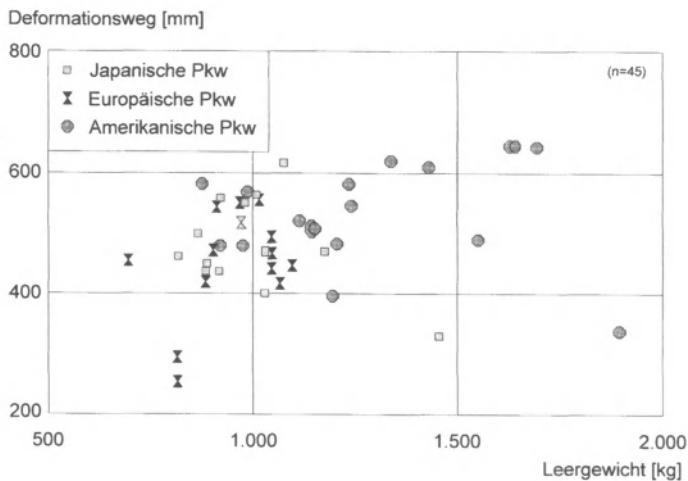


Bild 4.12 Zusammenhang zwischen Deformationslänge und Fahrzeugeleergewicht beim Frontalaufprall nach FMVSS 208 [Vehicle 92]

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 Bild 4.13.

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

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

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 Bild 4.14. 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.

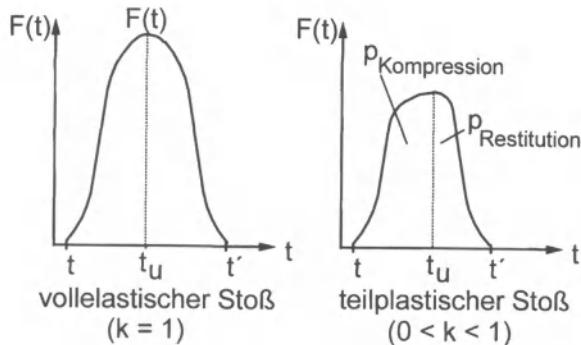


Bild 4.13 Verlauf der Stoßkraft über der Stoßdauer bei elastischem (links) und elastisch-plastischem (rechts) Strukturverhalten der stoßenden Massen bzw. Fahrzeuge (t_u Zeitpunkt der maximalen Stoßkraft, d.h. des maximalen Impulsaustausches)

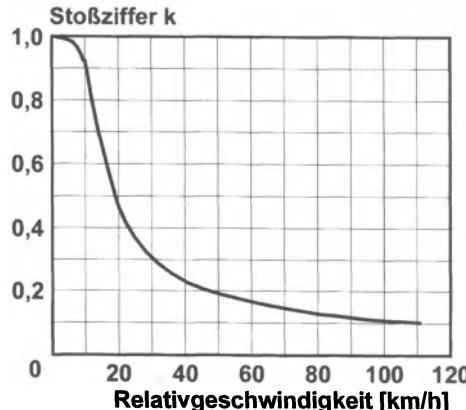


Bild 4.14 Qualitativer Zusammenhang zwischen der Stoßziffer k und der Relativgeschwindigkeit beim Frontalaufprall von Pkw gegen die OUB

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 Bild 4.15. 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.

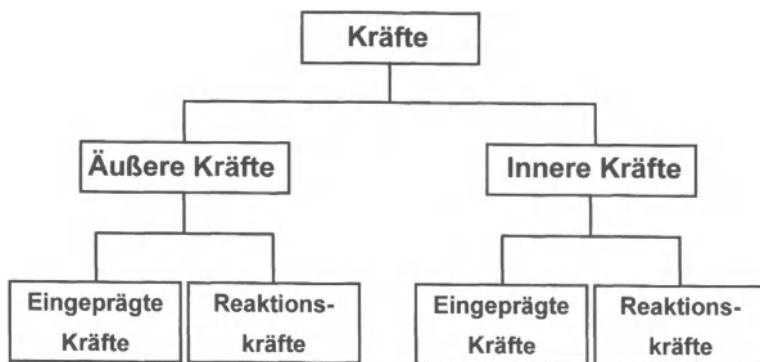


Bild 4.15 Einteilung von Kräften

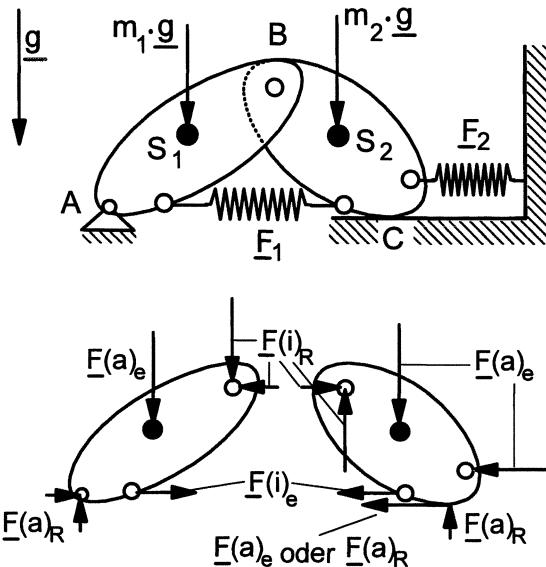


Bild 4.16 Beispiele zum Schnittprinzip

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 Gleitreibungsbeiwert μ .

In **Bild 4.16** werden am Beispiel von zwei verbundenen Scheiben die unterschiedlichen Kräfte dargestellt. Es bedeuten:

- $\underline{F}_{(a)e}$ Äußere eingeprägte Kraft:
z.B. Gewichtskraft, Federkraft bei äußerer Federung, Gleitreibungskraft.
- $\underline{F}_{(a)R}$ Äußere Reaktionskraft (wirkt zwischen System und Umgebung).
z.B. Führungskraft, Zwangskraft, Haftkraft.
- $\underline{F}_{(i)e}$ 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 eingebracht werden, wie sie im angenommenen Koordinaten- bzw. Ersatzsystem real wirken. Es sei hier bereits hingewiesen, dass das Gleiche für die Stoßrechnung gilt. Stoßantriebe sind

4 Unfallmechanik

innere oder äußere Reaktionen, können daher in ihrer Richtung zunächst beliebig angenommen werden, siehe auch Abschnitt 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

Betrachtet man ein beliebiges Massenelement der Masse dm eines starren Körpers, so erhält man mit dem Newtonschen Grundgesetz:

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

Nimmt man die Masse als zeitlich konstant an, 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 Gesamtimpulses

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

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:

$$\frac{d^2}{dt^2} \int \underline{r}(t) dm = \frac{d}{dt} \int \underline{v}(t) dm = \frac{d^2}{dt^2} (\underline{r}_s * m)$$

Daraus folgt das Newtonsche Grundgesetz in der Form des Schwerpunktsatzes:

$$\frac{d^2}{dt^2} (\underline{r}_s * m) = \frac{d}{dt} (m * \underline{v}_s) = m * \underline{a}_s = \underline{F}_{(a)}$$

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

Multipliziert man den Schwerpunktsatz für ein Massenelement vektoriell mit dem Ortsvektor der Massenelemente bzw. der äußeren Kräfte $\underline{r} = \underline{r}(t)$, so erhält man nach Integration über den gesamten Körper

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

Mit den Einführungen

$$\int \underline{r} \times dm * \underline{v} = \underline{D} \quad \text{Drall oder Drehimpulsvektor des Körpers}$$

$$\int \underline{r} \times d\underline{F} = \underline{M}_{(a)} \quad \text{resultierender Momentenvektor der äußeren Kräfte}$$

erhält man den 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:

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

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

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

Wählt man den beliebig bewegten Schwerpunkt als Bezugspunkt, so behält der Drallsatz seine einfache Form:

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

Allgemein berechnet sich das Produkt einer 3x3-Matrix mit einem Vektor wie folgt [Dubbel 97]:

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

4 Unfallmechanik

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

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

Ausgeschrieben:

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

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

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

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

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 Bild 4.17. Die Angabe der Stoßart bezieht sich auf einzelne Körper, nicht auf Konfigurationen mehrerer Körper. Dabei bedeuten:

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

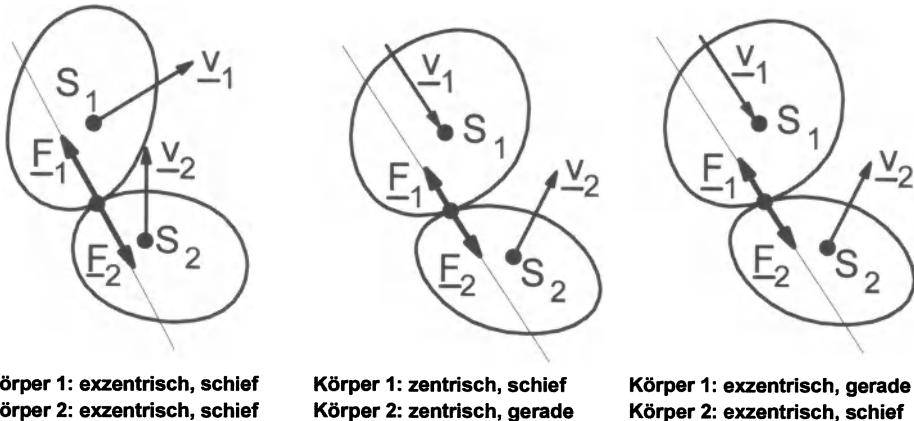


Bild 4.17 Beispiele für verschiedene Stoßarten (Kraftvektor \underline{F} und Vektor des Stoßantriebes \underline{P} haben die gleiche Richtung)

4.4.2 Stoßtheorien

Historisch gesehen lassen sich zwei Stoßtheorien unterscheiden:

1. 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 Stoßwellenzeiten ist. Diese Theorie liefert teilweise widersprüchliche Ergebnisse [Szabo 72].

2. 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.
- 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 **Bild 4.18**. 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.

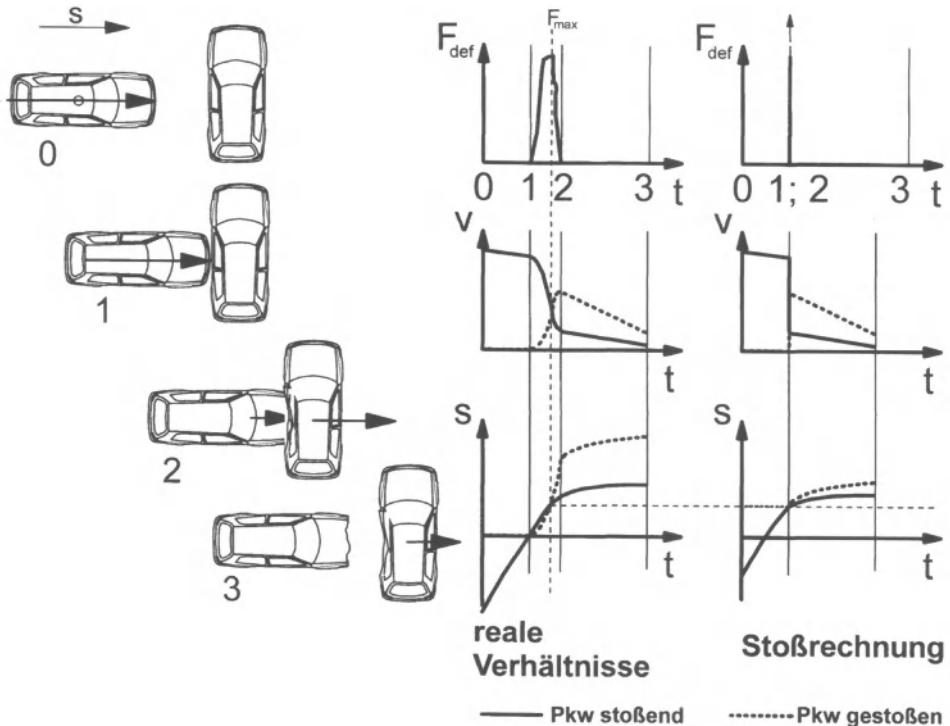


Bild 4.18 Einschränkungen der Stoßrechnung im Vergleich zu einem realen Unfall (nach [Burg 81], überarbeitet)

4.4.3 Ergänzungshypothesen

Für die Anwendung der klassischen Stoßtheorie und ihre Erweiterung vom elastischen, geraden, zentrischen Stoß auf den nichtelastischen, schiefen, 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 Abschnitt 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.

4 Unfallmechanik

- 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 $P_T \leq \mu * P_N$ liegt, ist die tangentiale Relativgeschwindigkeit zwischen den Stoßkontrahenten gleich Null. Diese Hypothese wird bei den heute üblichen 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 $P_T = \mu * P_N$ 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 Abschnitt 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 $\Delta t = t' - t$

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

Mit:

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

$$m * v_s = \underline{I} \quad \text{Impuls des Körpers vor dem Stoß}$$

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

schreibt sich der Impulssatz für den Körper:

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

4 Unfallmechanik

d.h. die Einwirkung des Stoßantriebes verursacht die Änderung des Impulses. Man beachte, dass sich der Impuls eines Körpers allein aus seiner Gesamtmasse und seiner Schwerpunktsgeschwindigkeit ergibt. Man beachte ferner, 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

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

Nach Integration über die Stoßdauer $\Delta t = t' - t$ erhält man mit $\underline{D}_S = \underline{\Theta}_S * \underline{\omega}$ ($\underline{\Theta}_S = \text{konst.}$)

$$\begin{aligned}\underline{D}_S' - \underline{D}_S &= \underline{\Theta}_S * \underline{\omega}' - \underline{\Theta}_S * \underline{\omega} = \int_t^{t'} \underline{M}_S dt \\ \int_t^{t'} \underline{M}_S dt &= \int_t^{t'} (\underline{r} \times \underline{F}_a) dt = \underline{r} \times \underline{P} \\ \underline{\Theta}_S * \underline{\omega}' - \underline{\Theta}_S * \underline{\omega} &= \underline{r} \times \underline{P}\end{aligned}$$

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 \underline{D}_S ist gleich der Summe der Momente aller äußereren Stoßantriebe. Das Produkt $\underline{r} \times \underline{P}$ 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 Unfallechanalyse und Unfallrekonstruktion fast immer nur das zweidimensionale Problem (Bild 4.19) betrachtet. Bei Pkw-Unfällen wird also nur die auf die Straßenebene projizierte Bewegung des 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 Schwerpunktsverschiebungen x_S, y_S und den Drehwinkel φ .

Impulssatz für die ebene Scheibe:

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

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

$$m * v_{Sx}' - m * v_{Sx} = +P_x$$

$$m * v_{Sy}' - m * v_{Sy} = -P_y \quad (\text{Vorzeichen!})$$

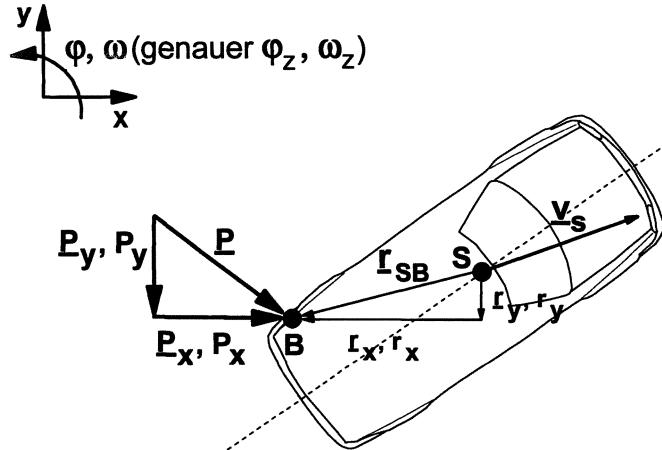


Bild 4.19 Stoßantrieb an der ebenen Scheibe ($B=K=KO$)

Drehimpulssatz für die ebene Scheibe:

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

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]:

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

Daraus folgt hier:

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

Dabei ist \underline{r} ein beliebiger Verbindungsvektor vom Schwerpunkt S zur Wirkungslinie von \underline{P} (z.B. \underline{r}_{SB}). Für den Drehimpulssatz erhält man hier also eine skalare Gleichung, die man anschaulich auch direkt anhand von **Bild 4.19** hätte ablesen können:

$$\Theta_{Sz} * (\omega_z' - \omega_z) = P_y * r_x + P_x * r_y$$

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

4.4.7 Gerader zentrischer Stoß zweier Scheiben

Die Stoßziffer soll am Beispiel des geraden zentralen Stoßes zweier Scheiben veranschaulicht werden, siehe Bild 4.20. Gegeben seien die Schwerpunktsgeschwindigkeiten v_1 und v_2 sowie die Massen m_1 und m_2 , gesucht seien die Schwerpunktsgeschwindigkeiten v_1' und 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:

$$m_1 * (v_1' - v_1) = - \int F_x dt = -P_x$$

$$m_2 * (v_2' - v_2) = \int F_x dt = +P_x$$

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

$$m_1 * v_1 + m_2 * v_2 = m_1 * v_1' + m_2 * v_2' = (m_1 * m_2) * v_{SGes}$$

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:

$$k = \frac{P_{Rest}}{P_{Komp}} = \frac{\int_{t_u}^{t'} F dt}{\int_{t_u}^t F dt}$$

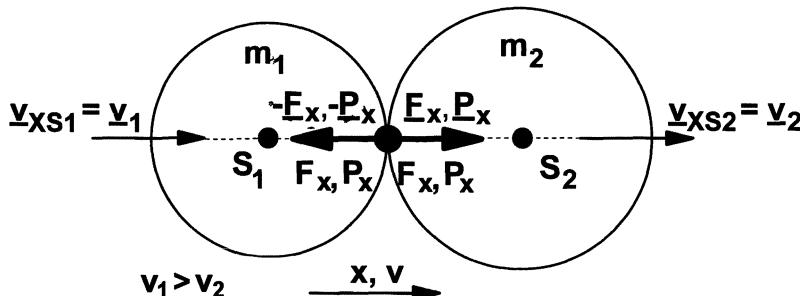


Bild 4.20 Gerader zentrischer Stoß zweier Scheiben

4 Unfallmechanik

Der Kompressions- und der Restitutionsstoßantrieb lauten:

$$m_1 * (v_{1u} - v_1) = -P_{Komp}$$

$$m_2 * (v_{2u} - v_2) = +P_{Komp}$$

$$m_1 * (v_1' - v_{1u}) = -P_{Rest}$$

$$m_2 * (v_2' - v_{2u}) = +P_{Rest}$$

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

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

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:

$$v_1' = v_1 - \frac{m_2 * (1+k)}{m_1 + m_2} * (v_1 - v_2) \quad v_2' = v_2 + \frac{m_1 * (1+k)}{m_1 + m_2} * (v_1 - v_2)$$

Damit folgt für den Stoßantrieb:

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

Es ist unbedingt notwendig, in dem „Ersatzsystem“ einer Stoßkonfiguration (z.B. Bild 4.20) 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 im Bild 4.20 angezeigt wird. Hätte man P_x mit umgekehrtem Vorzeichen im Bild 4.20 so eingezeichnet, 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

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

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

d.h. die Geschwindigkeitsänderung Δv_1 wächst mit

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

Die Restitutionsziffer k lässt sich anschaulich beim Rückprall von einer Unterlage, Wand o. ä. darstellen, Bild 4.21. Die Geschwindigkeiten (v_1, v_1') beziehen sich auf den Zeitpunkt des Aufpralls. In den eingezeichneten oberen Lagen der Kugel sei die Geschwindigkeit gerade Null, da die kinetische Energie in potenzielle Energie umgesetzt wurde.

Aus dem Energiesatz folgt:

$$v_1 = \sqrt{2 * g * h} \quad \text{Aufprallgeschwindigkeit (positiv, da in } z\text{-Richtung)}$$

$$v_1' = -\sqrt{2 * g * h} \quad \text{Abprallgeschwindigkeit (negativ, da gegen } z\text{-Richtung)}$$

Für die Stoßzahl ergibt sich:

$$k = - \frac{v_1' - 0}{v_1 - 0} = \sqrt{\frac{h'}{h}} \quad (\text{immer positiv, wenn keine Durchdringung erfolgt})$$

Demnach beträgt die Geschwindigkeitsänderung beim Aufprall:

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

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 kann man auch „Durchdringungsstöße“ mit einer dann negativen Stoßziffer beschreiben [Zeman 01] und entsprechende Rechnungen durchführen. Den ursprünglichen Gedanken von Newton bei der Einführung der Stoßtheorie widerspricht allerdings diese formale Deutung der Stoßziffer.

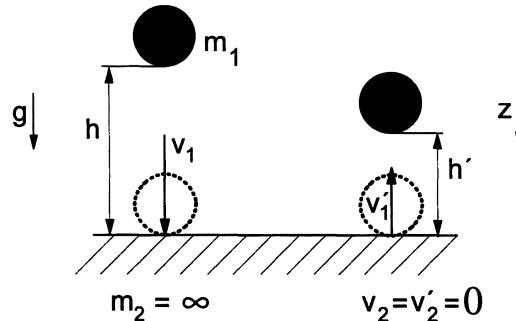


Bild 4.21 Freier Fall einer Kugel auf eine Unterlage ($m_2 = \infty$, $v_2 = v_2' = 0$) und Rückprall

4.4.8 Schiefer exzentrischer Stoß zweier Scheiben

In **Bild 4.22** ist der allgemeine Fall einer Kollision zweier ebener Scheiben (Fahrzeuge) dargestellt. Die Stoßantriebe können als Reaktionsgrößen in beliebiger Richtung angesetzt werden, wobei aber *actio = reactio* zu beachten ist. Die Impuls- und Drehimpulssätze lauten:

$$\underline{I}'_1 - \underline{I}_1 = m_1 * (\underline{v}'_1 - \underline{v}_1) = -\underline{P} \quad \underline{v}_1 \equiv \underline{v}_{S1}$$

$$\underline{I}'_2 - \underline{I}_2 = m_2 * (\underline{v}'_2 - \underline{v}_2) = +\underline{P} \quad \underline{v}_2 \equiv \underline{v}_{S2}$$

$$\underline{D}'_{S1} - \underline{D}_{S1} = \underline{\Theta}_{S1} * (\underline{\omega}'_1 - \underline{\omega}_1) = \underline{r}_{SB1} \times (-\underline{P})$$

$$\underline{D}'_{S2} - \underline{D}_{S2} = \underline{\Theta}_{S2} * (\underline{\omega}'_2 - \underline{\omega}_2) = \underline{r}_{SB2} \times (+\underline{P})$$

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.

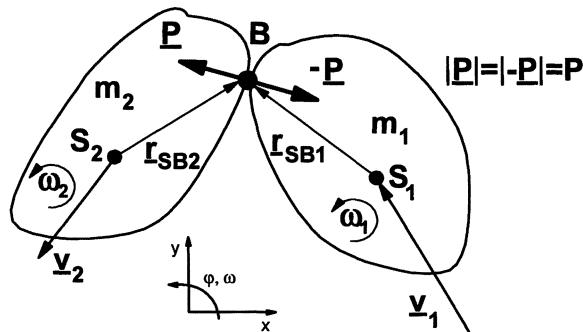


Bild 4.22 Schiefer exzentrischer Stoß zweier Scheiben

4 Unfallmechanik

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

$$v_{1x}', v_{1y}', v_{2x}', v_{2y}', \omega_1', \omega_2', P_x \text{ und } P_y$$

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):

$$v_{B1T}' = v_{B2T}' \quad \text{für } P_T \leq \mu * P_N \quad (\text{Kontrolle nach Berechnung})$$

oder achte Gleichung aus der Gleithypothese (Gleitstoß):

$$P_T = \mu * P_N$$

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):

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

oder siebte und achte Gleichung aus der Verhakungshypothese:

$$v_{1B}' = v_{2B}' : \quad v_{1Bx}' = v_{2Bx}' \quad v_{1By}' = v_{2By}'$$

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 Abschnitt 4.41) 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 Schräggillationen 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.

Multipliziert man den Schwerpunktssatz

$$\underline{F}_{(a)} = m * \frac{d\underline{v}_S}{dt}$$

skalar mit der Verschiebung

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

so ergibt sich:

$$\underline{F}_{(a)} * d\underline{r}_S = m * \frac{d\underline{v}_S}{dt} * \underline{v}_S * dt = m * \underline{v}_S * d\underline{v}_S = d \left[\frac{m * \underline{v}_S^2}{2} \right].$$

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

$$A_{trans}|_A^E = \int_{\underline{r}_{SA}}^{\underline{r}_{SE}} \underline{F}_{(a)} * d\underline{r}_S = \frac{m}{2} * (\underline{v}_{SE}^2 - \underline{v}_{SA}^2) = (E_E - E_A)_{trans}.$$

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

$$\underline{M}_{S(a)} = \frac{d}{dt} (\underline{\Theta}_S * \underline{\omega}) = \underline{\Theta}_S * \frac{d\underline{\omega}}{dt}$$

skalar mit dem Verdrehungsvektor

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

so ergibt sich:

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

4 Unfallmechanik

Die linke Seite stellt – in Analogie zur Translation – den differenziellen Arbeitsbetrag infolge der Wirkung der äußeren Momente $\underline{M}_{S(a)}$ unter dem Verdrehungsvektor $d\varphi$ 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:

$$A_{rot} \Big|_A^E = \int_{\varphi_A}^{\varphi_E} M_{S(a)} * d\varphi = \frac{\Theta_S}{2} * (\omega_E^2 - \omega_A^2) = (E_E - E_A)_{rot}.$$

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 Bezugs- punkt gewählt wird.

Selbstverständlich gilt auch die Überlagerung, die sich durch Addition der abgeleiteten Teil- arbeitssätze ergibt:

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

Es sei darauf hingewiesen, dass bei den äußeren Kräften $\underline{F}_{(a)}$ und Momenten $\underline{M}_{S(a)}$ 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 $actio = reactio$ 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

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

und durch Integration

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

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

4 Unfallmechanik

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:

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

Dabei sind:

$A \Big|_A^E$: 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)

$W \Big|_A^E$: 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 $A \Big|_A^E$ der äußeren Kräfte (Kontaktkräfte) ist Null, da die Wand starr sein soll. Also lautet der Arbeitssatz:

$$0 = \frac{1}{2} * m * v'^2 - \frac{1}{2} * m * v^2 + W$$

$$\Rightarrow W = \frac{1}{2} * m * (v^2 - v'^2) = \frac{1}{2} * m * v^2 * (1 - k^2) \quad \text{mit } k = -\frac{v'}{v}$$

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 Bild 4.20). 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:

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

Für die Kollisionsphase gilt also der Energiesatz in der Form

$$E_1 + E_2 = E_1' + E_2' + W_{Def}$$

Durch Einsetzen der Auslaufgeschwindigkeiten, die allein aus dem Impulssatz und der Newtonschen Stoßzahlhypothese folgen, siehe Abschnitt 4.4.7, erhält man nach einigen Umformungen:

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

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.

4 Unfallmechanik

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

$$W_{Def} = E_{1trans} + E_{2trans} + E_{1rot} + E_{2rot} - (E_{1trans}' + E_{2trans}' + E_{1rot}' + E_{2rot}')$$

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 Bild 4.23. Die Arbeit der äußeren Stoßkraft ist auch hier Null, da keine Verschiebungen am starren Pfahl auftreten. Also lautet der Arbeitssatz:

$$A|_A^E = 0 = E_E - E_A + W|_A^E$$

$$\Rightarrow W|_A^E = W_{Def} = E_A - E_E$$

$$\Rightarrow W|_A^E = \frac{1}{2} * m * v_x^2 - \left(\frac{1}{2} * m * (v_x'^2 + v_y'^2) + \frac{1}{2} * \Theta_S * \omega_z'^2 \right).$$

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.

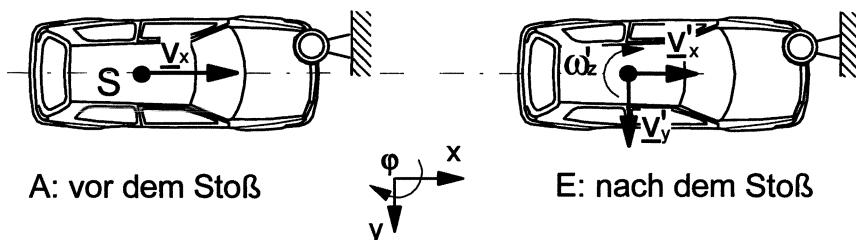


Bild 4.23 Exzentrischer Pfahlaufprall als Stoßvorgang (keine Lagenänderung beim Stoß)

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.

Bild 4.24 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

4 Unfallmechanik

Bewegung entgegengerichtet, also ist die Arbeit der äußeren Kräfte negativ. Vereinfachend wird üblicherweise angenommen, dass die Reibkraft gleichförmig über den Auslaufweg wirkt. Der Arbeitssatz für die Translationsbewegung lautet dann:

$$A_{trans} \Big|_A^E = (E_E - E_A)_{trans}$$

$$\Rightarrow -m * g * \mu * s_S = 0 - \frac{1}{2} * m * v_S'^2, \text{ d.h.:}$$

$$\frac{1}{2} * m * v_S'^2 = m * g * \mu * s_S$$

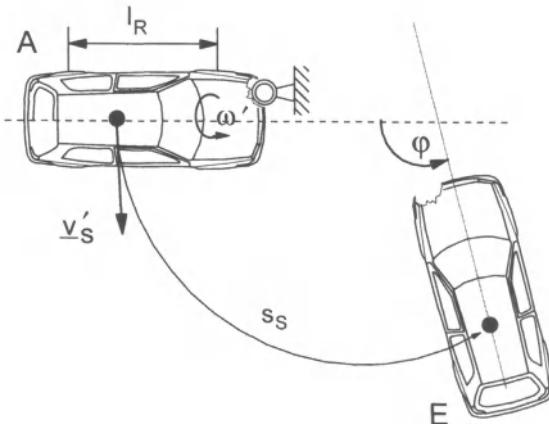


Bild 4.24 Schematische Darstellung der Auslaufbewegung nach dem Pfahlaufprall

Hieraus erhält man den Betrag der Schwerpunktsgeschwindigkeit 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:

$$A_{rot} \Big|_A^E = (E_E - E_A)_{rot}$$

$$\Rightarrow -\frac{1}{2} * m * g * \mu * l_R * \varphi = 0 - \frac{1}{2} * \Theta_S * \omega'^2, \text{ d.h.:}$$

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

4 Unfallmechanik

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

$$\omega' = \sqrt{\frac{m g \mu l_R \varphi}{\Theta_S}} \quad (\text{mit } l_R \text{ Radstand des Fahrzeugs})$$

4.5.8 Berechnung der Stoßziffer für einen Wandaufprall

Beim Aufprall eines Fahrzeugs auf eine ortsfeste, undeformierbare Barriere (OUB) mit der Anfangsgeschwindigkeit v wird ein Kraft-Weg-Verlauf gemäß **Bild 4.25** 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:

$$A|_{s=0}^{s_{dyn}} = E_{s_{dyn}} - E_{s=0} + W|_{s=0}^{s_{dyn}}$$

$$0 = 0 - E + W_{pl} + W_{el}$$

$$A|_{s_{dyn}}^{s_{stat}} = E_{s_{stat}} - E_{s_{dyn}} + W|_{s_{dyn}}^{s_{stat}}$$

$$0 = E' - 0 - W_{el} \quad .$$

Somit gilt:

$$W_{pl} = W|_{s=0}^{s_{stat}} = E - E' = \frac{1}{2} * m * (v^2 - v'^2)$$

$$W_{el} = -W|_{s_{dyn}}^{s_{stat}} = E' = \frac{1}{2} * m * v'^2$$

$$W_{pl} + W_{el} = W|_{s=0}^{s_{dyn}} = E = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad .$$

Die kinetische Energie vor dem Stoß wird beim Aufprall in Verformungsenergie als Summe von plastischem und elastischem Energieanteil umgesetzt, siehe **Bild 4.25**. Beim Rückprall wird der elastische Anteil der Verformungsenergie wieder in kinetische Energie verwandelt. Für die Stoßziffer folgt daraus:

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

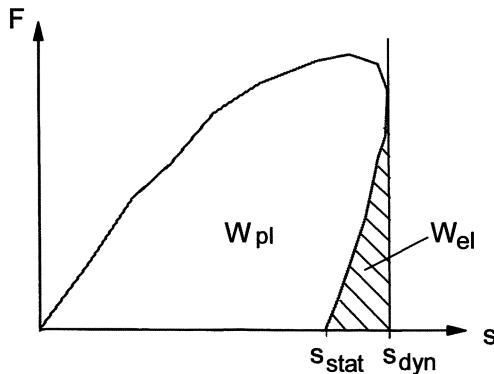


Bild 4.25 Kraft-Weg-Diagramm beim Fahrzeugaufprall gegen die OUB

4.6 ANWENDUNGSBEISPIELE ZUR KRAFTRECHNUNG

4.6.1 Physikalisches Pendel

Für das physikalische Pendel nach **Bild 4.26** wird der Drallsatz einmal auf den Schwerpunkt und einmal auf den (körper- und raumfesten) Aufhängepunkt bezogen.

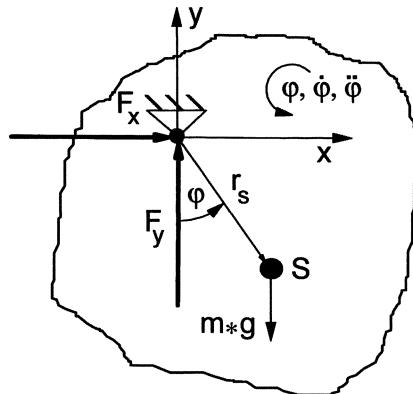


Bild 4.26 Physikalisches Pendel (Aufhängung und Schwerpunkt in der x-y-Ebene)

- a) Bezugspunkt ist der Schwerpunkt S :

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

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

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

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

$$y_s = -r_s * \cos \varphi \quad \dot{y}_s = r_s * \dot{\varphi} * \sin \varphi \quad \ddot{y}_s = r_s (\ddot{\varphi} * \sin \varphi + \dot{\varphi}^2 * \cos \varphi)$$

$$\Theta_s = i^2 * m \quad (\text{mit } i \text{ Trägheitsradius})$$

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 gewinnt man die Bewegungsgleichung, wenn man den Drallsatz auf den raum- und körperfesten Drehpunkt 0 bezieht:

b) Bezugspunkt ist der Aufhängepunkt 0:

$$m * \ddot{x}_s = F_x$$

$$m * \ddot{y}_s = F_y - m * g$$

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

$$\ddot{\varphi} + \frac{r_s}{i^2 + r_s^2} * g * \sin \varphi = 0$$

Der Term

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

wird „reduzierte Pendellänge“ l_R genannt, da die Gleichung

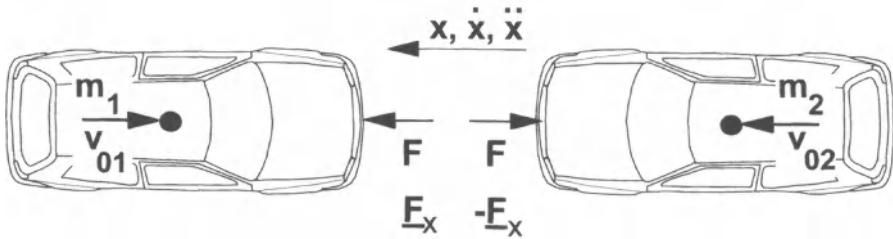
$$\ddot{\varphi} + \frac{g}{l_R} * \sin \varphi = 0$$

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, nennt man Stoßmittelpunkt.

4.6.2 Frontalkollision zweier Fahrzeuge

Gegeben seien die Massen und die Einlaufgeschwindigkeiten zweier frontal kollidierender Fahrzeuge, siehe Bild 4.27. Die Kraft-Weg-Kennungen der Frontstrukturen beider Fahrzeuge beim Wandaufprall mögen vollplastisch und linear mit den jeweiligen Steifigkeiten c_1 und c_2 verlaufen.

**Bild 4.27** Frontalkollision zweier Fahrzeuge (gerader, zentrischer Stoß)

a) Berechnung der Steifigkeiten:

Bei einem Wandaufprall mit einer Einlaufgeschwindigkeit von $v = v_{01}$ sei der zurückgelegte Weg $x = x_w$. Wendet man bei Annahme einer linearen Deformationskennung den Arbeitssatz an, so erhält man

$$\frac{1}{2} m * v_0^2 = \frac{1}{2} c * x_w^2$$

Daraus ergeben sich für c_1 und c_2 der beiden Fahrzeuge:

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

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

$$c_{ers} = \frac{c_1 * c_2}{c_1 + c_2}$$

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

Wendet man das Schnittpunktprinzip an, so kann man das dynamische Kräftegleichgewicht an den beiden Fahrzeugen aufstellen:

Schwerpunktsatz, dynamisches Kräftegleichgewicht

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

Stoffgesetz

$$F = c_{ers} * (x_2 - x_1)$$

Damit ergibt sich:

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

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

In Matrix-Form bedeutet das

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

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

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

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

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

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

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

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

Die Eigenwerte sind dann

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

$$\text{mit der Ersatzmasse } m_{ers} = \frac{m_1 * m_2}{m_1 + m_2}$$

Die zugehörigen Eigenvektoren bestimmen sich zu

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

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

Die allgemeine Lösung der Differenzialgleichung lautet, siehe Bild 4.28:

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

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

Die Konstanten folgen aus den Anfangsbedingungen. Man beachte, 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 Abschnitt 4.8 verwiesen, in dem die Vorzeichenfestlegung von gesuchten und gegebenen Größen unterschieden wird.

$$\underline{x}(t=0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \dot{\underline{x}}(t=0) = \begin{bmatrix} \dot{x}_{01} \\ \dot{x}_{02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -v_{01} \\ v_{02} \end{bmatrix}$$

$$A_1 = A_2 = 0 \quad B_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} * (-v_{01} - v_{02}) + v_{02}$$

$$B_2 = -\frac{m_1}{m_1 + m_2} * \frac{-v_{01} - v_{02}}{\omega_2}$$

Die allgemeine Lösung der Differenzialgleichungen ist also, siehe Bild 4.28:

$$\underline{x}(t) = \left[\frac{-m_1}{m_1 + m_2} * (v_{01} + v_{02}) + v_{02} \right] * \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} * t$$

$$+ \left[\frac{-m_1}{m_1 + m_2} * \frac{v_{01} + v_{02}}{\omega_2} \right] * \begin{bmatrix} m_2/m_1 \\ -1 \end{bmatrix} * \sin[\omega_2 * t]$$

$$\dot{\underline{x}}(t) = \left[\frac{-m_1}{m_1 + m_2} * (v_{01} + v_{02}) + v_{02} \right] * \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$+ \left[\frac{-m_1}{m_1 + m_2} * (v_{01} + v_{02}) \right] * \begin{bmatrix} m_2/m_1 \\ -1 \end{bmatrix} * \cos[\omega_2 * t]$$

$$\ddot{\underline{x}}(t) = \left[\frac{-m_1}{m_1 + m_2} * \omega_2 * (v_{01} + v_{02}) \right] * \begin{bmatrix} -m_2/m_1 \\ 1 \end{bmatrix} * \sin[\omega_2 * t]$$

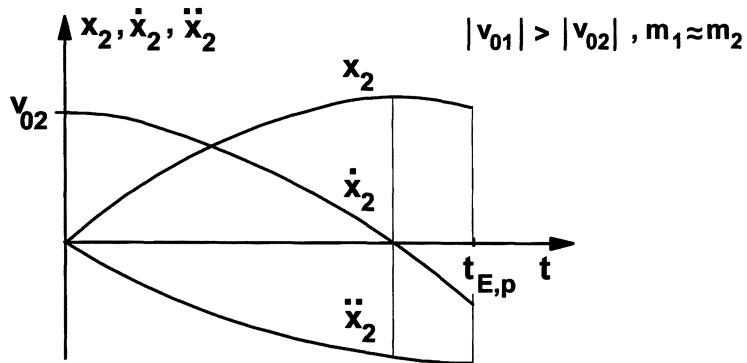


Bild 4.28 Zeitlicher Verlauf für die Bewegungsgrößen von Fahrzeug 2
($t_{E,p}$ = Ende der Stoßdauer bei vollplastischem Stoß)

c) Berechnung der Geschwindigkeitsänderungen und der maximalen Beschleunigungen:

$$\Delta v_1 = v_1' - (-v_{01}) = v_1(t_{E,p}) + v_{01}$$

$$\Delta v_2 = v_2' - v_{02} = v_2(t_{E,p}) - v_{02}$$

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

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

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

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

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

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

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

- 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.

- 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 äußereren Deformationen. Damit sind die Insassen des kleineren Fahrzeugs 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 Abschnitt 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 Bild 4.29.

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:

$$m_1 * (v_{1x}' - v_{1x}) = - \int F_B dt = -P_B$$

$$m_2 * (v_{S2x}' - v_{S2x}) = \int F_B dt - \int F_A dt = P_B - P_A$$

$$\Theta_{Az2} * (\omega_2' - \omega_2) = \int F_B * (l_A + l_B) dt = P_B * l$$

4 Unfallmechanik

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

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

Die Anfangsbedingungen sind:

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

Zusammenhang zwischen Translations- und Rotationsgeschwindigkeit:

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

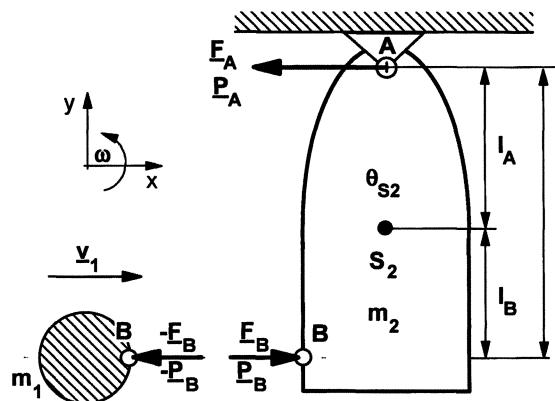


Bild 4.29 Exzentrischer Stoß gegen eine drehbar gelagerte Scheibe

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:

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

Das führt zu dem folgenden Gleichungssystem:

v_1'	ω_2'	P_A	P_B	=	1
m_1	0	0	1	=	$m_1 * v_1$
0	$m_2 * l_A$	1	-1	=	0
0	Θ_{Az2}	0	-1	=	0
-1	l	0	0	=	$k * v_1$

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

$$v_1' = \frac{m_1 * l^2 - k * \Theta_{Az2} * v_1}{\Theta_{Az2} + m_1 * l^2}$$

$$\omega_2' = \frac{(1+k) * m_1 * l}{\Theta_{Az2} + m_1 * l^2} * v_1$$

$$P_A = \frac{(1+k) * (\Theta_{Az2} - m_2 * l * l_A) * m_1}{\Theta_{Az2} + m_1 * l^2} * v_1$$

$$P_B = \frac{(1+k) * m_1 * \Theta_{Az2}}{\Theta_{Az2} + m_1 * l^2} * v_1$$

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

$$(1+k) * (\Theta_{Az2} - m_2 * (l_A + l_B) * l_A) * m_1 = 0$$

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

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

Beim Vergleich der Bewegungsgleichungen von mathematischen und physikalischen Pendel erkennt man, dass die reduzierte Pendellänge des physikalischen Pendels gleich dem Abstand l_{AB} ist. Üblicherweise wird die reduzierte Pendellänge mit l_R bezeichnet, siehe Abschnitt 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. Fasst man einen Hammer in A an, so erhält man beim Schlag im Abstand l_R keinen Stoß in die Hand.
- Bei der freien, ungefesselten Scheibe würde sich A als Momentanpol der Drehbewegung einstellen.

4 Unfallmechanik

Die maximale Höhenlage der Schwerpunktbewegung des Pendels liefert der Energiesatz :

$$\frac{1}{2} * \Theta_{A=2} * \omega_2'^2 = m_2 * g * l_A * (1 - \cos \alpha_{\max})$$

$$\alpha_{\max} = \arccos \left| 1 - \frac{\Theta_{A=2} * \omega_2'^2}{2 * m_2 * g * l_A} \right|$$

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 Bild 4.30

Annahme: Stoßantrieb wirkt nur auf der y -Achse

Gesucht: Bewegungszustand nach dem Stoß: v_{S_y}' , ω'

Impulssatz (x -Richtung entfällt): $m * (v_{S_y}' - v_{S_y}) = -P$

Drehimpulssatz: $\Theta_S * (\omega_z' - \omega_z) = P * l_x$

Stoßzahlhypothese:

$$k = - \frac{(v_{S_y}' - \omega_z' * l_x) - 0}{v_{S_y} - 0} = - \frac{v_{rel}'}{v_{rel}}$$

Anfangsbedingungen: $v_{S_x} = 0$ $v_{S_y} = v_0$ $\omega_z = 0$

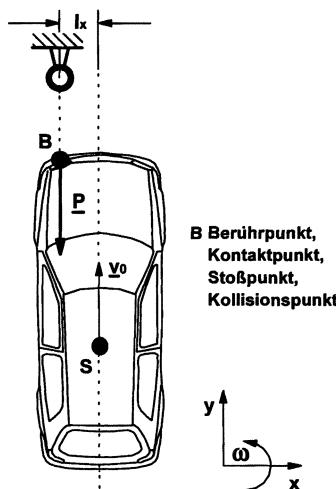


Bild 4.30 Kollision Pkw-Baum: Betrachtung als gerader exzentrischer Stoß nach [Marquard 62]

4 Unfallmechanik

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

	v_{Sy}'	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	=	$(I+k) \cdot m \cdot v_0$
V:	0	$l_x^2 \cdot m + \Theta_S$	0	=	$(I+k) \cdot l_x \cdot m \cdot v_0$

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

Aus diesem Gleichungsschema ermitteln sich die Lösungen zu:

$$\omega_z' = \frac{(I+k) \cdot m \cdot l_x}{\Theta_S + m \cdot l_x^2} \cdot v_0 \quad (\text{immer positiv bei positivem } l_x)$$

$$v_{Sy}' = \frac{m \cdot l_x^2 - k \cdot \Theta_S}{\Theta_S + m \cdot l_x^2} \cdot v_0 \quad (\text{negativ bei kleinem } l_x \text{ und großem } k)$$

$$P = \frac{(I+k) \cdot \Theta_S \cdot m}{\Theta_S + m \cdot l_x^2} \cdot v_0 \quad (\text{immer positiv})$$

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

$$v_0 = \frac{\Theta_S + m \cdot l_x^2}{(I+k) \cdot m \cdot l_x} \cdot \omega_z' \quad \omega_z' = \sqrt{\frac{m g \mu l_R \varphi}{\Theta_S}}$$

Berechnung der kinetischen Energie nach dem Stoß:

$$E' = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{Sy}'^2 + \frac{1}{2} \cdot \Theta_S \cdot \omega_z'^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^2 \cdot \frac{k^2 \cdot \Theta_S + m \cdot l_x^2}{\Theta_S + m \cdot l_x^2}$$

4 Unfallmechanik

Ermittlung der Deformationsenergie (Energieverlust):

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

$$\text{mit } \tilde{\Theta}_{ers} = \frac{\Theta_S}{\Theta_S + m * l_x^2}$$

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

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

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

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

In der folgenden Tabelle sind Ergebnisse der Stoßrechnung dargestellt; dabei gilt näherungsweise:

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

Eingangsparameter					Ausgangswerte		
l_R [m]	m [kg]	v_0 [m/s]	l_x [m]	k	v_{sy}' [m/s]	ω' [1/s]	P [kgm/s]
2,0	1.000	13	0,3	1	-10,85	7,16	23.850
2,0	1.000	13	0,3	0	1,07	3,58	11.930
2,0	1.000	13	0,3	0,1	-0,12	3,94	13.120
2,0	1.000	20	0,3	0,1	-0,18	6,06	20.180
2,5	2.000	13	0,3	0,1	-0,52	2,60	27.040
2,5	2.000	13	0,5	0,1	0,67	3,95	24.660
2,5	2.000	13	0,5	0,3	-1,57	4,66	29.140

Die grafische Konstruktion des Momentanpols M' der Geschwindigkeiten nach dem Stoß zeigt Bild 4.31.

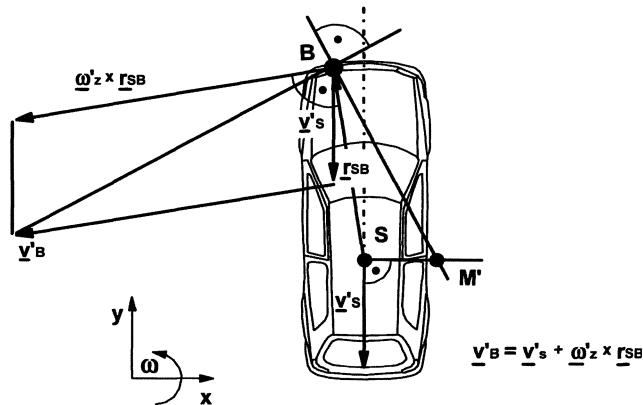


Bild 4.31 Konstruktion des Momentanpols bei einer Kollision Pkw-Baum nach der Hypothese Marquard (gerader exzentrischer Stoß)

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 Schwerpunktsgeschwindigkeit 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. Das Bild 4.32 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.

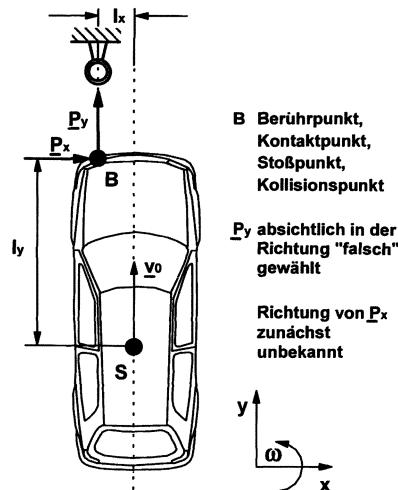


Bild 4.32 Kollision Pkw-Baum: Betrachtung als tangential (in x -Richtung) verhakter Stoß

4 Unfallmechanik

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

$$m * (v_{sx}' - 0) = P_x$$

$$m * (v_{sy}' - v_0) = P_y$$

$$\Theta_S * (\omega_z' - 0) = -P_x * l_y - P_y * l_x$$

$$v_{sx}' - \omega_z' * l_y = 0 \quad (\text{Verhakung in } x\text{-Richtung})$$

Restitution wirke nur in y -Richtung:

$$k = -\frac{v_{By}' - v_{Pfahly}'}{v_{By} - v_{Pfahly}} = -\frac{(v_{sy}' - \omega_z' * l_x) - 0}{v_0 - 0}$$

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	=	$m * v_0$
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	=	$k * v_0$
VI	0	0	$l_y * m$	-1	0	=	0
VII	0	0	$l_x * m$	0	-1	=	$(1+k) * m * v_0$
VIII	0	0	$l_x^2 * m + \Theta_S$	l_y	0	=	$(1+k) * l_x * m * v_0$
IX	0	0	Θ_B	0	0	=	$(1+k) * l_x * m * v_0$

Satz von Steiner:

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

Rechenschritte:

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

Damit lauten die Lösungen:

$$v_{Sx}' = \frac{(1+k)*m*l_x*l_y}{\Theta_B} * v_0 \quad (\text{positiv, solange } l_x \text{ und } l_y \text{ positiv})$$

$$v_{Sy}' = -k * v_0 + \frac{m*l_x^2}{\Theta_B} * (1+k) * v_0 \quad (\text{positiv oder negativ})$$

$$\omega_z' = \frac{(1+k)*m*l_x}{\Theta_B} * v_0 \quad (\text{positiv, solange } l_x \text{ positiv})$$

$$P_x = \frac{(1+k)*m*l_x*l_y}{\Theta_B} * m * v_0 \quad (\text{positiv für } l_x \text{ und } l_y \text{ positiv})$$

$$P_y = - \left(1 - \frac{m*l_x^2}{\Theta_B} \right) * (1+k) * m * v_0 \quad (\text{immer negativ})$$

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

$$v_0 = \frac{\Theta_S + m*(l_x^2 + l_y^2)}{(1+k)*m*l_x} * \omega_z' \quad \omega_z' = \sqrt{\frac{m g \mu l_R \varphi}{\Theta_S}}$$

Berechnung der kinetischen Energie nach dem Stoß:

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

Ermittlung der Deformationsenergie.

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

In der folgenden Tabelle werden beispielhaft Ausgangswerte der Stoßrechnung für unterschiedliche Eingangsparameter dargestellt.

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	1.000	13	1,2	0,3	0	1,85	0,46	1,54	1.850	-12.540
2,0	1.000	13	1,5	0,3	0,1	1,93	-0,92	1,28	1.927	-13.910
2,4	1.000	13	1,5	0,5	0	2,63	0,88	1,75	2.627	-12.920
2,4	1.000	13	1,5	0,5	1,0	5,25	-12,05	3,50	5.254	-25.850
2,4	1.000	13	1,5	0,2	0,1	1,22	-1,22	0,81	1.221	-15.020
2,4	1.000	20	1,5	0,5	0,1	4,12	-0,60	2,79	4.188	-26.060

Die grafische Konstruktion des Momentanpols M' der Geschwindigkeiten nach dem Stoß zeigt Bild 4.33. Man erkennt aus dem Vergleich der Ergebnisformeln und der Zahlenwerte in den Tabellen sowie der Lagen der Momentanpole M' , dass erhebliche Unterschiede bestehen, wenn l_x größer wird. Dann ist die Hypothese von Marquard nicht mehr gerechtfertigt.

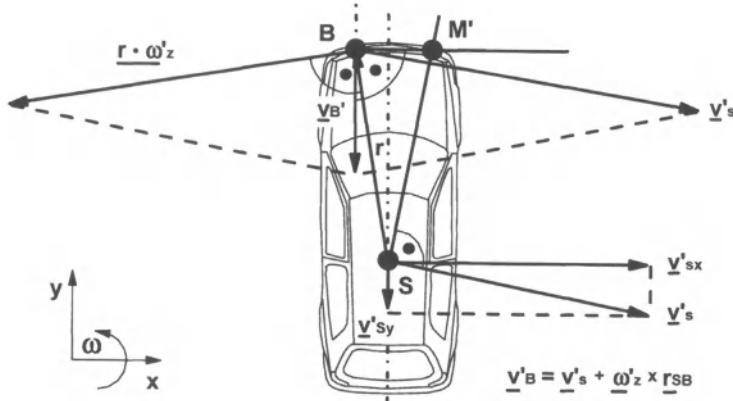


Bild 4.33 Konstruktion des Momentanpols bei einer Kollision Pkw-Baum unter der Hypothese des tangential verhakten Stoßes

Zu den hier vorgeführten Beispielen ist noch einmal anzumerken, dass im Sinne der Vorwärtsrechnung (siehe Abschnitt 5.4) 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') 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 Bild 4.34). Auf Grund dieser einfachen, aber nicht unrealistischen Voraussetzungen ist die Hypothese von Marquard berechtigt, mit der die Aufgabe analytisch gelöst werden kann

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)

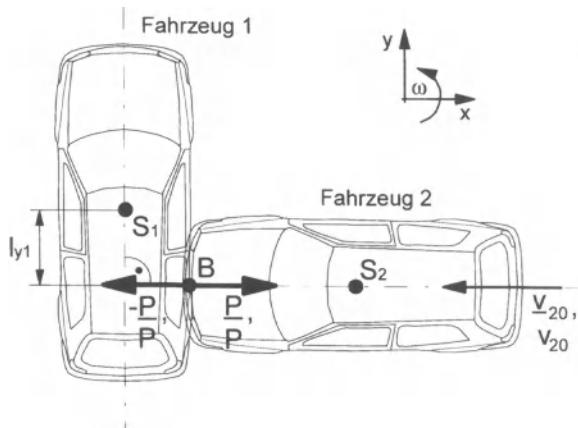


Bild 4.34 Pkw-Pkw-Seitenkollision (Stoß unter 90° auf ein stehendes Fahrzeug)

Stoßgleichungen:

$$m_1 * (v_{S1x}' - 0) = -P$$

$$m_1 * (v_{S1y}' - 0) = 0$$

$$\Theta_{S1} * (\omega_1' - 0) = -P * l_{y1}$$

$$m_2 * (v_{S2x}' - (-v_{20})) = P \quad (\text{auch hier ist } v_{20} \text{ als Betrag positiv einzusetzen})$$

$$m_2 * (v_{S2y}' - 0) = 0$$

$$\Theta_{S2} * (\omega_2' - 0) = 0$$

Stoßzahlhypothese:

$$k = - \left(\frac{v_{B1x}' - v_{B2x}'}{v_{B1x} - v_{B2x}} \right) = - \frac{(v_{S1x}' + l_{y1} * \omega_1') - v_{S2x}'}{0 - (-v_{20})}$$

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

$$P = \frac{(1+k)*m_1}{\left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) + m_1 * \frac{l_{y1}^2}{\Theta_{S1}}} * v_{20} \quad (\text{immer positiv})$$

$$v_{S1x}' = - \frac{P}{m_1} = - \frac{(1+k)}{\left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) + m_1 * \frac{l_{y1}^2}{\Theta_{S1}}} * v_{20} \quad (\text{immer negativ})$$

$$v_{S1y}' = 0$$

$$\omega_1' = - \frac{P * l_{y1}}{\Theta_{S1}} = - \frac{(1+k)*m_1*l_{y1}}{\left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right)*\Theta_{S1} + m_1 * l_{y1}^2} * v_{20} \quad (\text{immer negativ})$$

$$v_{S2x}' = \frac{P}{m_2} - v_{20} = - \frac{\left(1 - k * \frac{m_1}{m_2}\right) + \frac{m_1 * l_{y1}^2}{\Theta_{S1}}}{\left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right) + \frac{m_1 * l_{y1}^2}{\Theta_{S1}}} * v_{20} \quad (\text{immer negativ})$$

$$v_{S2y}' = 0$$

$$\omega_2' = 0$$

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 Bild 4.35). In der Sicherheitsentwicklung wird diesem Umstand dadurch Rechnung getragen, dass die Offset-Kollision gegen eine ortsfeste deformierbare bzw. undeformierbare Barriere mit 40 % Überdeckung heute zu den gesetzlich vorgeschriebenen Testbedingungen gehört.

Für die Berechnung wird angenommen, dass am Berührungsrand (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

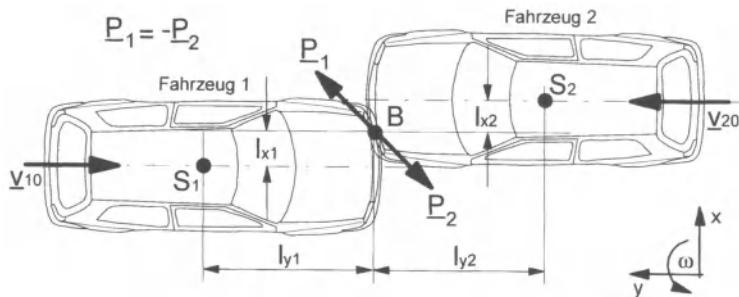


Bild 4.35 Pkw-Pkw-Offset-Frontalkollision

Man beachte, dass in Bild 4.35 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 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:

$$m_1 * (v_{S1x} - 0) = P_x$$

$$m_1 * (v_{S1y} - (-v_{10})) = P_y$$

$$m_2 * (v_{S2x} - 0) = -P_x$$

$$m_2 * (v_{S2y} - v_{20}) = -P_y$$

Drehimpulssätze:

$$\Theta_{S1} * (\omega_1' - 0) = P_x * l_{y1} + P_y * l_{x1}$$

$$\Theta_{S2} * (\omega_2' - 0) = P_x * l_{y2} + P_y * l_{x2}$$

Verhakungsbedingungen:

$$v_{1Bx}' = v_{2Bx}' \Rightarrow v_{S1x}' + \omega_1' * l_{y1} = v_{S2x}' - \omega_2' * l_{y2}$$

$$v_{1By}' = v_{2By}' \Rightarrow v_{S1y}' + \omega_1' * l_{x1} = v_{S2y}' - \omega_2' * l_{x2}$$

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:

$$v_{S1x}' = -v_{S2x}' \quad l_{x1} = l_{x2} = l_x$$

$$v_{S1y}' = -v_{S2y}' \quad l_{y1} = l_{y2} = l_y$$

$$\omega_1' = \omega_2' = \omega' \quad m_1 = m_2 = m$$

$$v_{10} = v_{20} = v_0 \quad \Theta_{S1} = \Theta_{S2} = \Theta_S$$

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.

$$\begin{aligned} m * v_{S1x}' &= P_x \\ m * (v_{S1y}' + v_0) &= P_y \\ \Theta_S * \omega' &= P_x * l_y + P_y * l_x \end{aligned}$$

Aus den Verhakungsbedingungen wird:

$$v_{S1x}' = -\omega' * l_y \Rightarrow v_{Bx}' = 0$$

$$v_{S1y}' = -\omega' * l_x \Rightarrow v_{By}' = 0$$

4 Unfallmechanik

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_l'	P_x	P_y	=	1
I	m	0	0	-1	0	=	0
II	0	m	0	0	-1	=	$-m*v_0$
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*m => VI.	0	0	$-l_y*m$	-1	0	=	0
II-V*m => VII.	0	0	$-l_x*m$	0	-1	=	$-m*v_0$
III+ l_y *VI => VIII.	0	0	$-(\Theta_S+l_y^2*m)$	0	l_x	=	0
VIII+ l_x *VII => IX:	0	0	$-(\Theta_S+l_y^2*m+l_x^2*m)$	0	0	=	$-l_x*m*v_0$

Es lassen sich folgende Ergebnisse ableiten

$$v_{S1x}' = -v_{S2x}' = -\frac{l_x * l_y * m}{\Theta_B} * v_0 \quad (\text{negativ f\"ur } l_x \text{ und } l_y \text{ positiv})$$

$$v_{S1y}' = -v_{S2y}' = -\frac{l_x^2 * m}{\Theta_B} * v_0 \quad (\text{negativ f\"ur } l_x \text{ positiv})$$

$$\omega_l' = \omega_2' = \frac{l_x * m}{\Theta_B} * v_0 \quad (\text{positiv f\"ur } l_x \text{ positiv})$$

$$P_x = -\frac{l_x * l_y * m}{\Theta_B} * m * v_0 \quad (\text{negativ f\"ur } l_x \text{ und } l_y \text{ positiv})$$

$$P_y = \left(1 - \frac{l_x^2 * m}{\Theta_B}\right) * m * v_0 \quad (\text{immer positiv})$$

In den obigen Gleichungen gilt der Satz von Steiner:

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

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

$$v_0 = \frac{\Theta_s + m * (l_x^2 + l_y^2)}{m * l_x} * \omega_z' \quad \omega_z' = \sqrt{\frac{m g \mu l_R \varphi}{\Theta_s}}$$

Es zeigt sich also, dass, wie erwartet, P_y positiv wird. P_x ist immer negativ, wirkt also anders, als in Bild 4.35 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 Abschnitt 4.7.2, unter der Voraussetzung $k = 0$.

4.7.5 Kollision Pkw-Fußgänger

Annahme: Darstellung des Fußgängers als Starrkörper, siehe Bild 4.36.

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:

$$m_1 * (v_{S1x}' - v_{S1x}) = -P_x \quad \text{mit } v_{S1x} = v_0$$

$$m_1 * (v_{S1z}' - v_{S1z}) = P_z$$

$$\Theta_{S1} * (\omega_{1y}' - \omega_{1y}) = P_x * (h_p - h_{S1}) - P_z * l_{v1}$$

$$m_2 * (v_{S2x}' - v_{S2x}) = P_x$$

$$m_2 * (v_{S2z}' - v_{S2z}) = -P_z$$

$$\Theta_{S2} * (\omega_{2y}' - \omega_{2y}) = P_x * (h_{S2} - h_p)$$

$$k = -\frac{v_{relBn}'}{v_{relBn}} = k \{v_{S1x}', v_{S2x}', v_{S1z}', v_{S2z}', \omega_{1y}', \omega_{2y}', v_0, \alpha\}$$

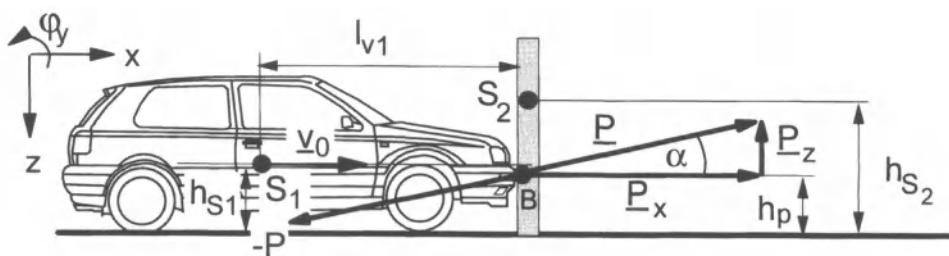


Bild 4.36 Schematische Darstellung einer Kollision Pkw-Fußgänger

4 Unfallmechanik

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:

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

Die analytische Handhabung der Gleichungen ist schwierig, daher werden hier Vereinfachungen eingeführt, siehe **Bild 4.37**.

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.

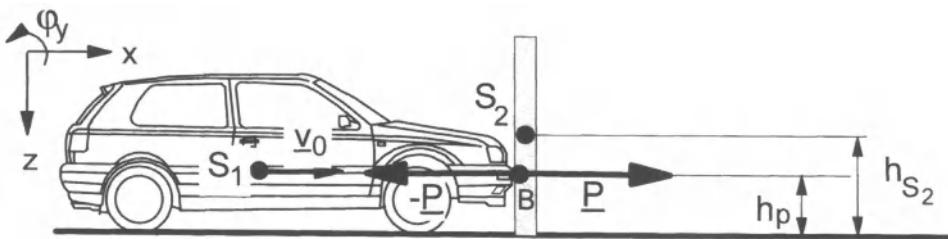


Bild 4.37 Schematische Darstellung für die vereinfachte Stoßrechnung einer Kollision Pkw/Fußgänger (Hypothese Marquard)

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:

$$m_1 * (v_{S1x}' - v_{S1x}) = -P$$

$$m_2 * (v_{S2x}' - v_{S2x}) = P$$

$$\Theta_{S2} * (\omega_{2y}' - \omega_{2y}) = P * (h_{S2} - h_p)$$

$$k = - \frac{v_{S1x}' - (v_{S2x}' + \omega_{2y}' * (h_{S2} - h_p))}{v_{S1x} - 0}$$

4 Unfallmechanik

Das sind vier Gleichungen für vier Unbekannte:

	v_{S1x}'	v_{S2x}'	ω_{2y}'	P	=	1
I	m_1	0	0	1	=	$m_1 * v_{S1x}$
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	=	$k * v_{S1x}$
<hr/>						
V	0	m_1	$m_1 * (h_{S2} - h_p)$	1	=	$v_{S1x} * m_1 * (1+k)$
VI	0	0	$-m_2 * (h_{S2} - h_p)$	$-1 - \frac{m_2}{m_1}$	=	$-v_{S1x} * m_2 * (1+k)$

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

$$P = \frac{(1+k) * m_2 * v_{S1x}}{\left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right) + \frac{m_2 * (h_{S2} - h_p)^2}{\Theta_{S2}}}$$

Mit $\Delta h = h_{S2} - h_p$, $\Theta_{S2} = i_{S2}^2 * m_2$ und $v_{S1x} = v_0$
ergeben sich als Lösungen der auf den Stoßgleichungen beruhenden Vorwärtsrechnung:

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

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

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

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

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

$$\Delta v_{S2} = v_{S2x}' - v_{S2x} = \frac{P}{m_2} \quad ; \quad v_{S2x} = 0$$

Die Geschwindigkeitsänderungen verhalten sich also umgekehrt proportional zu den Massen. Man beachte, 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 Bild 4.38.

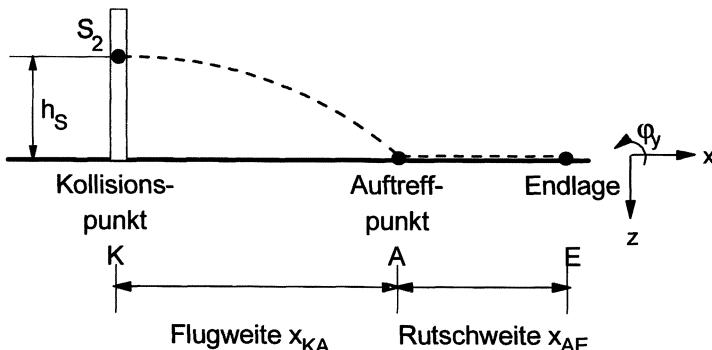


Bild 4.38 Rückrechnung der Kollisionsgeschwindigkeit aus der Flug- und Rutschweite des Fußgängers (Voraussetzung: Stoßantrieb horizontal)

Freier Flug:

$$\ddot{z}_s = g \quad \dot{z}_s = g * t \quad z_s = \frac{g * t^2}{2} - h_s$$

Aus $z_s = 0$ ergibt sich für die Flugzeit

$$t_{KA} = \sqrt{\frac{2 * h_s}{g}}$$

4 Unfallmechanik

$$\ddot{x}_S = 0 \quad \dot{x}_S = v_{S2x}' \quad x_S = v_{S2x}' * t$$

Aus $t = t_{KA}$ ergibt sich die Flugweite

$$x_{KA} = v_{S2x}' \sqrt{\frac{2 * h_S}{g}}$$

Rutschen:

$$\ddot{x}_S = -\mu * g \quad \dot{x}_S = -\mu * g * t + v_{S2x}' \quad x_S = -\frac{\mu * g * t^2}{2} + v_{S2x}' * t$$

Aus $\dot{x}_S = 0$ ergeben sich die Rutschzeit t_{AE} und die Rutschweite x_{AE} :

$$t_{AE} = \frac{v_{S2x}'}{\mu * g} \quad x_{AE} = \frac{v_{S2x}'^2}{2 * \mu * g}$$

Die Gesamtwurfweite x_{KE} folgt aus der Summe der Flugweite und der Rutschweite zu

$$x_{KE} = x_{KA} + x_{AE} \quad x_{KE} = v_{S2x}' * \sqrt{\frac{2 * h_S}{g}} + \frac{v_{S2x}'^2}{2 * \mu * g}$$

(quadratische Gleichung für v_{S2x}' , wenn x_{KE} als gegeben angesehen wird).

Geht man nun, was im Sinne der Unfallrekonstruktion realistischer ist, davon aus, 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:

$$v_{S2x}' = -\sqrt{2 * \mu^2 * g * h_S} + \sqrt{2 * \mu * g * (x_{KE} + \mu * h_S)}$$

$$v_0 = \left(\left(1 + \frac{m_2}{m_1} \right) + \left(\frac{\Delta h}{i_{S2}} \right)^2 \right) * \frac{v_{S2x}'}{(1+k)}$$

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 Blockierspurlängen 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.

4 Unfallmechanik

Die Unfalldaten sind:

Fahrzeugmasse	$m_1 = 1.087 \text{ kg}$
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 $\left(\frac{1}{\sqrt{12}} \cdot 1,74 \text{ m} \right)$	$i_{S2} \approx 0,50 \text{ m}$
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:

$$\begin{aligned} v_{S2x}' &= 14,81 \text{ m/s} \\ v_0 &= 17,60 \text{ m/s} \\ P &= 1.169,99 \text{ kg m/s} \\ \omega_{2y}' &= 10,07 \text{ 1/s} \\ v_{S1x}' &= 16,52 \text{ m/s} \\ \Delta v_{S1} &= -1,08 \text{ m/s} \\ \Delta v_{S2} &= 14,81 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Aus den Wurfweitenparabeln, siehe **Bild 3.36** oder [Kühnel 80, Burg 81], lässt sich für eine Wurfweite von 16,4 m als Bereich der möglichen Kollisionsgeschwindigkeit ablesen:

$$v_{0Wurfweite} = 12 \text{ bis } 16 \text{ m/s} \quad (v_0 \text{ aus Wurfweite})$$

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

$$v_{S1x \text{ Bremsweg}}' = 15,39 \text{ m/s} \quad (v_{S1x}' \text{ aus Bremsweg})$$

Man erkennt, 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.

4.7.6 Frontalaufprall ohne und mit Abgleiten, Einfluss auf Geschwindigkeitsänderung und Energieabsorption

In Abschnitt 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. Bild 4.39 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 Bild 4.14:

- bei $v_{Koll} = 0$ ist $k=1$ (elastischer Aufprall),
- $v_{Koll} = 0$ ist die Steigung von k gleich Null (elastischer Stoß auch bei sehr kleiner v_{Koll}),
- bei $v_{Koll} = 50 \text{ km/h}$ ist k etwa 0,1 bis 0,15 (aus Crashversuchen, siehe z.B. Bild 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 Insassenbelastung geben. Bei starkem Offset (weniger als etwa 25 %) ist zu erwarten, dass mit zunehmender Kollisionsgeschwindigkeit der Restitutionskoeffizient steiler als beim Aufprall mit voller Überdeckung abfällt, siehe Bild 4.40. Außerdem ist zu erwarten, dass in einem gewissen Geschwindigkeitsbereich der Übergang vom Nichtabgleiten zum Abgleiten stattfindet. Unter den idealisierenden Vorstellungen eines scharfen Überganges bei $v_{Koll,u}$ 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 Bild 4.40. 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 Bild 4.41 nachvollziehen. Ursache ist der quadratische Anstieg der kinetischen Energie mit der Kollisionsgeschwindigkeit.

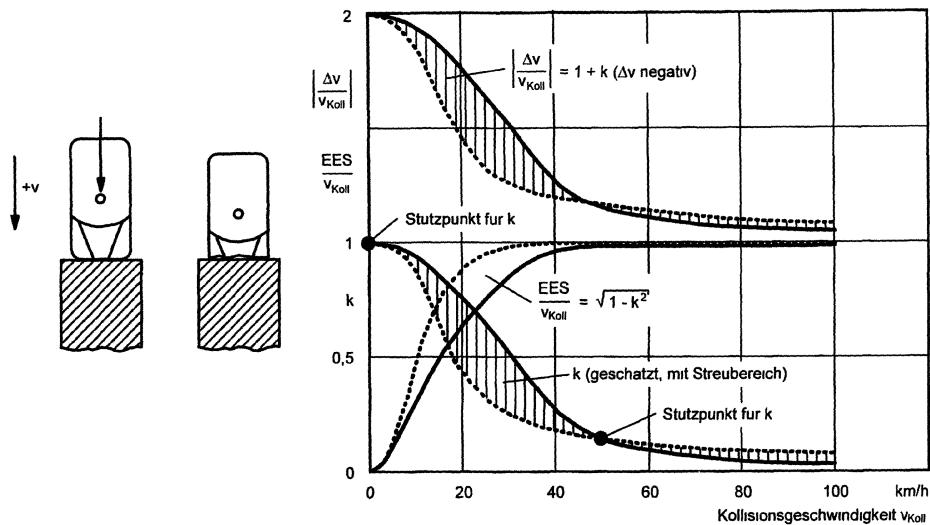


Bild 4.39 Verlauf von k , Δv und EES beim Aufprall eines Pkw auf eine OUB bei voller Überdeckung in Abhängigkeit von der Kollisionsgeschwindigkeit

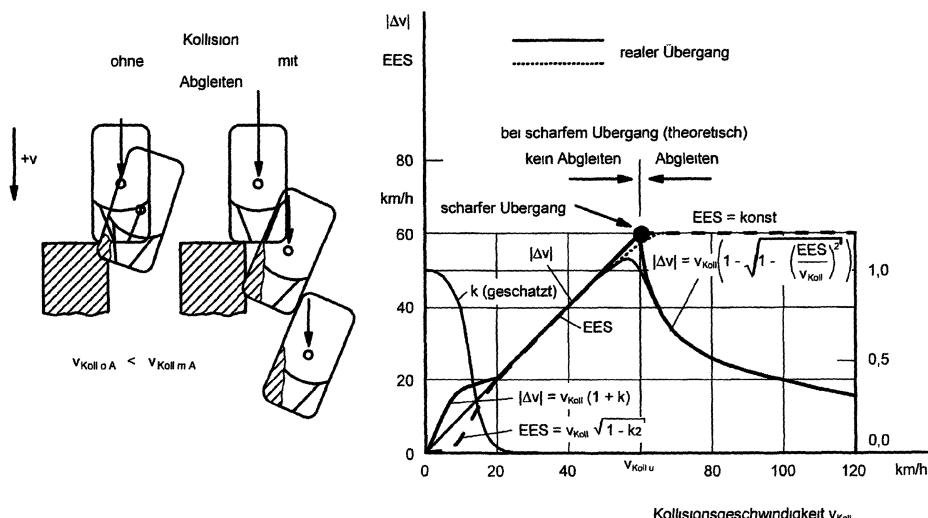


Bild 4.40 Verlauf von k , Δv und EES beim Offset-Aufprall auf eine OUB bei kleiner Überdeckung in Abhängigkeit von der Kollisionsgeschwindigkeit unter der Annahme eines scharfen und eines realen Überganges vom Nichtabgleiten zum Abgleiten. Qualitative Darstellung in Anlehnung an [Burg 80/2, 84, Berg 99]

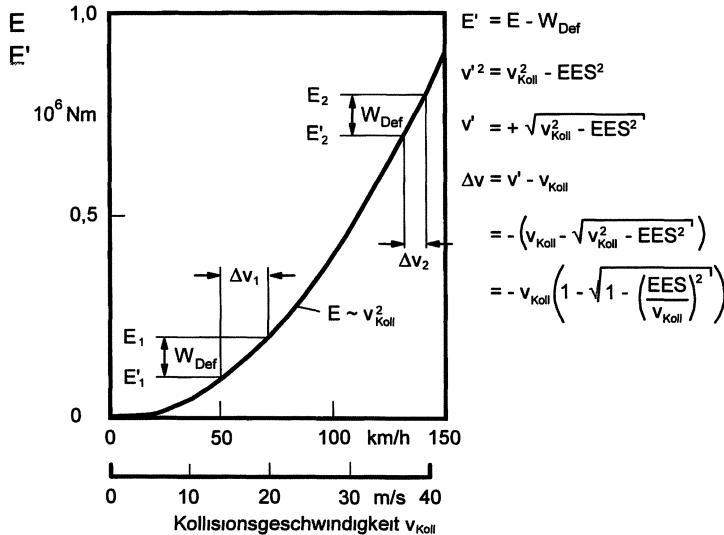


Bild 4.41 Abnehmende Geschwindigkeitsänderung Δv bei höherer Kollisionsgeschwindigkeit v_{Koll} unter der Voraussetzung gleichen Energieverlustes W_{Def} beim Offset-Aufprall auf eine OUB

4.8 FESTLEGUNG DER UNBEKANNTEN IN ERSATZSYSTEMEN

Anhand der Bilder 4.22 und 4.35 soll auf ein grundlegendes Problem hingewiesen werden, das bisher übergangen wurde [Gummert 86]. Wie legt man unbekannte Größen (hier Geschwindigkeiten und Stoßantriebe) in den Ersatzsystemen fest? 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 Bild 4.42.

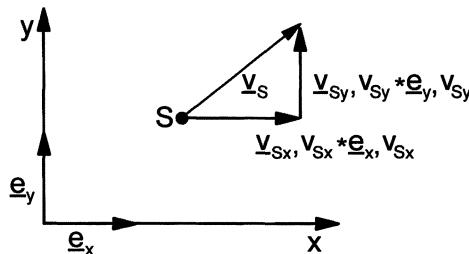


Bild 4.42 Lagekoordinaten, Einheitsvektoren, Komponenten eines (unbekannten) Geschwindigkeitsvektors

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 Koordinatensystem beibehalten werden, nur dass dann gilt:

$$v_{sx} = v_{sx}(-e_x), \quad v_{sy} = v_{sy}(-e_y)$$

und dass hier v_{sx} und v_{sy} ein entgegengesetzte Vorzeichen haben werden, um die gleichen Wirkrichtungen wie im Bild 4.42 zu erzielen

Stoßantriebe wirken auf die kollidierenden Fahrzeuge entgegengesetzt gleich, siehe z.B. Bild 4.22 und 4.35. Wie legt man hier die Richtungen und Bezeichnungen der unbekannten Stoßantriebe und ihrer Komponenten fest, nachdem ein Koordinatensystem gewählt wurde? Zunächst wird die Lage eines der beiden Stoßantriebe frei gewählt, z.B. wie in Bild 4.43 oder Bild 4.44. 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 Bild 4.43 oder 4.44 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 Bild 4.35:

$$v_{s1y} = v_{10} * (-e_y) = -v_{10} * e_y$$

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

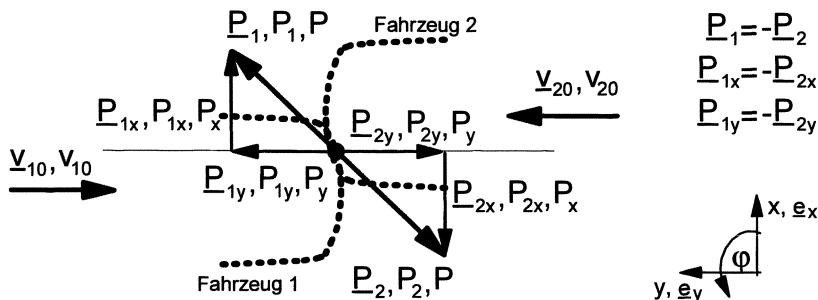


Bild 4.43 Benennungen der Stoßantriebe und ihrer Komponenten im Ersatzsystem von Bild 4.35

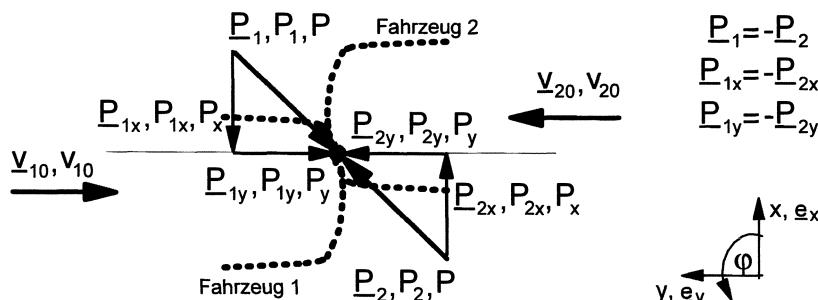


Bild 4.44 Umgekehrte Vorgaben für die Richtungen der Stoßantriebe im Vergleich zu Bild 4.35 und 4.43

5 UNFALLREKONSTRUKTION

Der Ablauf einer technischen Unfallrekonstruktion kann systemanalytisch gedeutet werden als Prozess, bei dem Eingangsgrößen auf einen Verarbeitungsprozess (Rekonstruktionsverfahren) wirken und Ausgangsgrößen erzeugen, siehe **Bild 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 **Bild 5.1**.

Die Eingangsgrößen für eine technische Unfallrekonstruktion lassen sich in unfallspezifische und grundlegende Daten unterscheiden, siehe Abschnitt 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. 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 Abschnitten 4 und 5 erläuterten Rekonstruktionsverfahren beziehen sich ausschließlich auf Pkw-Kollisionen, die gewählten Beispiele können als typische Beispiele angesehen werden [Appel 84/4].

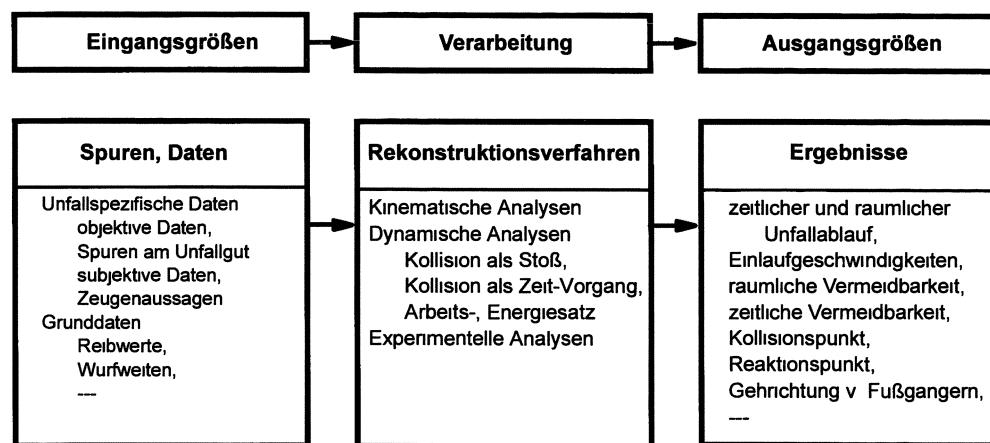


Bild 5.1 Eingangs- und Ausgangsgrößen bei der technischen Unfallrekonstruktion

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.

5 Unfallrekonstruktion

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 **Bild 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 **Bild 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, Zusatzhypothesen) oder
- Kraftgleichungen für den Zeit-Vorgang der Kollision (Schwerpunktsatz, Drallsatz, Stoffgesetze).

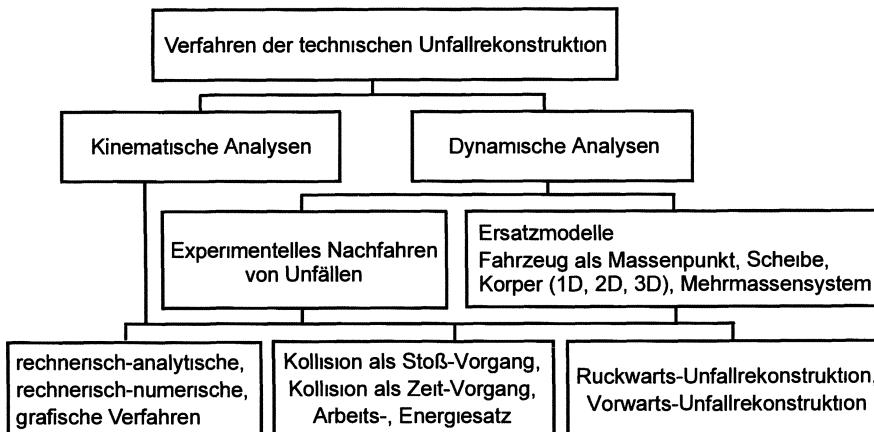


Bild 5.2 Einteilung der Rekonstruktionsverfahren

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) Gesamtmoment 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 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.

5 Unfallrekonstruktion

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 Differentialgleichungen 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 angeeigneten 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 erneuter 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 im **Bild 5.3** unter Angabe der üblichen Eingangsgrößen und im **Bild 5.4** 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 Abschnitt 5.3. Der Abschnitt 4 behandelte rechnerisch-analytische Verfahren. Der Abschnitt 5.2 wird sich auf grafische Verfahren konzentrieren.

5 Unfallrekonstruktion

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, Struktureigenschaften, 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

Bild (Tabelle) 5.3 Allgemeine Beschreibung von Unfallrekonstruktionsverfahren [Appel 94]

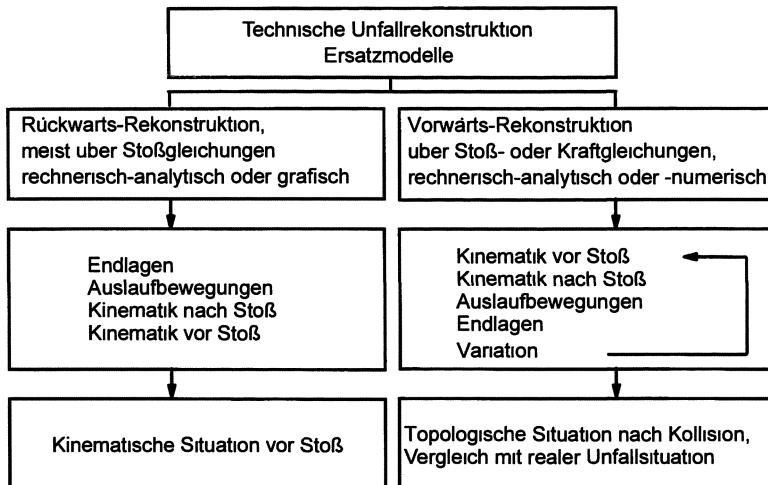


Bild 5.4 Methoden und Abläufe bei der technischen Unfallrekonstruktion

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 als **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 ev. Korrektur),
- Energiesatz (Auslaufenergien, ev. Deformationsenergien),
- Zusatzhypothesen, 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,
- 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.

5 Unfallrekonstruktion

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 [Slabar 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 im **Bild 5.5** gezeigt.

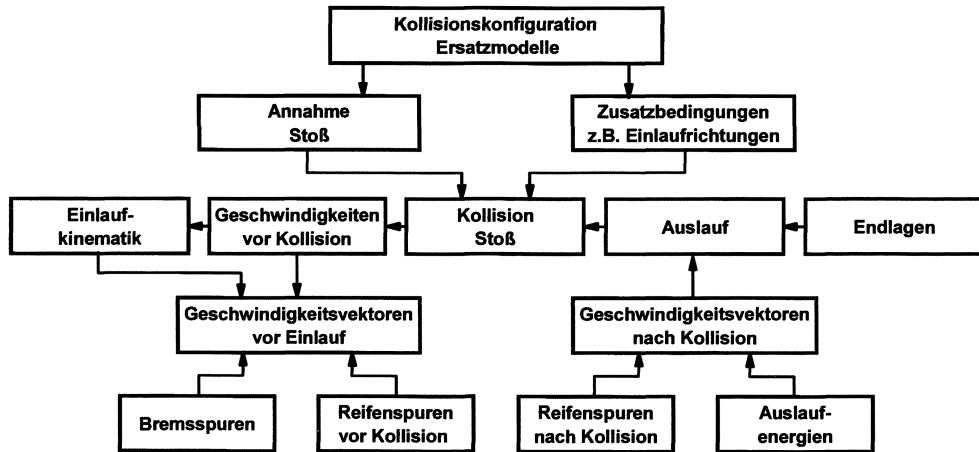


Bild 5.5 Ablauf einer rechnerischen Rückwärts-Unfallrekonstruktion (in Anlehnung an [Burg 81])

Hauptanwendungsgebiet der klassischen Rückwärts-Rekonstruktion ist die ausgeprägte Seitenkollision von Fahrzeugen. 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]

$$v_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \left[\frac{1}{m_2} (m_1 v_1' + m_2 v_2') + \sqrt{(v_1' - v_2')^2 + \frac{m_1 + m_2}{m_2} EES_1^2 + \frac{m_1 + m_2}{m_1} EES_2^2} \right]$$

$$v_2 = \frac{1}{m_2} (m_1 v_1' + m_2 v_2' - m_1 v_1)$$

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]. Im Bild 5.6 werden die Grundlagen und Einschränkung der Verfahren kurz angedeutet. Das sog. „AntriebsBalance-Verfahren“ von Slibar [Slibar 73] war und ist das gebräuchlichste Verfahren. Weitergehende Verfahren bauen hierauf auf, siehe Abschnitt 5.2.

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, Aufwand mäßig, bezieht die üblicherweise vorliegenden Spuren ein, Drehimpulssatz nur zur Kontrolle Weit verbreitetes Verfahren

Bild (Tabelle) 5.6 Auswahl älterer Verfahren der Rückwärts-Unfallrekonstruktion
[Langwieder 75]

5.1.2 Vorwärts-Unfallrekonstruktion, insbesondere Vorwärts-Kollisionsrekonstruktion

Die Vorwärtsrechnung kann grundsätzlich über Stoßgleichungen oder Kraftgleichungen erfolgen, siehe Bild 5.7. Da es sich im 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 Bild 5.7 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. Sowohl 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 weiß man weniger über den Unfallablauf, es gibt zunächst Nichts, was man als gesichert ansehen 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 Voraussetzungen für die Anwendbarkeit der Stoßgleichungen) behandelt werden, wenn es gelingt, die Berühr-tangente realistisch festzulegen [Böhm 68]. Innerhalb der Rekonstruktionsverfahren wird analytisch mit der Lösung von Gleichungen (Impulssatz, Drehimpulssatz, Zusatzhypthesen) vorgegangen. Bei Standardunfällen (siehe Abschnitt 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 Bild 5.4 und Bild 5.7. 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.

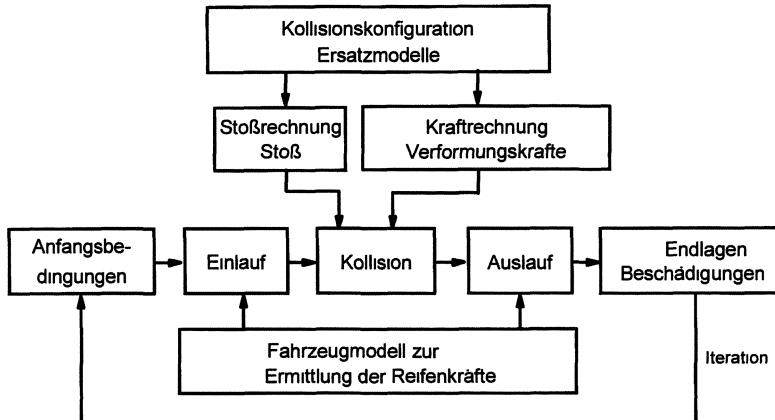


Bild 5.7 Ablauf einer rechnerischen Vorwärts-Unfallrekonstruktion (in Anlehnung an [Burg 81])

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 Abschnitt 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 Abschnitt 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 Heckauftreffversuchen 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 Crashbelastung 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

5 Unfallrekonstruktion

kann heute jede Art von Alleinunfällen und Fz-Fz-Kollisionen mit FEM-Modellen rechnerisch simuliert werden, allerdings mit sehr differenzierten Modellen (Größenordnung 100.000 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. Produktionsfälle in den USA) für Unfallrekonstruktionen verwendet werden. Dieser Zustand könnte sich bei fortschreitender Rechnertechnologie in Zukunft ändern.

Bild 5.8 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 Abschnitt 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.

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. Vorläufer für PAFU
[Burg 80/2]	Ebenes Scheibenmodell, Impulssatz, Drehimpulssatz, Energiesatz, EES	Abschätzung von EES	rechnerisch-analytisches Verfahren, Aufwand mäßig

Bild (Tabelle) 5.8 Auswahl älterer Verfahren zur Vorwärts-Unfallrekonstruktion
[Langwieder 76, Burg 81]

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 Zusatzhypothesen 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 99], 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.

Probleme für eine hinreichend genaue Unfallrekonstruktion können unter den verschiedenen 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).

5 Unfallrekonstruktion

In vielen dieser Fälle bietet der Rekonstruktionsweg über die Kraft- bzw. Bewegungsgleichungen gegenüber dem über die Stoßrechnung Vorteile bzw. wird erst dadurch möglich, 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, numerische Integration der Bewegungsgleichungen im Ein- und Auslauf darstellbar. Der hohe Aufwand bei diesem Vorgehen fällt wegen höherer Rechner- und Software-Leistungen zunehmend 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 Spurensicherung nicht in dem Maße erfolgen, wie sie im Sinne einer objektiven Unfallrekonstruktion und einer gesicherten Urteilsfindung nötig wäre.

Beispielsweise ist man bei Ausscher- und Überholvorgängen in starkem Maße von subjektiven Aussagen abhängig 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. Damit entfällt eine der wichtigsten Anknüpfungstatsachen für die technische Unfallrekonstruktion mit entsprechenden Konsequenzen für die Rechtsprechung, aber auch für die Unfallforschung und für die Verkehrssicherheit insgesamt

Anfang der 80er Jahre begannen die Firmen MBB und Kienzle mit ersten Überlegungen und Entwicklungen zum Einsatz eines Gerätes zur Dokumentation der rekonstruktionsrelevanten Parameter bei einem Verkehrsunfall, eines Unfalldatenspeichers (UDS). Als Vorbild 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 aufklärbaren 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

5 Unfallrekonstruktion

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. SiemensVDO Automotive AG (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 Fahrzeugbewegung, 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 zwanzig 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 kürzlich abgeschlossenen Flottenversuches der Berliner Polizei mit etwa 400 Streifenwagen und Zivilfahrzeugen hat dazu geführt, dass nunmehr alle neuen Wagen mit serienmäßig eingebauten UDS beschafft werden [Rau 98]. Ähnliche Erprobungen laufen derzeit auch in anderen Bundesländern bei der Polizei, der Verkehrswacht und dem Bundesgrenzschutz. Das Land Brandenburg plant ebenfalls eine generelle Ausrüstungspflicht für seine Polizeifahrzeuge. Aber auch bei Fahrzeugflotten mit Bussen, Lkw, Miet- oder Leasing-Fahrzeugen ist die verbreitete Einführung von UDS auf freiwilliger Basis in Zukunft zu erwarten [Rau 98].

5.2 GRAFISCHE REKONSTRUKTIONSVERFAHREN

Über lange Zeit war bei der Rekonstruktion von Pkw-Kollisionen das von Slabar 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 Bild 5.9 und 5.10. Insbesondere die Arbeiten aus dem Ingenieurbüro Schimmelepfennig/Becke haben zur Entwicklung der neuen 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.

Autor	Verfahren	Grundlagen	Eingangsgrößen	Anwendung
[Slibar 73]	Antriebs-Balance-Verfahren	Impulssatz, Drallsatz als Kontrolle	Auslaufimpulse nach Größe und Richtung, Einlaufrichtungen, Kollisionsort	Kreuzungs- und Einbiege-Unfälle bei überwiegender Translation
[Slibar 79] [Schimmel-pfennig 80, 91]	Drehimpulsverfahren	Drehimpulssatz	Kollisionsstellung, Stoßpunktlage, Auslauf-Drehimpuls	Kreuzungs- und Einbiege-Unfälle mit hohem Rotationsanteil
[Schimmel-pfennig 80, 91]	Impuls-Spiegel-verfahren	Impulssatz	Wie beim Antriebs-Balance-Verfahren	Wie bei Antriebs-Balance-Verfahren
[Woldrich 87] [Koob 86, 91]	Drehimpuls-Spiegel-verfahren	Drehimpulssatz	Wie beim Drehimpulsverfahren	Wie beim Drehimpulsverfahren
	Rhomboïd-Schnitt-verfahren	Impulssatz, Drehimpulssatz	Auslauf-Impulse, Auslauf-Drehimpulse, Stoßpunktlage, Kollisionsort	Kreuzungs- und Einbiegeunfälle mit Translation und Rotation
[Schimmel-pfennig 82/1, 91]	Energie-Ring-verfahren (unter Einschluss des Rhomboïd-Schnitt-verfahrens)	Impulssatz, Drehimpulssatz, Energiesatz	Wie beim Rhomboïd-Schnitt-verfahren, zusätzlich Deformationsenergie bzw. EES	Wie beim Rhomboïd-Schnitt-verfahren, zusätzliche Bedingung für Stoßantrieb nach Größe
[Schimmel-pfennig 82/2, 83]	Band-Schnitt-verfahren	Impulssatz, Energiesatz, Arbeitssatz	Kollisionsort, Auslaufarbeit, Deformationsenergie bzw. EES	eindimensionale, gerade zentrische Stöße, z.B. Heckaufprall

Bild (Tabelle) 5.9 Neuere grafische Verfahren der Unfall-Rückwärtsrekonstruktion

5 Unfallrekonstruktion

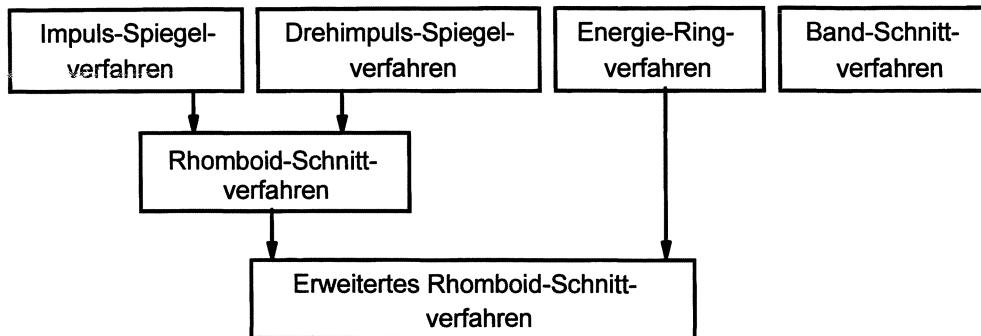


Bild 5.10 Neuere grafische Verfahren der Unfallrekonstruktion zur Bestimmung der Kollisionsgeschwindigkeiten

Die neuen 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.

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 Bild 5.11 und 5.12. 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.

Die Impulsgleichungen beider Fahrzeuge lauten für das Ersatzsystem nach Bild 5.11:

$$m_1 * (\underline{v}_1' - \underline{v}_1) = \underline{P} \quad m_1 * \underline{v}_1' = m_1 * \underline{v}_1 + \underline{P} \quad \underline{I}_1' = \underline{I}_1 + \underline{P} \quad (\underline{v}_1 \equiv \underline{v}_{s_1})$$

$$m_2 * (\underline{v}_2' - \underline{v}_2) = -\underline{P} \quad m_2 * \underline{v}_2' = m_2 * \underline{v}_2 - \underline{P} \quad \underline{I}_2' = \underline{I}_2 - \underline{P} \quad (\underline{v}_2 \equiv \underline{v}_{s_2})$$

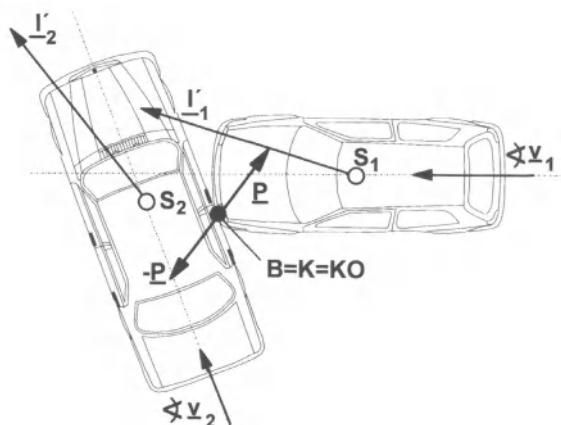


Bild 5.11 Antriebs-Balance-Verfahren: Kollisionsstellung mit angetragenen Einlaufrichtungen von v , den Stoßantrieben P , $-P$ an der Berührstelle B bzw. dem Kontaktpunkt K der Fahrzeuge, dem Kollisionsort KO auf der Straße und den Auslaufimpulsen I'

Die Konstruktion des Antriebs-Balance-Diagramms als Lösung der obigen Impulsgleichungen erfolgt in folgenden Schritten (siehe Bild 5.12)

- 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,
- 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.

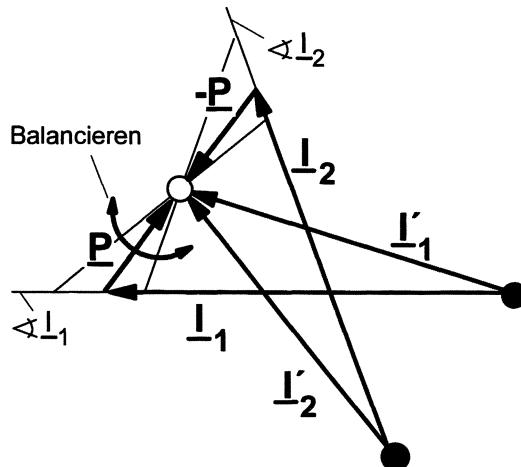


Bild 5.12 Konstruktion des Antriebs-Balance-Diagramm

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 (**Bild 5.13a**). 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 und durch die Pfeilspitzen der maximalen bzw. minimalen Auslaufimpulsvektoren gekennzeichnet sein (**Bild 5.13b**).

Für den Stoßantrieb P_1 von Fahrzeug 1 gilt:

$$I_1' - I_1 = P_1$$

Für den Stoßantrieb P_2 von Fahrzeug 2 gilt:

$$I_2' - I_2 = P_2$$

Zwischen beiden Stoßantrieben gilt folgende Beziehung:

$$P_1 = -P_2$$

5 Unfallrekonstruktion

Die Symmetrieeigenschaft des Stoßantriebes wird ausgenutzt zur Spiegelung der \underline{l}' -Endlinien an der jeweiligen Einlaufrichtung. Es entstehen zwei Lösungsfelder (schraffierte Flächen im Bild 5.13c) für die Stoßantriebe durch Schneiden der \underline{l}_1' -Endlinien mit den \underline{l}_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 angebracht 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 Bild 5.13d 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.

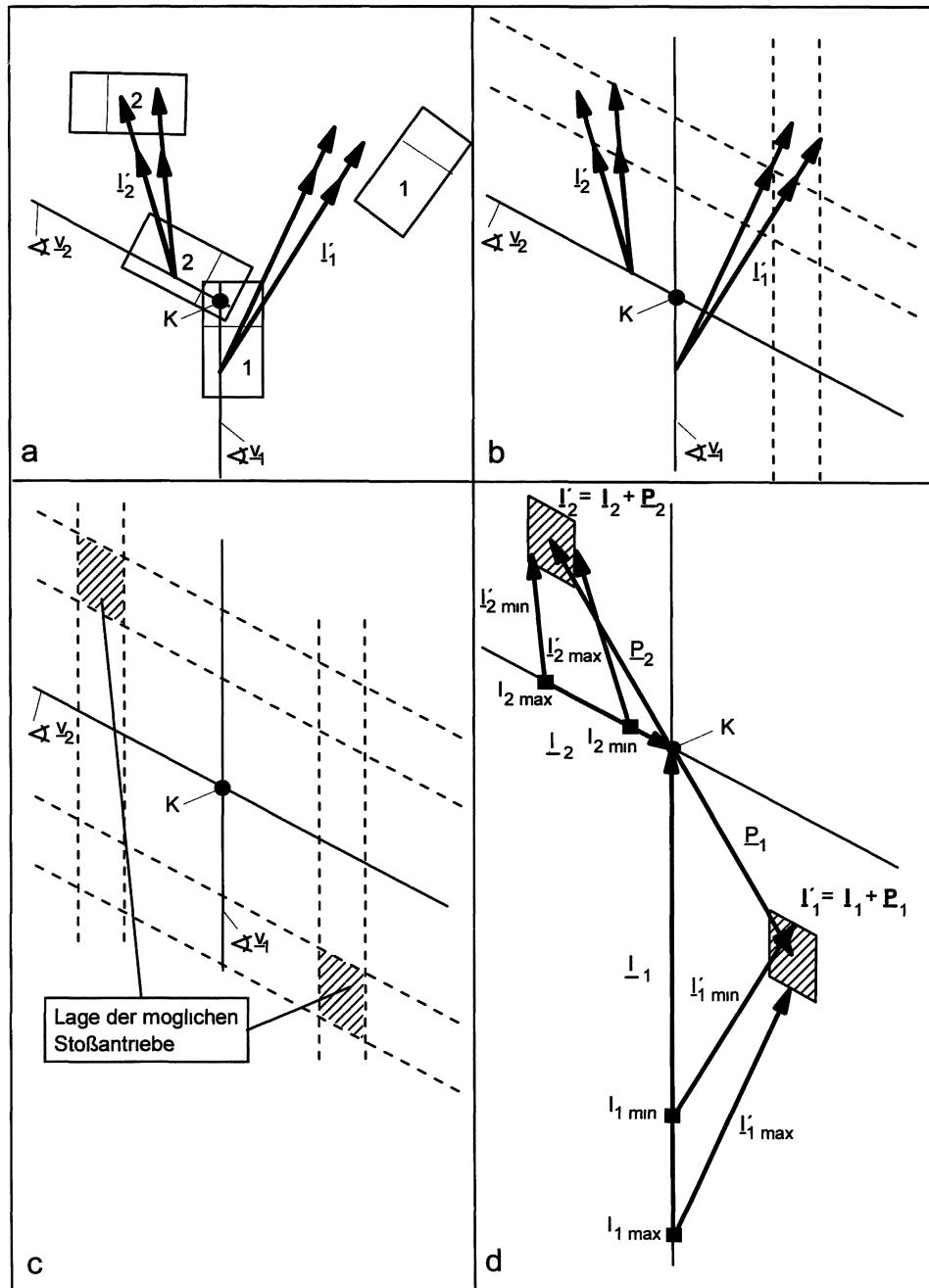


Bild 5.13 Impuls-Spiegelverfahren – Ermittlung der Auslaufimpulse (Kollisionspunkt K liegt auf Kollisionsort KO)

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 Bild 5.14)

$$P * a$$

über den Drehimpulssatz

$$\Theta_S * (\underline{\omega}' - \underline{\omega}) = \underline{a} \times \underline{P} \quad , \quad \underline{\omega} = \underline{0}$$

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:

$$E'_{rot} = A'_{rot, Reib}$$

$$E'_{rot} = \frac{1}{2} \Theta_S * \omega'^2$$

$$A'_{rot, Reib} = \frac{1}{2} m * a' * l_R * \varphi' \quad \omega' = \sqrt{\frac{m * a' * l_R * \varphi'}{\Theta_S}}$$

mit

$a' = \mu' * g$ mittlere Verzögerung des Fahrzeuges im Auslauf nach dem Stoß

l_R = Radstand

φ' = Gesamtdrehwinkel nach dem Stoß

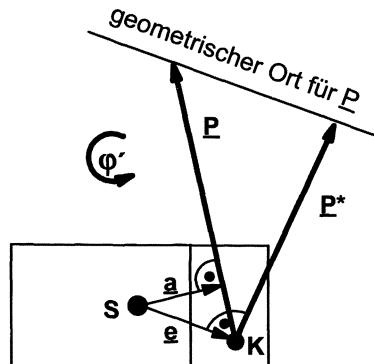


Bild 5.14 Grafische Darstellung der Drehimpulsbedingung für ein Fahrzeug ($K=B=KO$)

Zusammen mit dem Kollisionspunkt K und der Drehrichtung von φ' erhält man gemäß **Bild 5.14** als geometrischen Ort für den noch unbekannten Stoßantrieb \underline{P} die Gerade, die parallel zu $\underline{e} = \overline{SK}$ 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:

$$P^* = \frac{\theta_s * \omega'}{e} = \frac{\theta_s}{e} * \sqrt{\frac{m * a' * R * \varphi'}{\theta_s}} = \frac{1}{e} * \sqrt{m * a' * R * \varphi' * \theta_s}$$

Für einen bestimmten ω' -Wert ergibt sich also mit Kenntnis des Trägheitsmomentes ein bestimmter Wert von $P^* * e$. 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 Verbindungsgeraden 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 (**Bild 5.15a** und **5.15b**).

Mit diesen maximalen bzw. minimalen Stoßantrieben P^* beider Fahrzeuge, die senkrecht auf den Verbindungsgeraden e (Schwerpunkt/Kollisionspunkt) stehen, erhält man als geometrischen 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 Verbindungsgeraden 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 **Bild 5.15c**).

An diese Lösungsfelder werden nun, wie beim Impuls-Spiegeldiagramm, die Auslaufimpulse der einzelnen Fahrzeuge angetragen, um jeweils den maximalen bzw. minimalen Einlaufimpuls zu erhalten (**Bild 5.15d**).

Es zeigt sich also, dass bei deutlicher Rotation die Einlaufimpulse prinzipiell allein aus dem Drehimpulssatz abgeleitet werden können.

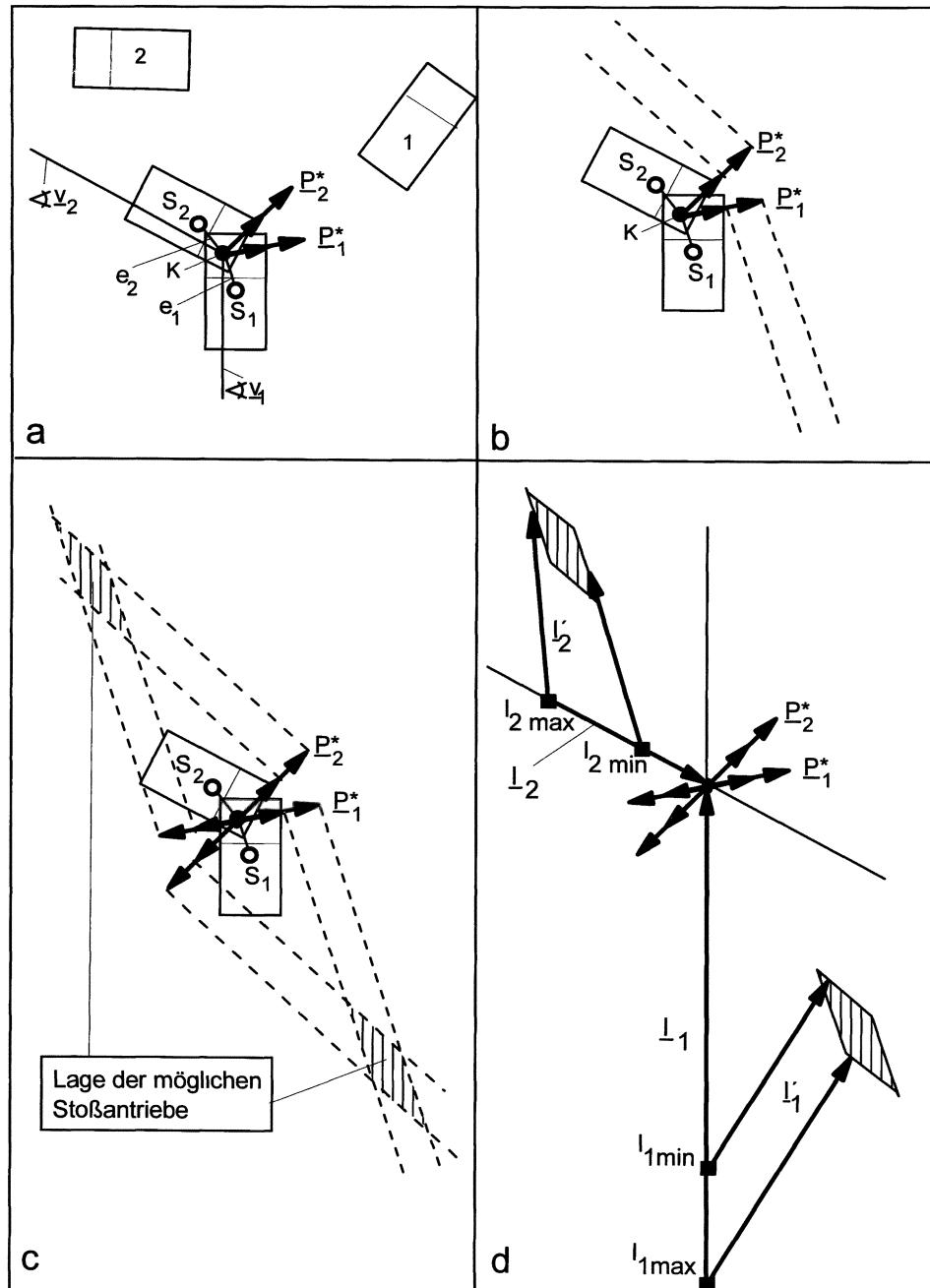


Bild 5.15 Dreihalbimpuls-Spiegelverfahren – Konstruktion der Lösungsfelder für die Stoßantriebe und die Einlaufimpulse (Kollisionspunkt K liegt auf Kollisionsort KO)

5.2.4 Energie-Ringverfahren

Das Energie-Ringverfahren liefert den Betrag des Stoßantriebes über die Deformationsenergie eines Fahrzeugs [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 Abschnitt 4.4.7)

$$P = m_{ers} * (1 + k) * v_{rel}$$

und aus dem Energiesatz (siehe Abschnitt 4.5.5)

$$W = \frac{1}{2} m_{ers} * (1 - k^2) * v_{rel}^2 ; \quad W = W_{Def} = W_{Def1} + W_{Def2}$$

Die Elimination von v_{rel} liefert den gesuchten Zusammenhang von P und W

$$P = \sqrt{2 * W * m_{ers} * \frac{1+k}{1-k}}$$

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:

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

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, schießen Stoß kann die Lösung erweitert werden, indem reduzierte Massen eingeführt werden.

$$m_1^* = \frac{m_1 * i_1^2}{i_1^2 + a^2} , \quad m_2^* = \frac{m_2 * i_2^2}{i_2^2 + a^2} , \quad m_{ers}^* = \frac{m_1^* * m_2^*}{m_1^* + m_2^*}$$

Hierbei ist a der Hebelarm des Stoßantriebes zum Schwerpunkt des Fahrzeugs 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 (**Bild 5.16**).

5 Unfallrekonstruktion

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 (**Bild 5.16d**). Anschließend werden an diese Lösungsfelder wieder die Auslaufimpulse der 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.

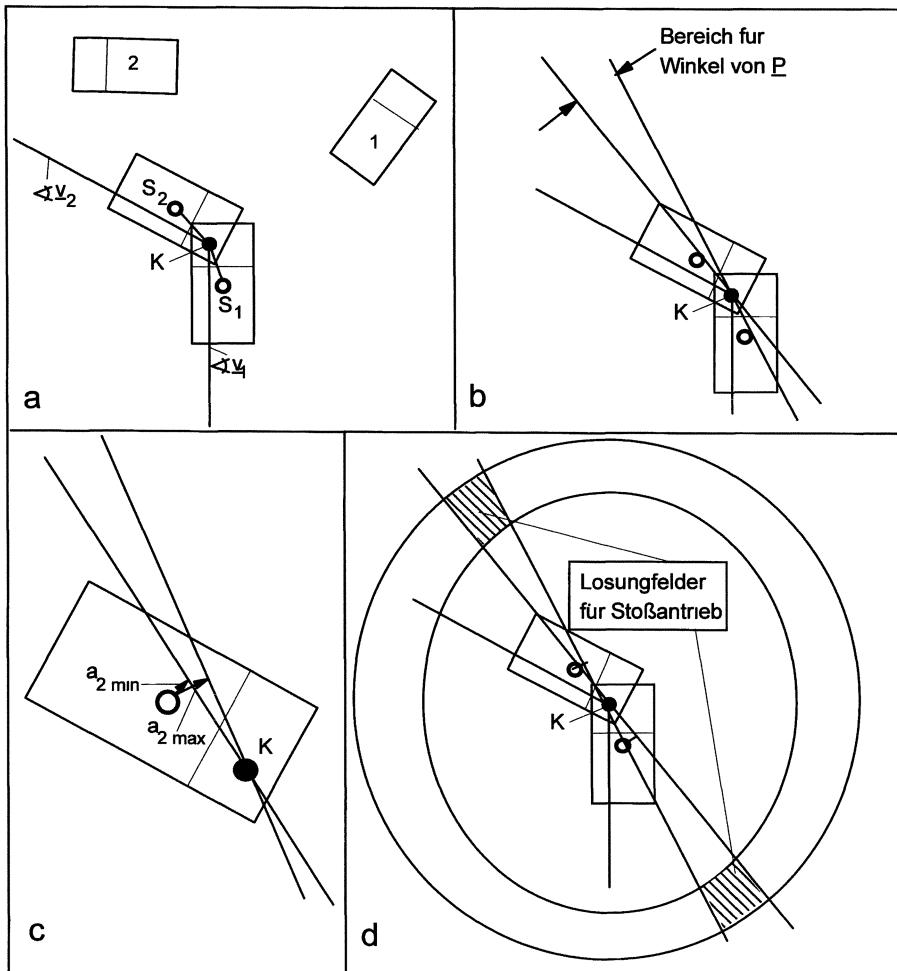


Bild 5.16 Energie-Ringverfahren – Konstruktion der Lösungsfelder (Kollisionspunkt K liegt auf Kollisionsort KO)

5.2.5 Rhomboid-Schnittverfahren

Die Überlagerung der toleranzbehafteten Lösungsfelder des Impuls-Spiegel- und des Drehimpuls-Spiegelverfahrens führt zu dem sog. „Rhomboid-Schnittverfahren“ (**Bild 5.17** und **5.18**). Mit der Überlagerung der Lösungsfelder des Rhomboid-Schnittverfahrens und des Energie-Ringverfahrens erhält man das sog. „Erweiterte Rhomboid-Schnittverfahren“ (**Bild 5.18**). Die Ermittlung der Einlaufimpulse aus der Schnittmenge der drei Lösungsfelder erfolgt analog zu den Einzelverfahren. Idealerweise erhält man 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.

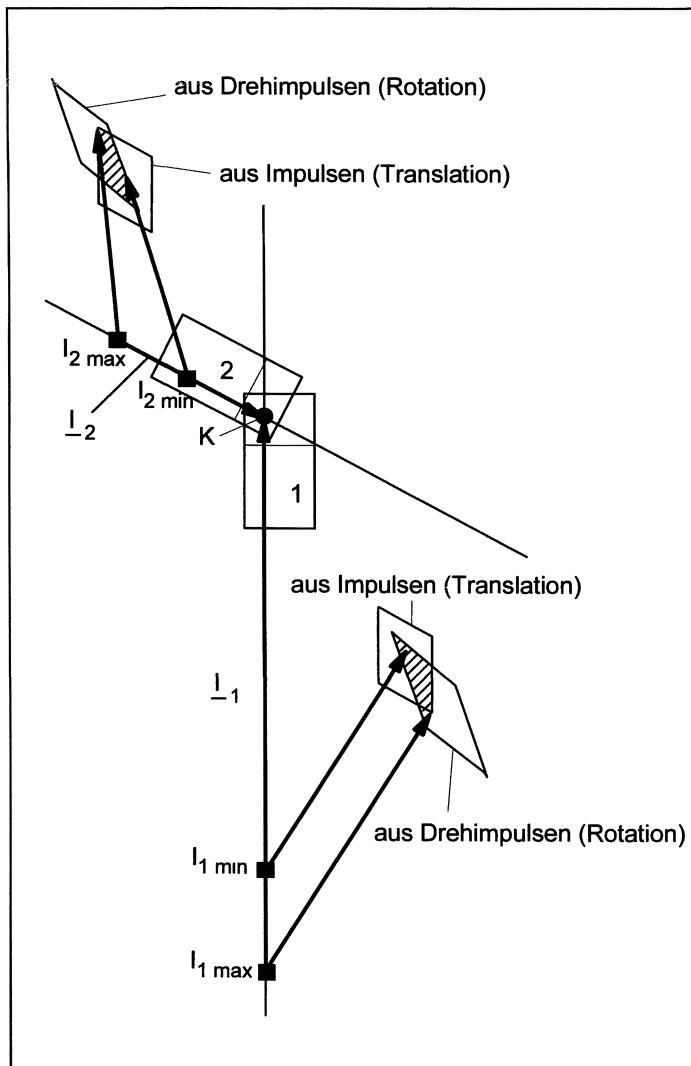


Bild 5.17 Rhomboid-Schnittverfahren: Überlagerung der Lösungsfelder des Impuls-Spiegel- und Drehimpuls-Spiegelverfahrens. Schnittfelder als geometrischer Ort für die Stoßantriebe (Kollisionspunkt K liegt auf Kollisionsort KO)

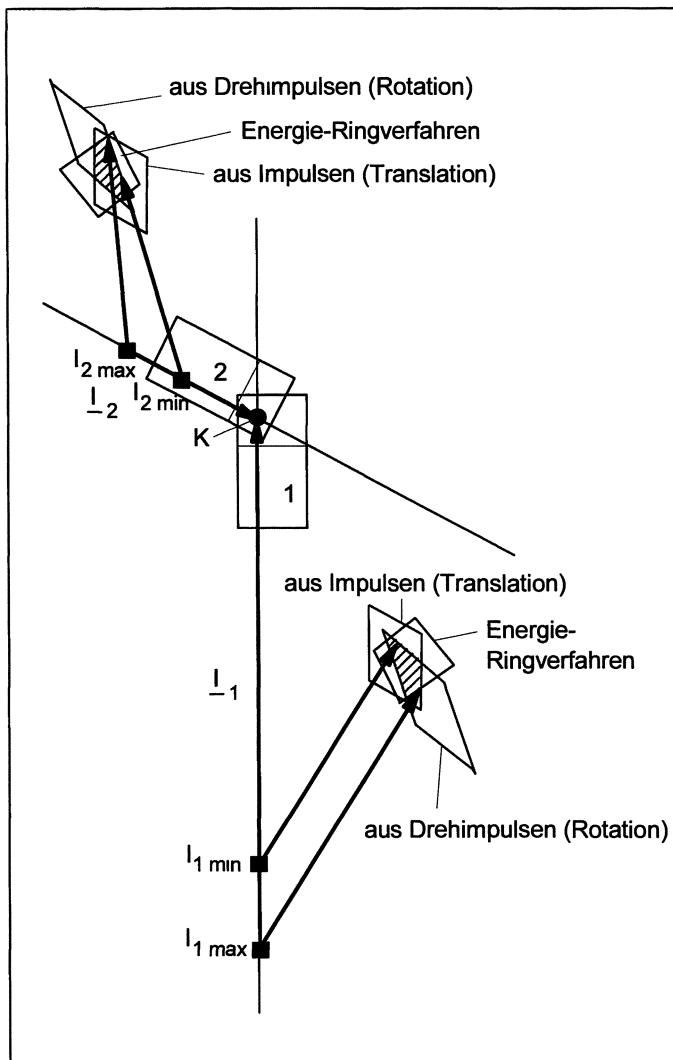


Bild 5.18 Erweitertes Rhomboid-Schnittverfahren zur Eingrenzung der Lösungsfelder ($K=B=KO$)

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]. Voraussetzung für die Anwendbarkeit ist, dass der Restitutionskoeffizient vernachlässigt werden

5 Unfallrekonstruktion

kann (vollplastischer Stoß), dass die Auslaufgeschwindigkeiten v_1' und v_2' (wegen $k=0$) bestimmt sind und dass die Gesamt-Deformationsenergie W beider Fahrzeuge aus den Beschädigungen ableitbar ist. Gemäß Bild 5.19 ergeben sich die nachfolgenden Ableitungen.

Impulssätze.

$$m_1 * (v_1' - v_1) = -P$$

$$m_2 * (v_2' - v_2) = +P$$

Impulserhaltungssatz durch Addition:

$$m_1 * v_1 + m_2 * v_2 = (m_1 + m_2) * v' \quad (k=0, \text{ d.h. } v_1' = v_2' = v')$$

Energiesatz beim Stoß:

$$W = \frac{1}{2} * \frac{m_1 * m_2}{m_1 + m_2} * (v_1 - v_2)^2 \quad (k=0) \quad W = W_{Def}$$

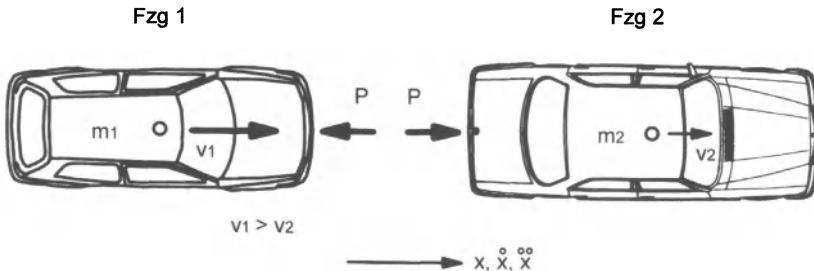


Bild 5.19 Schematische Darstellung eines Auffahrungsunfalls

Arbeitssatz beim Auslauf:

$$\frac{1}{2} * (m_1 + m_2) * v'^2 = (m_1 + m_2) * a' * s'$$

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:

$$v_1 = \frac{(m_1 + m_2)}{m_1} * v' - \frac{m_2}{m_1} * v_2 .$$

5 Unfallrekonstruktion

Diese Gleichung einer Geraden wird in das Diagramm $v_1 = f(v_2)$ eingetragen, s. **Bild 5.20**. Es ist hier angenommen worden, dass es sich um einen Auffahrurunfall handelt ($v_1 > v_2$, beide positiv). Der Schnittpunkt der Impulssatz-Geraden mit der v_1 -Achse ($v_2 = 0$) berechnet sich wie folgt:

$$v_1 = \frac{(m_1 + m_2)}{m_1} * v'$$

Die Steigung der Geraden wird durch das Massenverhältnis m_2/m_1 vorgegeben, sie ist negativ.

Aus dem Energiesatz $E_{vor} = E'_{nach} + W$ folgt für einen plastischen Stoß:

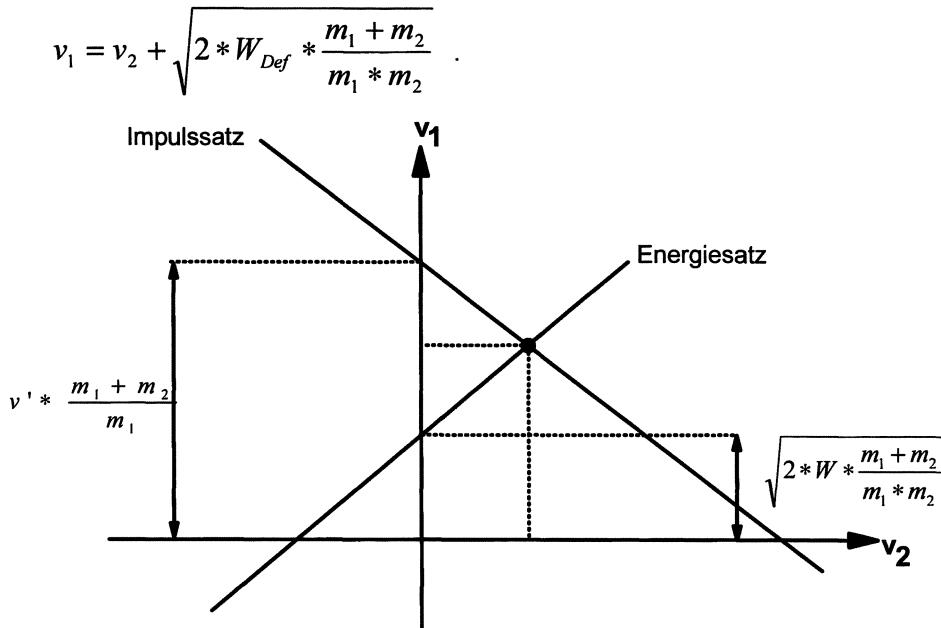


Bild 5.20 Anwendung des Band-Schnittverfahrens für eine Auffahrkollision

Diese Gerade hat stets die Steigung 1 bzw. bei gleichem Maßstab der Achsen einen Steigungswinkel von 45° . Für $v_2 = 0$ erhält man den Schnittpunkt mit der v_1 -Achse bei

$$v_1 = \sqrt{2 * W * \frac{m_1 + m_2}{m_1 * m_2}}$$

Der Schnittpunkt der beiden Geraden gibt die Lösung der unbekannten Geschwindigkeiten, siehe **Bild 5.21**. 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 Bilder 5.20 und 5.21 zeigen das Band-Schnittverfahren für das Beispiel einer Auffahrkollision, wodurch das Lösungsfeld

5 Unfallrekonstruktion

im positiven Geschwindigkeitsbereich von Fahrzeug 2 liegt. Bei einer Frontalkollision wäre v_2 nach Bild 5.19 negativ. Die Lösungen liegen in den Bildern 5.20 und 5.21 im zweiten Quadranten.

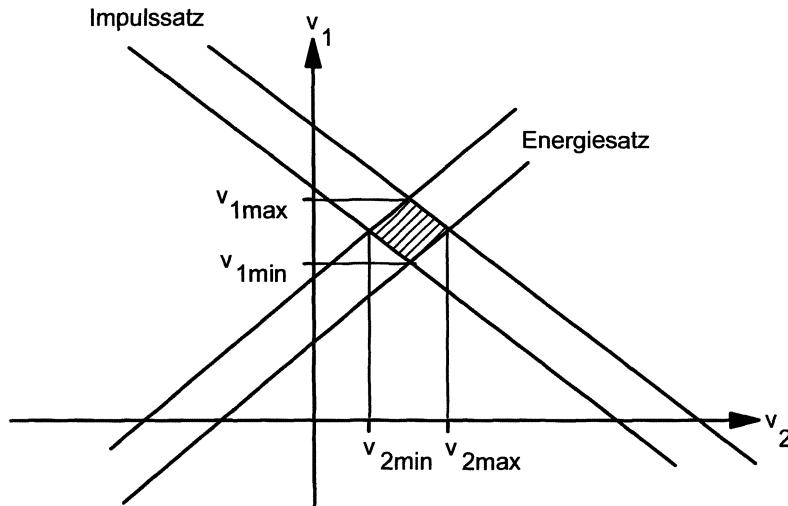


Bild 5.21 Anwendung des Band-Schnittverfahrens mit Toleranzfeldern für eine Auffahrkollision

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].

5 Unfallrekonstruktion

Die weiterentwickelte MS-WINDOWS®-Applikation von CRASH3 ist das Programmsystem EDCRASH [EDCRASH 97, Danne 99]. Gegenüber CRASH sind die wesentlichen Vorteile eine verbesserte Benutzeroberfläche 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 Vorwärtssrechnung 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 MS-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 Vorwärt- 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 Fahrzeugdynamik unter Berücksichtigung von Reifeneigenschaften, Fahrbahnzustand, Antrieb, Fahrermodell, drei oder sechs Freiheitsgrade, Mehrkörpersysteme geplant, 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-, Anhängergespann-, 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 Vorwärtssrechnung mit Stoßgleichungen für die Kollisionsphase, Abschätzung und Darstellung von möglichen Einlaufparametern, Ermittlung der Auslaufbewegungen und Endlagen, Abgleich durch iteratives Vorgehen,

5 Unfallrekonstruktion

- 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.

Zum Abschluss dieses Abschnittes sollen kurz die an der Technischen Universität Berlin entwickelten, nichtkommerziellen Programm Pakete PAFU und PREFU erläutert werden [Rau 75, Scholpp 88, Nagel 89, 91]. In dem auf der Dissertation [Rau 75] beruhenden PAFU werden die Bewegungsabläufe bei einer Fahrzeug-Fahrzeug- oder einer Fahrzeug-Hindernis-Kollision von einem Zeitpunkt vor der Kollision bis zum Stillstand der Fahrzeuge anhand von Bewegungsgleichungen auf der Grundlage der Kraftrechnung simuliert.

Zur Programmeingabe sind fahrzeugspezifische Parameter wie Masse, Massenträgheitsmoment, Karosseriemaße, Schwerpunktlage, Radstand, Spurweite, Radumfangskräfte, Kollisionsgeschwindigkeit, Drehwinkelgeschwindigkeit, Bremsverzögerung und Steifigkeiten der Karosseriestruktur erforderlich. Die Lösung der Bewegungsgleichungen erfolgt durch numerische Integration im Zeitbereich

Der Bewegungsablauf der Fahrzeuge wird während der Unfallphasen durch die Radumfangs- und Seitenführungskräfte beeinflusst; in der Kollisionsphase dominieren allerdings die Deformationskräfte. Das ebene Fahrzeugmodell wird durch die Außenhautkontur mit diskreten Punkten beschrieben. Diesen wird eine Steifigkeit zugewiesen, die zur Berechnung der Verformungskräfte dient. Für die Kollisionsberechnung werden noch Angaben über den Reibwert der Fahrbahn, die maximale Rechenzeit sowie die Integrations schrittweite benötigt. Jedes Fahrzeug besitzt ein fahrzeugfestes Koordinatensystem mit dem Ursprung im Fahrzeugschwerpunkt. Der Abstand und der Drehwinkel der fahrzeugfesten Koordinatensysteme zu einem raumfesten Koordinatensystem kennzeichnen zum Zeitpunkt t_0 die Ausgangslage der Fahrzeuge. Die Berechnung der Fahrzeuggbewegung erfolgt ausschließlich im raumfesten Koordinatensystem. Als Ergebnis der Rechenläufe erhält man die Darstellungen der Auslaufbewegungen der Fahrzeuge, wobei die

- Kontur beider Fahrzeuge,
- Schwerpunkte und
- Radaufstandspunkte

zu jedem beliebigen Zeitpunkt dargestellt und zu Ortskurven verbunden werden können. Des weiteren können für jeweils ein Fahrzeug die Weg-Zeit-, Geschwindigkeit-Zeit- und Beschleunigung-Zeit-Verläufe ermittelt werden. Nach Eingabe der Fahrzeug- und Rechenparameter, der Fahrzeugkonturpunkte sowie deren Steifigkeiten werden die Fahrzeuge für die unterschiedlichen Kollisionstypen positioniert. Das Bild 5.22 zeigt den simulierten Bewegungsablauf zweier Fahrzeuge nach einer Offset-Frontalkollision mit den Ortskurven der Schwerpunkte

Um Bewegungstrajektorien der Insassen gegenüber dem Fahrzeug bestimmen zu können, wurde in PAFU ein vereinfachtes Insassenmodell eingebunden. Es besteht aus einem Massepunkt mit einer umhüllenden Kontur in Form einer Ellipse, die als nicht verformbar

5 Unfallrekonstruktion

dargestellt wird. Das Modell führt eine translatorische Bewegung relativ zum Innenraum des Fahrzeuges aus. Das Kontaktmodell Insasse-Innenraum wird durch eine vom Relativweg und von der Geschwindigkeit des Insassen abhängige Kraft/Weg-Kennung der Kontaktstelle und des Gurtsystems sowie einer von der Relativgeschwindigkeit abhängigen Sitz- und Kontaktflächen-Reibungskraft definiert.

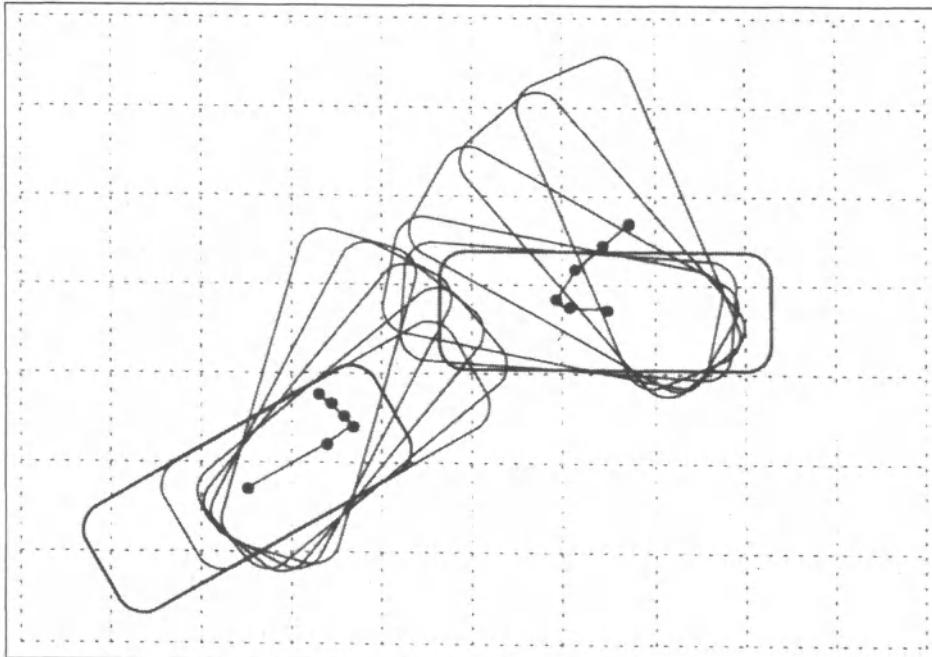


Bild 5.22 Ausgangsstellung und Bewegungsablauf zweier Fahrzeuge nach einer Frontalkollision mit einer Überdeckung von 40 Prozent (PAFU)

Die durchgeföhrten Vergleiche der Bewegungsabläufe von Dummys in Versuchen mit den Bewegungen des Insassenmodells im Simulationsprogramm haben bis ca. 200 ms eine gute Übereinstimmung gezeigt [Scholpp 88]. Somit erlauben die durchgeföhrten Rechenläufe eine Voraussage über kritische Bewegungsrichtungen sowie eine Interpretation des Gefährdungspotenzials einzelner Insassen-Bewegungsabläufe innerhalb der ersten Kontakt-Phase. Durch Vergleich von Verletzungen und Anstoßstellen des realen Unfalls mit den Aufprallvorgängen in der rechnerischen Simulation lassen sich gegebenenfalls Aussagen zur Sitzposition machen.

Bei PREFU handelt es sich um ein auf der Stoßrechnung basierendes Rückwärts-Rechenprogramm, mit dessen Hilfe aus den Informationen über die Fahrzeuge und die Unfallstelle nach einer Kollision auf die Einlaufgeschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge zurückgerechnet wird [Nagel 91]. Mit Hilfe des Programms PREFU können die im Kapitel 5.2 vorgestellten grafischen Rekonstruktionsverfahren jeweils einzeln oder gekoppelt rechnerisch gelöst werden.

Als Ergebnis der Programmabläufe erhält man die Grafik des ausgewählten Rekonstruktionsverfahrens mit der Darstellung der Lösungsfelder und einer Auflistung mit der Bandbreite der wichtigsten Daten. In einem weiteren Schritt wurden die beiden Programmsysteme PAFU und PREFU, also die Vorwärts- und die Rückwärtsrechnung, miteinander gekoppelt.

5 Unfallrekonstruktion

Durch diese Kopplung wird der iterative Prozess der Suche nach der Einlaufgeschwindigkeit durch Vergleich mit der Auslaufbewegung erheblich verkürzt. Weiterhin können eventuell unzulängliche oder fehlerhafte Annahmen bei Anwendung eines Verfahrens über die Ergebnisse des anderen ermittelt werden, beispielsweise eine Drehrichtungsumkehr nach einer Sekundärkollision.

In den folgenden **Bildern 5.23 bis 5.27** sind Berechnungsbeispiele für die Kopplung der Programme PREFU und PAFU aufgezeigt. Hierzu wurde jeweils ein Programmlauf mit PREFU unter Zugrundelegen einer geradlinigen Auslaufbewegung durchgeführt. Mit den Ergebnissen des erweiterten Rhomboid-Schnittverfahrens wird eine Übergabedatei für PAFU erstellt und PAFU gestartet.

Die **Bilder 5.23 bis 5.27** zeigen die Ergebnisgrafiken für eine Frontalkollision unter einem Kollisionswinkel von 110° zwischen den Einlaufrichtungen der beiden Fahrzeuge bei Anwendung der fünf grafischen Verfahren:

- Impuls-Spiegelverfahren (Bild 5.23),
- Drehimpuls-Spiegelverfahren (Bild 5.24),
- Energie-Ringverfahren (Bild 5.25),
- Rhomboid-Schnittverfahren (Bild 5.26) und
- erweitertes Rhomboid-Schnittverfahren (Bild 5.27).

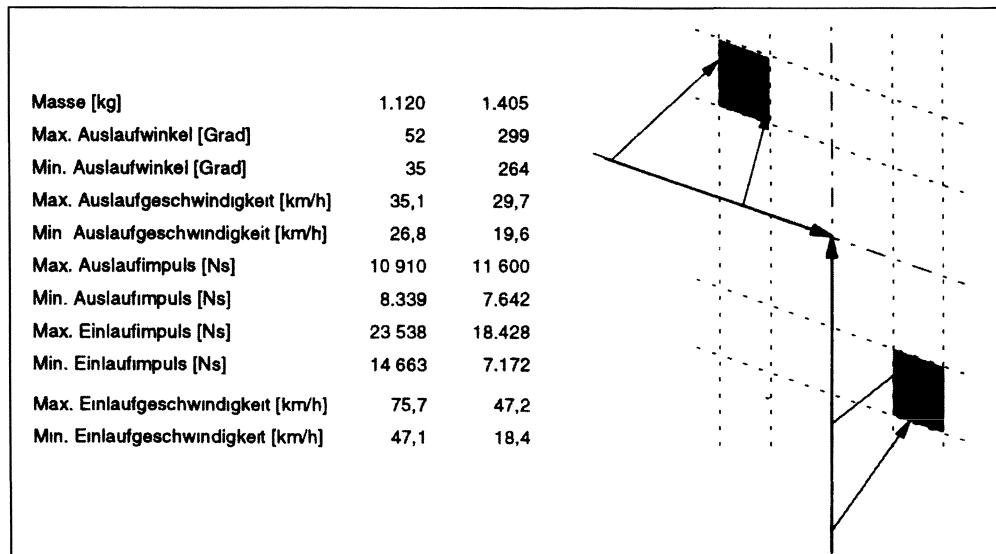


Bild 5.23 Ergebnisse des Impuls-Spiegelverfahrens (PREFU)

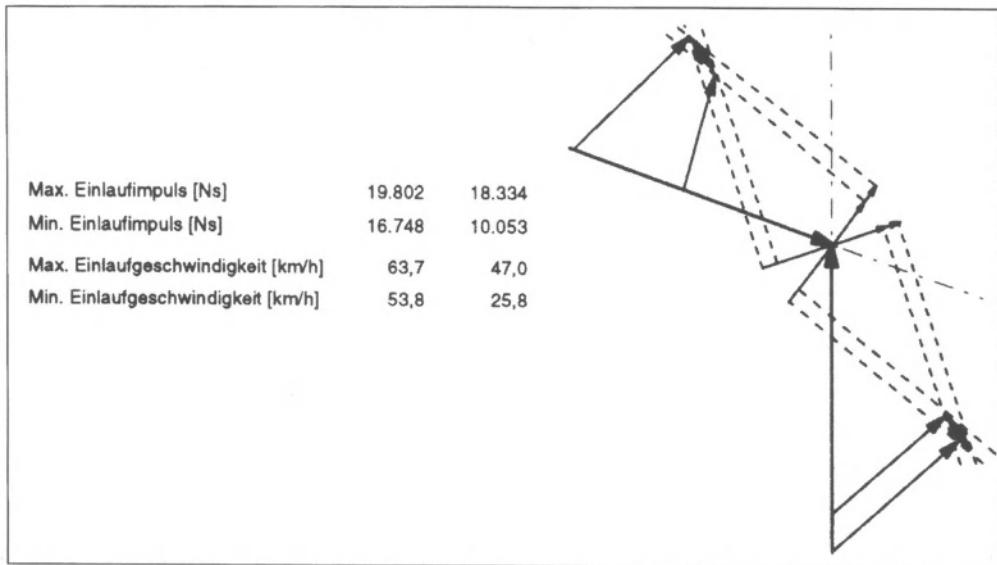


Bild 5.24 Ergebnisse des Dreihimpuls-Spiegelverfahrens (PREFU)

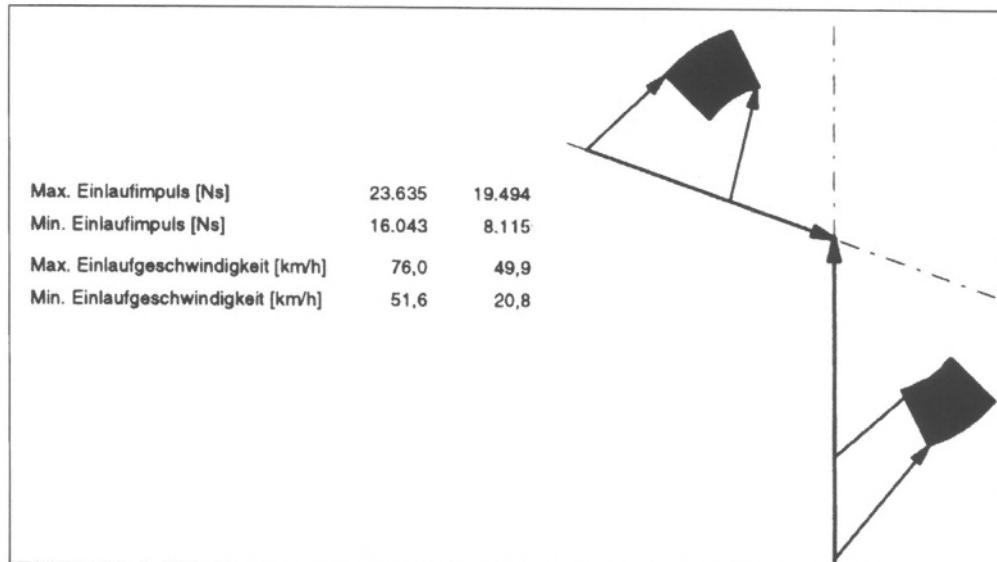


Bild 5.25 Ergebnisse des Energie-Ringverfahrens (PREFU)

5 Unfallrekonstruktion

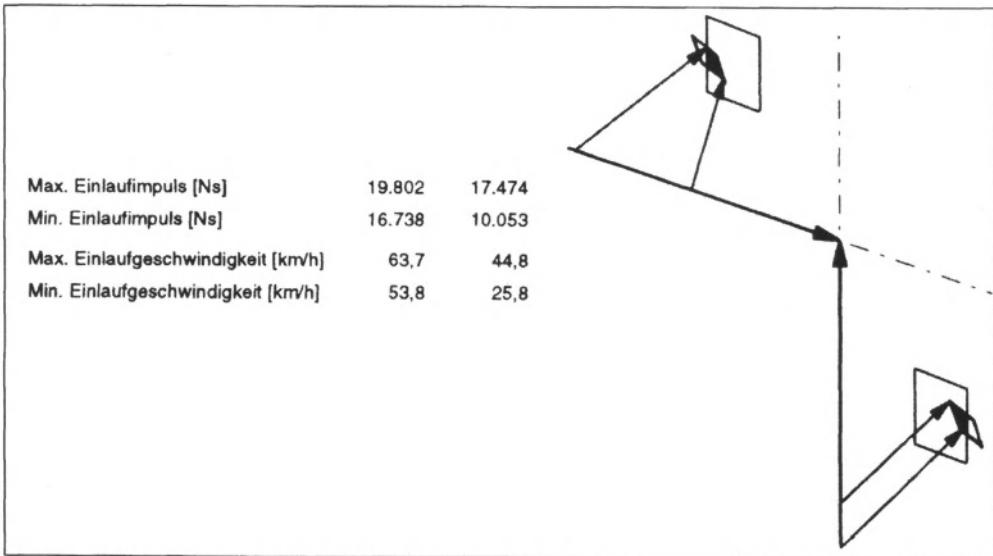


Bild 5.26 Ergebnisse des Rhomboid-Schnittverfahrens (PREFU)

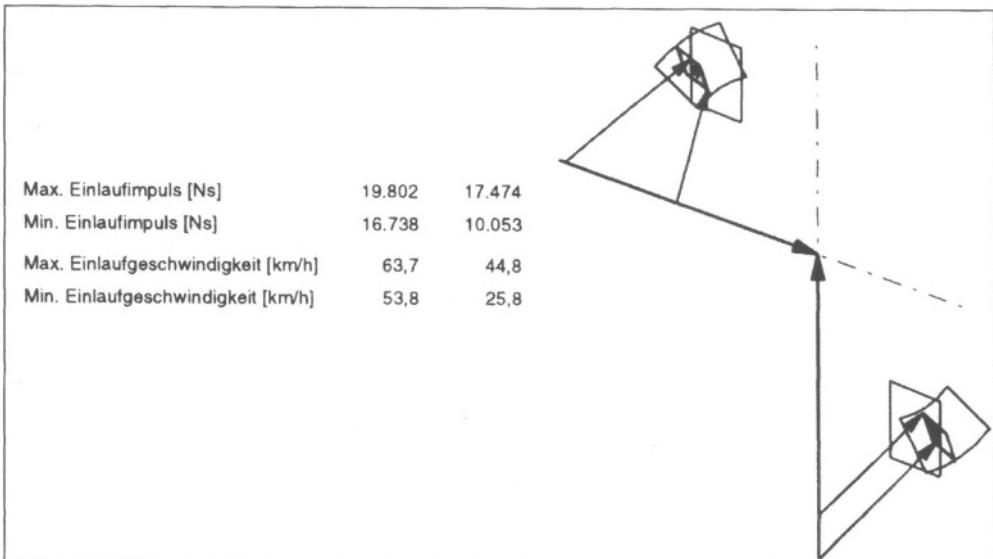


Bild 5.27 Ergebnisse des erweiterten Rhomboid-Schnittverfahrens (PREFU)

Das Bild 5.28 zeigt die Ausgangsstellung und die mit PAFU errechnete Auslaufbewegung der Fahrzeuge. Das erweiterte Rhomboid-Schnittverfahren errechnet für Fahrzeug 1 eine Einlaufgeschwindigkeit zwischen 63,7 km/h und 53,8 km/h. Für Fahrzeug 2 liegt die ermittelte Einlaufgeschwindigkeit im Bereich von 44,8 km/h bis 25,8 km/h. Bei der Darstellung der Auslaufbewegung sind jeweils zusätzlich die Schwerpunktbahnen der Fahrzeuge und ein Gitter mit Linien im Abstand von einem Meter ausgedruckt. Diese Ergebnisse dienen als

5 Unfallrekonstruktion

Grundlage für die Erstellung der Übergabedatei für PAFU, wobei die toleranzbehafteten Werte hierzu jeweils gemittelt wurden.

Die stufenweise Einengung der Lösungsfelder für die Stoßantriebe gelingt in den vorangegangenen Bildern in idealer Weise. In der Praxis werden sich oft keine „Schnittfelder“ ergeben, was zu besonderen Überlegungen Anlass gibt.

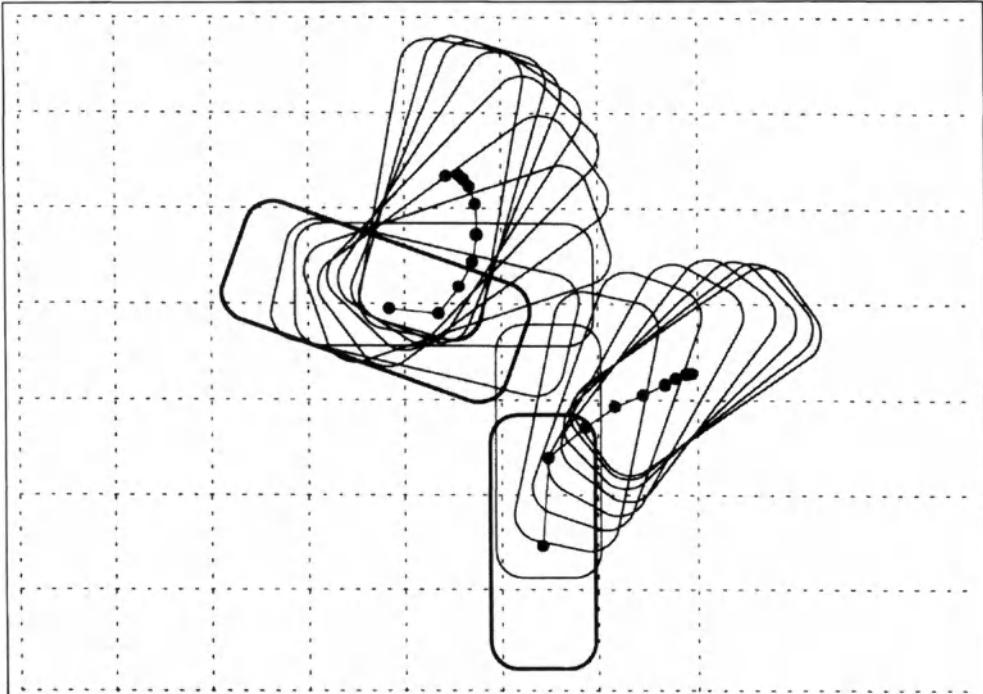


Bild 5.28 Kollision und Auslaufbewegung der Fahrzeuge bis zur Endlage
(Kopplung PREFU/PAFU)

5.4 ANMERKUNGEN UND ERGÄNZUNGEN ZU DEN VORGESTELLTEN REKONSTRUKTIONSSVERFAHREN

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 differenzierertesten Verfahren (Impuls-Spiegel- bis zum erweiterten Rhomboid-Schnittverfahren) jeweils zusätzliche Eingangsdaten. In den Bildern 5.29 und 5.30 sind diese Eingangsdaten für die einzelnen Verfahren zusammengestellt.

		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
	Kontaktpunkt	-	-	X	X	X	X
Spuren	Kollisionsort	X	X	X	X	X	X
	Einlaufrichtungen	X	X	X	X	X	X
	Einlaufgeschwindigkeiten	-	-	-	-	-	-
	Auslaufimpulse	X	X	X	X	X	X
	Auslaufdrehimpulse	-	-	X	-	X	X
Kontaktzone	Restitutionskoeff.	-	-	-	X	-	X
	W_{Def}	-	-	-	X	-	X
	EES_1, EES_2	-	-	-	X	-	X
	Richtung Stoßantrieb	-	-	-	-	-	-
	Reibziffer für Kontaktzone	-	-	-	-	-	-
	Deformationskräfte in der Kontaktzone	-	-	-	-	-	-

Bild (Tabelle) 5.29 Eingangsdaten (gegeben, gesetzt) für grafische Verfahren zur Kollisionsanalyse

	Bandschnitt	EES	Vorwärts-Stoßrechnung	Vorwärts-Kraftrechnung
Fahrzeug	Massen	X	X	X
	Trägheitsmomente	-	-	X
	Schwerpunktlagen	X	X	X
	Radstände	-	-	X
	Kontaktpunkt	-	-	X
Spuren	Kollisionsort	X	X	X
	Einlaufrichtungen	X	eine	X
	Einlaufgeschwindigkeiten	-	-	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	-	-	-

Bild (Tabelle) 5.30 Eingangsdaten (gegeben, gesetzt) für rechnerische Verfahren zur Kollisionsanalyse

Zu den in den Abschnitten 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 [Schimmelepfennig 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 [Schimmelepfennig 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 Kollisions-

5 Unfallrekonstruktion

geschwindigkeiten können ohne Kenntnis der Verzögerungswerte im Ein- und Auslauf 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 man über die Erhaltungssätze bei Kenntnis gewisser physikalischer Größen nach dem Stoß auf den physikalischen Zustand vor dem Stoß – oder aber umgekehrt – schließen kann. Ob man sich letztlich einer Vorwärts- oder Rückwärts-Rekonstruktion bedient, 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 Auffahruntfällen, 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:

$\alpha_2, m_1, m_2, v_1, v_2, \alpha_1, \alpha_2, EES_1, EES_2$ (α_i Winkel des Impulses i zu einer Bezugsrichtung)

Im Falle eines nahezu kolinearen Stoßes entfällt die Abhängigkeit von Winkeln und Winkel-differenzen, da ihr Sinus Null und ihr Cosinus Eins wird. Für diesen Fall ist im Abschnitt 5.1.1 die formelmäßige Lösung angegeben

Die Nutzung der rechnergestützten Simulationsprogramme entbindet wegen eines automatisierten Ablaufes nicht von Sachverständ 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 Angemessenheit 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 vorgetauscht werden.

Zur Untersuchung der Streubreiten von Rekonstruktionsergebnissen, die für gleiche Unfälle von verschiedenen Sachverständigen erzielt werden, wurde kürzlich 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 –

5 Unfallrekonstruktion

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 durchgeföhrten 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.

6 ABKÜRZUNGEN, BEZEICHNUNGEN, FORMELZEICHEN

6.1 ABKÜRZUNGEN

ABS	Anti-Blockiersystem (Bezeichnung der Fa. Bosch für ihre ABV)
ABV	Automatischer Blockierverhinderer
ACC	Autonomous Cruise Control (oder Adaptive Cruise Control)
ACEA	Association des Constructeurs Européens d' Automobiles
ACIR	Automotive Crash Injury Research (USA)
ADAC, adac	Allgemeiner Deutscher Automobilclub e.V.
AIS	Abbreviated Injury Scale
AMS, ams	Auto Motor Sport (Zeitschrift)
APF	Abdominal Peak Force
BASit	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMFT	Bundesministerium für Forschung und Technologie, jetzt Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
BMW	Bayrische Motorenwerke AG
BUB	bewegliche undeformierbare Barriere
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
DB	Daimler Benz AG
DC	DaimlerChrysler Corporation
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 Committee 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 (veraltet)
EUCAR	Forschungsverbund der europäischen Fahrzeughsteller
Euro NCAP	New Car Assessment Program (EU)
EVU	Europäischer Verein für Unfallforschung und Unfallanalyse e.V.
FARS	Fatality Analysis Reporting System (USA)

6 Abkürzungen, Bezeichnungen, Formelzeichen

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
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.
GES	General Estimates System (Unterprogramm von NASS, USA)
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
INRETS	Institut National De Recherche Sur Les Transports Et Leur Sécurité (Frankreich)
IR	Infrarot
IRCOBI	International Research Committee On Biomechanics
ISS	Injury Severity Score
Kfz (KFZ)	Kraftfahrzeug
KT	Kollisionstyp
LV	Leicht Verletzte
M	Momentanpol, Drehpol
MAIS	Maximum AIS = Maximaler AIS-Wert bei einem Verletzten
MB	Mercedes Benz AG (heute DaimlerChrysler Corporation)
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	Neck Injury Criterion
ODB	ortsfeste deformierbare Barriere
OOP	Out of Position
OUN	ortsfeste undeformierbare Barriere

6 Abkürzungen, Bezeichnungen, Formelzeichen

OWiG	Ordnungswidrigkeitengesetz
PAFU	Programm zur Analyse von Fahrzeugunfällen
Pkw (PKW)	Personenkraftwagen
PMTO	Post Mortal Testobject (Leiche)
PODS	Probability of Death Score
PREFU	Programm zur Rekonstruktion von Fahrzeugunfällen
PSPF	Pubic Symphysis Peak Force
RDC	Rib Deflection Criterion
S	Schwerpunkt
SAE	Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, DA, USA
SCI	Special Crash Investigations (USA), 1972 eingeführt, bildete die Grundlage für NASS. Heute spezielle Berücksichtigung neuer Technologien
SID	Side Impact Dummy
SNPRM	Supplemental Notice of Proposed Rulemaking
SPUL	Spezifische Unfall-Leistung
STAPP	Name, daher Stapp Conference
StPO	Strafprozessordnung
SV	schwer Verletzte
TNO	Netherlands Organisation for Applied Scientific Research
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)
VC	Viscous Criterion
VDA	Verband der Automobilindustrie e.V.
VDI	Vehicle Deformation Index (abgelöst durch die ähnliche CDC)
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

6.2 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
$\underline{\Theta}_0$	kgm^2	Massen-Trägheitsmatrix bezogen auf den Punkt 0
a		Index für äußere Kraft
\underline{a}	m	Abstandsvektor des Stoßantriebes
a	m/s^2	Beschleunigung (Betrag)
A	Nm	Arbeit
A, E		Anfang, Ende einer Bewegung
B		Berührungs punkt, Kontaktpunkt, 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, Kontaktpunkt, Impulsübertragungspunkt am Fahrzeug (identisch mit B)
KO		Kollisionsort auf der Straße
l	m	Länge
l_R, R	m	Radstand

6 Abkürzungen, Bezeichnungen, Formelzeichen

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, \underline{P}	kgm/s, Ns	Stoßantrieb, Stoßantriebsvektor
P^*	kgm/s, 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	Vollschwingungsdauer
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
(), ()'		vor, nach dem Stoß
(<u>_</u>)		einfache Unterstreichung für Vektor
(<u>=</u>)		doppelte Unterstreichung für Matrix, Tensor

7 LITERATUR (* Einschlägige Literaturquellen, die nicht im Text speziell angezogen wurden)

- [ACEA 98] Appel, H , Deter, T Analysis of Safety Criteria and Standards for Vehicle Crash Compatibility Technical University Berlin, Report in Order of ACEA, Brussels 1998
- [Adomeit 96] Adomeit, D Neue Methoden und neue Ziele bei der Entwicklung von Insassenschutzsystemen ATZ 97 (1995) Nr 7/8, ATZ 98 (1996) Nr 12
- [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, 2001, Heft 5, S 147-153
- [Anselm 97]* Anselm, D . Die Pkw-Karosserie Konstruktion, Deformationsverhalten, Unfallinstandsetzung. ISBN 3-8023-1706-8, 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, Institut für Zweiradsicherheit e V , Bochum, 1998, S 7-24
- [Anselm 00] Anselm, D , Langwieder, K , Gwehenberger, J Neueste Tendenzen der Unfallentwicklung von Lkw Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2000, Heft 2, S 71-80
- [Appel 73] Appel, H und Assistenten Manuskripte zu den Vorlesungen „Unfallforschung und Unfallmechanik“ und „Biomechanik und Kraftfahrzeugsicherheit“, Technische Universität Berlin, 1973 bis 1999
- [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 77/2]* Appel, H , Wanderer, U , Blodorn, J Unfallforschung Westeuropäische Forschungsprogramme und ihre Ergebnisse Eine Übersicht Schriftenreihe FAT, Heft 14, Frankfurt, 1977
- [Appel 83]* Appel, H , Kramer, F , Heger, A , Otte, D Bewertung der äußeren Sicherheit von Kraftfahrzeugen – Möglichkeiten und Grenzen In Bewertungsverfahren für die Sicherheit von Personenwagen Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1983
- [Appel 84/1] Appel, H Unfallaufklärung aus technischer Sicht In Verkehrsmedizin Hrsg Wagner, H -J , Springer Verlag, Berlin, 1984, S 423-434
- [Appel 84/2]* Appel, H Rekonstruktionsverfahren des Technischen Sachverständigen – Ein Überblick 26 AFO/GUVU-Seminar, Köln, 1984
- [Appel 84/3] Appel, H u a Mechanik und Biomechanik des Unfalls In Verkehrsmedizin Hrsg Wagner, H -J , Springer Verlag, Berlin, 1984, S 438-466
- [Appel 84/4] Appel, H , Wanderer, U , Otte, D , Suren, E G Folgerungen aus einer Systembetrachtung der Unfallanalyse Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1984, Heft 3, S 67-72
- [Appel 86]* Appel, H , Otte, D , Wanderer, U Unfallforschung in der Bundesrepublik Deutschland und ihre nutzbaren Ergebnisse In Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr, Heft 56, BAST, 1986
- [Appel 94] Appel, H , Krabbel, G Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion Verlag Information Ambs GmbH, Kuppenheim, 1994, ISBN 3-88550-028-0, 1 Auflage
- [Appel 98] Appel, H , Krabbel, G Grundsätzliches über die Ruckhaltung von Insassen im Pkw Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1998, Heft 1, S 9-14
- [Appel 99] Appel, H , Deter, Th Kollisions-Kompatibilität bei Personenkraftwagen erreichen, aber wie? VDI Berichte Nr 1471, 1999, S 3-42
- [Appel 00] Appel, H , Deter, Th Crash Compatibility of Passenger Cars Achievable, But How? International Conference on Vehicle Safety 2000 IMECE Conference Transactions 2000-2, IMECE HQ, London, UK, ISSN 1356-1448, ISBN 1 86058 271 0, pp 55-68
- [AAAM 90] Association for the Advancement of Automotive Medicine The Abbreviated Injury Scale – 1990 Revision 1990, Des Plaines, IL (USA)

7 Literatur

- [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, 1974, 14, S 187-196
- [BASf 86]* Straßenverkehrsunfallstatistik Fachdienst Straßenverkehrsorschung, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach, 1986
- [Baumler 89]* Baumler, H , Ungerer, H Die Anwendungsmöglichkeiten von Energierastern für den Bug von Personenkraftwagen in der Unfallrekonstruktion Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1989, Heft 9, S 245-248, Heft 10, S 277-282
- [Baumler 95]* Baumler, H Energetische Betrachtungen zur Rekonstruktion von Straßenverkehrsunfällen Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1995, Heft 1, S 5-8, Heft 4, S 101-106
- [Beermann 91]* Beermann, H J Auslaufwege und Stoßendgeschwindigkeiten bei Pkw-Pkw-Einfachkollisionen Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1991, Heft 9, S 236-240
- [Beermann 93]* Beermann, H J Auswirkungen unsicherer Bedingungen bei Rekonstruktionen von Pkw-Begegnungskollisionen Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1993, Heft 1, S 2-10
- [Berg 98/1]* Berg, F A , Burkle, H , Schmidts, F Analyse der passiven Kraftadsicherheit mit Unfallanalysen und Crashtests No 8 Proceedings of the 1998 International Motorcycle Conference, Institut für Zweiradsicherheit e V , Bochum, 1998, S 25-64
- [Berg 98/2] Berg, F A , Walz, F , Muser, M , Burkle, H , Epple, J Implications of Velocity Change Δv and Energy equivalent Speed EES for Injury Mechanism Assessment in Various Collision Configurations Proceedings IRCOBI Conference, pp 57-72 Goteborg 1998, IRCOBI Secretariat Bron, France
- [Berg 99] Berg, F A , Walz, F , Muser, M , Burkle, H , Epple, J Kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung Δv und Energy Equivalent Speed EES zur Beschreibung der Technischen Unfallschwere in verschiedenen Kollisionskonfigurationen Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1999, Heft 10, S 265-272, Heft 11, S 284-288
- [BMFT 76] BMFT (Hrsg) Technologien für die Sicherheit im Straßenverkehr Verlag TUV Rheinland GmbH, Köln 1976, ISBN 3-524-10015-5
- [Bohm 68] Bohm, F , Horz, E Der nichtzentrale Stoß von zwei luftbereiften Fahrzeugen, 1968, ATZ 70, Teil 1, S 385-389, Teil 2, S 428-432
- [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), Berlin 2000, S 393-406
- [Bruderlin 41] Bruderlin, A Die Mechanik des Verkehrsunfalls bei Kraftfahrzeugen 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, 1980, Heft 4, S 75-78
- [Burg 81] Burg, H , Rau, H Handbuch der Verkehrsunfall-Rekonstruktion ISBN 3 88550020 5, Verlag Information Ambs GmbH, Kippenheim, 1981
- [Burg 82]* Burg, H , Lindemann, M Unfallversuche Pkw-Pkw Kollisionen, Grundlagenuntersuchung ISBN 3-88550-021-3, Verlag Information Ambs GmbH, Kippenheim, 1982
- [Burg 84] Burg, H Rechnerunterstützte Rekonstruktion von PKW/PKW-Unfällen Dissertation, TU Berlin, 1984
- [Burg 99/1] Burg, H Zum Unterschied zwischen Ruckwärts- 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, Heft 4, S 115-120
Auch in Handbuch CARAT Version 3, Grundlehrgang/Seminarunterlagen des IBB, 1999

7 Literatur

- [Burkart 80]* Burkart, F , Eberhardt, W., Hirbent, G , Hor, E , Lohle, U Rekonstruktion von Verkehrsunfällen DAT Stuttgart, 1980
- [Campbell 74] Campbell, K L Energy Basis for Collision Severity Proceeding 3rd International Conference on Occupant Protection Troy, Michigan, 1974
- [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, 1971, 215, S 277-280
- [Danne 99] Danne, A Vergleich und Bewertung von computergestützten Verfahren zur Rekonstruktion von Fahrzeugkollisionen Diplomarbeit Nr 7/99, TU Berlin, 1999
- [Danner 77]* Danner, M Methode und Ergebnisbereiche der retrospektiven Untersuchung von realen Unfällen in der Unfallforschung der deutschen Autoversicherer In Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr, Heft 14, BAST, 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 EUROTAX (International) AG, Pfaffikorn, Schweiz, 1994, 2 Auflage
- [Decker 90] Decker, J , Grösch, L , Justen, R , Schwede, W Realitätsnahe frontale Crash-Versuche und daraus abgeleitete Schutzmaßnahmen in Mercedes-Benz Fahrzeugen ATZ 92 (1990), Heft 11 S 616-625, Heft 12 S 728-733
- [Deppe 91]* Deppe, W Der Einfluß der Kontakt punkt lage beim Drall-Spiegelverfahren – das kontakt punkt varierte Drallfeld Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1991, Heft 3, S 71-72
- [DIN 92] FAKRA-Handbuch, Normen für den Kraftfahrzeugbau Hrsg DIN, VDA Beuth Verlag GmbH 1994, ISBN 3-410-41011-2
DIN 75204 Verkehrsunfallrekonstruktion und Verletzungsmechanik
Teil 1 Begriffe der Unfallrekonstruktion
Teil 2 Begriffe zu Spuren und Spurenmerkmalen
Teil 3 Merkmale der Datenerhebung
- [Dubbel 97] Dubbel Taschenbuch für Ingenieure Hrsg. W Bertz und K -H Grote, 19 Auf , Springer, 1997
- [Eberan 62] Eberan von Eberhorst, R Über die Mechanik des Kraftfahrzeug-Verkehrsunfalls Österreichische Ingenieur-Zeitschrift, Jahrg 5, 1962, S 160 ff
- [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
- [Eggers 91]* Eggers, R , Compes, P C Risikology of Motorcycle Riding Strategic Aspects of Risk Analysis and Risk Control No 7 Proceedings of the 1991 International Motorcycle Conference, Institut für Zweiradsicherheit e V , Bochum, 1991, S 427-446
- [ESV 98] 16th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Proceedings 1998 National Highway Safety Administration, Washington D C , USA
- [EUCAR 99] Midterm (18 Monthly) Report, BRITE EURAM BE97-4049, 1999
- [EVU 92]* Vorstellung PC-CRASH 1992, EVU-Zeitschrift, Heft 8
- [Faerber 76] Faerber, E , Gulich, H -A , Heger, A , Ruter, G Biomechanische Belastungsgrenzen, Literaturstudie über die Belastbarkeit des Menschen beim Aufprall Bundesanstalt für Straßenwesen, Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr, Heft 3, Köln 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]* Fußgangersicherheit – Ergebnisse eines Symposiums über konstruktive Maßnahmen am Auto Schriftenreihe der FAT, 1984, Heft Nr 42, Frankfurt
- [Fechner 83] Fechner, H Ermittlung volkswirtschaftlicher Kosten von Verletzungsfolgen aus Straßenverkehrsunfällen Diplomarbeit, TU Berlin, 1983
- [Friedewald 01]* Friedewald, KI Realbezogene Fahrzeugsicherheit Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2001, Heft 4, S 115-123

7 Literatur

- [Friedrich 01] Friedrich, H , Hoffmann, J , Kreft, J , Semmler, C , Witte, B Auf dem Weg zum intelligenten Auto – Steer-by-Wire als Basis zukünftiger Assistenzfunktionen VDI-Berichte Nr 1613, 2001, S 277-296
- [Fucik 98]* Fucik, R (Hrsg) u a Unfallaufklärung und Fahrzeugschaden, Handbuch des Verkehrsunfalls Verlag Information Ambs GmbH, Kippenheim, 1998, ISBN 3-214-12894-9
- [Furbeth 00]* Furbeth, 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), Berlin 2000, S 295-304
- [Gnadler 86] Gnadler, R , Schmidt, A , Habich, K CARAT Ein Programmsystem zur rechnerunterstützten Unfallrekonstruktion dargestellt am Beispiel einer Kollisionsanalyse Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1986, Heft 5, S 121-129
- [Gogler 68] Gogler, E Chirurgie der Verkehrsmedizin Klinik, Mechanik und Biomechanik des Unfalls In [Wagner 68], 1968, S 417-512
- [Gratzer 00] Gratzer, W Bedeutung der Struktursteifigkeiten und EES-Werte, Kontrollparameter bei der Kollisionsanalyse Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2000, Heft 2, S 49-59
- [Gronau 97] Gronau, F EDV-Programme, Unfallrekonstruktion in der Praxis, Programm Analyser Pro Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1997, Heft 2, S 39-42
- [Gronau 98] Gronau, F PC-Crash – Ein Unfall-Rekonstruktionsprogramm Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1998, Heft 4, S 99-102
- [GTU 01]* GTU-Schriftenreihe Technische Analyse von Verkehrsunfällen anhand von Beispielen, Band 1 Verlag Information Ambs GmbH, Kippenheim, 2001, ISBN 3-9807206-0-8
- [Gummert 86] Gummert, P , Reckling, K -A Mechanik Verlag Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden 1986, ISBN 3-528-08904-0
- [Hagen 65]* Hagen, H Stoßvorgänge bei Verkehrsunfällen von Personenwagen, untersucht an Modell-fahrzeugen Dissertation, TU München, 1965
- [Harris 91] Harris, J Proposals for Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection for Cars EEVC Working Group 10 Report on Pedestrian Protection 13th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicle (ESV), Paris, 1991
- [Hautzinger 85]* Hautzinger, H u a Genauigkeit der amtlichen Straßenverkehrsunfallstatistik BASt Forschungsprojekt 8003, Bergisch-Gladbach, 1985
- [Heger 82] Heger, A , Appel, H Korrelationsmöglichkeiten von Unfallgeschehen und Versuch am Beispiel des Fußgangerunfalls In Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Verkehrsmedizin, 1982, Bundesanstalt für Straßenwesen, Köln
- [Helms 71] Helms, E Ökonomische Grundlagen zur Erfassung der Unfallkosten im Straßenverkehr Dissertation, Universität Bonn, 1971
- [Hochschularbeitsgemeinschaft 83]* Hochschularbeitsgemeinschaft IKA Aachen, IFT Berlin, FKFS Stuttgart, FZD Darmstadt Schlußbericht zum UNI-CAR für das BMFT, 1983
- [Hugemann 92]* Hugemann, W Die eindimensionale Kollision als dreidimensionale Abbildung Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1992, Heft 4, S 103-107 und S 135-137
- [HUK 94] HUK Verband Fahrzeugsicherheit 90 Analyse von Pkw-Unfällen, Grundlagen für künftige Forschungsarbeiten Hrsg Büro für Kfz-Technik des HUK-Verbandes, München, 1994
- [IRCOBI 98] Proceedings 1998 International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impact Göteborg, Sweden IRCOBI Secretariat Bron, France
- [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
- [Jager 77] Jager, W , Lindenlaub, K -H Nutzen/Kosten-Untersuchungen von Verkehrssicherheitsmaßnahmen FAT-Schriftenreihe Nr 5, Frankfurt/Main, 1977

7 Literatur

- [Jankovic 96]* Jankovic, A , Simic, D Bezbednost Automobila (Kraftfahrzeug-Sicherheit) Verlag SKVER – Kragujevac, 1996, ISBN 86-82095-09-02
- [Kaithoff 00] Kaithoff, W , Schimmelpfennig, K -H Verzögerungs-Substitutions-Methode (VSM) Eine Methode zur Bestimmung der Kollisionsgeschwindigkeit bei Frontalkollisionen Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2000, Heft 4, S 111-114
- [Kandler 01]* Kandler, M , Frost, U , Bach, E , Langwieder, Kl , Gwehenberger, J Heckunterfahrschutz kontra Unfallfolgen Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2001, Heft 4, S 105-108
- [Kast 98] Kast, A Der Unfalldatenspeicher (UDS) – Technik und Funktion Ein Hilfsmittel der Unfallrekonstruktion In UDS-Fachtagung, Berlin 1998, Kurzberichte Hrsg Rau, H , 1998
- [Klebelberg 82] Klebelberg, D Verkehrspychologie Springer Berlin, 1982
- [KOB 82] Lenz, K -H u a Joint Biomechanical Research Project KOB (Forschungsverbund Biomechanik) Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung, Schriftenreihe Unfall-und Sicherheitsforschung, Heft 34, Köln, 1982, ISSN 0341-5732
- [Kocherscheidt 91]* Kocherscheidt, H Methoden, Ziele und Ergebnisse der BMW-Unfallforschung Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1991, Heft 12, S 343-347
- [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, 1991, Heft 3, S 64-68 und Heft 5, S 139-142
- [Krabbel 98]* Krabbel, G Ein rechnerisches Schädel-Hirn-Modell zur Untersuchung dynamischer Belastungen des Kopfes Dissertation, TU Berlin, 1998
- [Kramer 82] Kramer, F , Wanderer, U Die Abgrenzung von Unfallschwere und Unfallfolgenschwere bei Straßenverkehrsunfällen Automobil-Industrie, 1982, Heft 1, S 49-55
- [Kramer 88]* Kramer, F Analyse des Unfallgeschehens zur Ermittlung der Unfallkenngroße für Frontalkollisionen und der Verletzungsschwere sagittal belasteter PKW-Insassen Forschungsbericht Nr 325/88, TU Berlin, 1988
- [Kramer 90] Kramer, F Schutzkriterien für den Fahrzeug-Insassen im Falle sagittaler Belastung Dissertation, TU Berlin VDI-Fortschritberichte, Reihe 12, Nr 137, Düsseldorf, 1990
- [Kramer 98] Kramer, F Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen Vieweg Braunschweig/Wiesbaden, 1998, ISBN 3-528-06915-5
- [Kuhnel 80] Kuhnel, A Der Fahrzeug-Fußgänger-Unfall und seine Rekonstruktion Dissertation, TU Berlin, 1980
- [LAI 91] Krebsrisiko durch Luftverunreinigungen Abschlußbericht der Arbeitsgruppe des Landerausschusses für Immissionsschutz, 1991
- [Lamby 98]* Lamby, M Fahrsimulationsprogramme für die Verkehrsunfallrekonstruktion am Beispiel des Programms CARAT 2 0 Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1998, Heft 7/8, S 215-224
- [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 1976, TUV Rheinland, Köln, S 53
- [Langwieder 01] Langwieder, K , Hummel, T Verletzungen von airbaggeschützten Insassen und Unfallcharakteristika Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2001, Heft 5, S 141-146, Heft 6, S 160-166
- [Lenz 90]* Lenz, K -H Gefährdung und Maßnahmen Zur Entwicklung der Unfallrisiken und der Unfallforschung In BMV (Hrsg) Vier Jahrzehnte Verkehrssicherheit, Bonn, 1990
- [Lipa 90]* Lipa, R Die Festlegung der Kollisionsstellung und des Kontaktpunktes bei dem 90 Grad Kreuzungsunfall unter Beachtung der Verformung des Vorbaues Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1990, Heft 12, S 323-331
- [Lossagk 58] Der Zusammenstoß Berichte der Technischen Überwachungsvereine (BTU), 1958, S 256 ff
- [Luff 84]* Luff, K Rekonstruktion von Verkehrsunfällen aus gerichtsarztlicher Sicht In Wagner (Hrsg) Verkehrsmedizin Springer 1984 ISBN 3 540-12373-3 S 412-422

7 Literatur

- [Mackay 68]* Mackay, G M Injury And Collision Severity SAE Trans , Vol 77, Paper 68 07 79, 1968
- [Mao 01]* Mao, Y Auswirkungen unterschiedlicher Gewebefaltungen auf das Gefahrungs-/Schutzpotential von Airbags Dissertation, TU Berlin 2001
- [Marquard 62] Marquard, E Zur Mechanik des Zusammenstoßes von Fahrzeugen 1962, ATZ 64, S 141-148
- [Mattern 88] Mattern, R , Eichendorf, W , Reiss, S , Alt, B , Miksch, T Verletzungsfolgekosten nach Straßenverkehrsunfällen Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT), Heft Nr 73, Frankfurt, 1988
- [Mattern 91]* Mattern, R , Pletschen, B , Zeidler, F ICS – eine Verletzungsfolgenskala zur Festlegung von Sicherheitsprioritäten in der Fahrzeugentwicklung Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1991, Heft 1, S 25-30
- [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 Verkehrspsychologie an der Unfallaufklärung Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2000, Heft 2, S 81-84
- [Moser 97] Moser, A , Steffan, H Unfallrekonstruktionsdatenbank Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Heft 4, S 115-116, 1997
- [Moser 98/1] Moser, A , Steffan, H , Kasanicky, G Das Fußgangermodell in PC-Crash 5.1 – Validierung in Crashtests Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1998, Heft 11, S 305-308
- [Moser 98/2] Moser, A , Steffan, H Automatische Optimierung der Stoßeinlaufparameter unter Verwendung von Auslaufspuren und Endlagen Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Heft 10, S 287-292, 1998
- [Muller 94] Muller, J Einfache graphisch-rechnerische Ermittlung der Kollisionsgeschwindigkeiten mit dem Geschwindigkeitsdiagramm Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1994, Heft 11, S 297-300
- [Muller 98]* Muller, J Zum vektoriellen Geschwindigkeitsdiagramm Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1998, Heft 9, S 245-249
- [Nagel 89] Nagel, U Entwicklung eines Programms zur Rekonstruktion von Fahrzeugunfällen unter Anwendung der Stoßrechnung Studienarbeit, TU Berlin, 1989
- [Nagel 91] Nagel, U Rechnergestützte Unfallrekonstruktion – Programmsystem auf der Basis der Stoß- und der Kraftrechnung Diplomarbeit, TU Berlin, 1991
- [NHTSA 99]* NHTSA Safety Fact Sheet Washington DC, November 1999
- [Niklas 70] Niklas, J Nutzen/Kosten-Analysen von Sicherheitsprogrammen im Bereich des Straßenverkehrs Schriftenreihe des VDA, Nr 7, Frankfurt/Main, 1970
- [Otte 82] Otte, D , Kuhnel, A , Suren, E G , Weber, H , Gotzen, L , Schockenhoff, G , Vu-Han, V Erhebungen am Unfallort Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr, Heft 37, BASt, 1982
- [Otte 89] Otte, D Bedeutung und Aktualität von Wurfweiten, Kratzspuren und Endlagen für die Unfallrekonstruktion Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1989, Heft 11, S 294-300
- [Otte 91]* Otte, D , Felten, G Requirements on Chin Protection in Full-Face for Motorcyclist Impact and Injury Situations No 7 Proceedings of the 1991 International Motorcycle Conference, Institut für Zweiradsicherheit e V , Bochum, 1991, S 229-266
- [Otte 98] Otte, D , Willeke, H , Chinn, B , Doyle, D , Schuller, E Anprallmechanismen von Helmgeschützten Kopfen – Unfallstudie COST 327 No 8 Proceedings of the 1998 International Motorcycle Conference, Institut für Zweiradsicherheit e V , Bochum, 1998, S 83-112
- [Otte 00]* Otte, D , Richter, M , Kuhnsebeck, H -W , Mossinger, 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), Berlin 2000, S 467-491
- [Otte 01]* Otte, D Besonderheiten des Kollisionsablaufes von Pkw bei Airbag-Nichtauslösung Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2001, Heft 4, S 96-104
- [PC-CRASH 98] PC-CRASH, ein Simulationsprogramm für Verkehrsunfälle Bedienungshandbuch DSD (Dr Steffan Datentechnik), Linz, Österreich, 1998

7 Literatur

- [Pfeifer 00] Pfeifer, H Die Drehimpulserhaltung – einige grundsätzliche Überlegungen Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2000, Heft 2, S 39-44
- [Plankensteiner 94] Plankensteiner, K Theorie und Praxis der forensischen Unfallanalyse Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1994, Heft 3, S 79-83, Heft 4, S 103-108, Heft 6, S 169-172, Heft 7/8, S 217-226
- [Rathgelb 80]* Rathgelb, G (Hrsg) Handbuch des Verkehrsunfalls – UfaHa Richard Boorberg Verlag Stuttgart, 1980, ISBN 3-415-00729-4
- [Rau 75] Rau, H Rekonstruktion von Fahrzeugkollisionen mit Hilfe von Bewegungsgleichungen Dissertation, TU Berlin, 1975
- [Rau 76/1]* Rau, H Möglichkeiten zur Verbesserung der Unfallerfassung In BMFT (Hrsg) Technologien für die Sicherheit im Straßenverkehr. 1976, TUV Rheinland, Köln, S 43 ff
- [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, 1989, Heft 11, S 313-319
- [Rau 98] Rau, H (Hrsg) UDS – Fachtagung, Berlin 1998, Kurzberichte
- [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 1992, SAE Handbook, Vol 4 , pp 34 175-34 185, Society of Automotive Engineers, Inc Warrendale, PA, USA
- [SAE J885] Human Tolerance to Impact Conditions as Related to Motor Vehicle Design SAE Information Report, July 1986, 1992 SAE Handbook, 1994, Vol 4, pp 34 251-34 268, Society of Automotive Engineers, Inc Warrendale, PA, USA
- [Schaper 79] Schaper, D Ist die Fahrzeugdeformation ein Maß für die Geschwindigkeitsänderung von Unfallfahrzeugen? Der Verkehrsunfall, 1979, Heft 7/8, S 138-142
- [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, 1980, Heft 10, S 206-208
- [Schimmelpfennig 82/1] Schimmelpfennig, K -H , Hebing, N Das Energie-Ring-Verfahren – Grafische Lösung der Stoßgleichungen unter Einbeziehung der Formänderungsenergie Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1982, Heft 9, S 168-172
- [Schimmelpfennig 82/2] Schimmelpfennig, K -H Kollisionsgeschwindigkeitsberechnung bei eindimensionalen Fahrzeug/Fahrzeug-Kollisionen Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1982, Heft 11, S 225-227
- [Schimmelpfennig 83] Schimmelpfennig, K -H , Hebing, N Der eindimensionale nicht plastische Stoß Erweitertes Band-Schnitt-Verfahren Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1983, Heft 12, S 337-340
- [Schimmelpfennig 84]* Schimmelpfennig, K -H Die Analyse von Serien-Auffahrunfällen mit Hilfe des Delta V-Schritt-Verfahrens Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1984, Heft 3, S 73-75
- [Schimmelpfennig 88]* Schimmelpfennig, K -H , Weber, M Sekundarstoß-Betrachtung Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1988, Heft 6, S 159-160
- [Schimmelpfennig 89] Schimmelpfennig, K -H , Schmedding, K Tangentialkomponentenverfahren Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1989, Heft 10, S 264-267
- [Schimmelpfennig 91] Schimmelpfennig, K -H , Hebing, N Die Kontaktpunktproblematik in der Unfallrekonstruktion – Energie-Doppelring- und Drehimpuls-Spiegel-Verfahren Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1991, Heft 9, S 259-263
- [Schmidt 00] Schmidt-Cotta Rechtliche und politische Aspekte der Unfalldatenspeicherung Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Nr 11, 2000, S 260-264
- [Scholpp 88] Scholpp, G Entwicklung eines Modells zur Simulation von Fahrzeugunfällen und Anpassung an Crashtests Diplomarbeit, TU Berlin, 1988
- [Seiffert 74] Seiffert, U Probleme der Automobilsicherheit Dissertation, TU Berlin, 1974

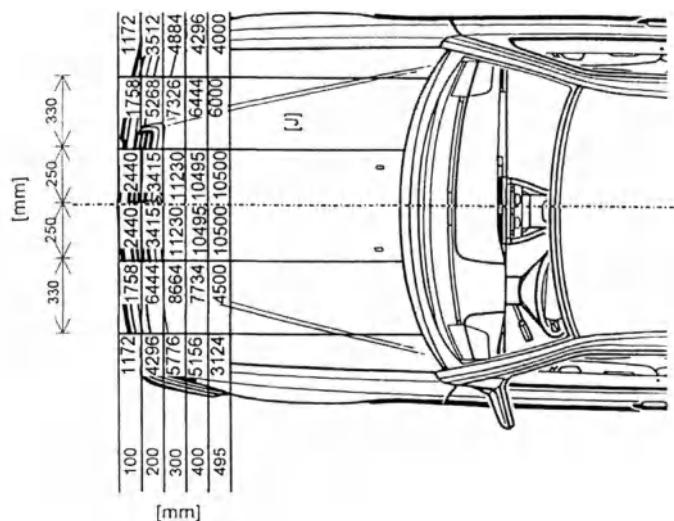
7 Literatur

- [Seiffert 85] Seiffert, U Unfallfolgenmindernde Fahrzeugsicherheit VDI Fortschrittsberichte, Reihe 12, Nr 59, VDI-Verlag, Dusseldorf, 1985
- [Slubar 64] Slubar, A Die mechanischen Grundsätze des Stoßvorganges und ihre Anwendung Zweite Arbeitstagung der GUVU, Karlsruhe, 1964
- [Slubar 66] Slubar, A Mechanische Grundgesetze des Stoßvorganges bei Verkehrsunfällen Archiv für Unfallforschung, 1966, 2 Jg , S 31-53
- [Slubar 73] Slubar, A Das Antriebs-Balance-Diagramm als optimales Hilfsmittel der Unfallanalyse Der Verkehrsunfall, 1973, Heft 2, S 25-30
- [Slubar 79] Slubar, A Aussagewert und Schranken der Kollisionsruckanalyse nach Indizienstand Der Verkehrsunfall, 1979, Heft 10, S 200-204
- [STAPP 99] 43rd STAPP Car Crash Conference 1999 Proceedings Society of Automotive Engineers, Inc Warrendale, PA, USA
- [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
- [StBA 94] Verkehrsunfälle 1993 Fachserie 8, Reihe 7, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 1994
- [StBA 99] Verkehrsunfälle 1998 Fachserie 8, Reihe 7, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 1999
- [Steffan 93] Steffan, H PC-Crash Ein Computerprogramm zur Simulation von Verkehrsunfällen Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1993, Heft 7/8, S 215-222
- [Steffan 94] Steffan, H Bedienungshandbuch für das Verkehrsunfall-Simulationsprogramm PC-CRASH 4.0, Graz, 1994
- [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), Berlin 2000, S 151-160
- [Struble 87] Struble, D E Generalizing CRASH3 for Reconstruction Specific Accidents SAE 870041, 1987
- [Sturtz 81] Sturtz, 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, 1966
- [Szabo 72] Szabo, I Höhere Technische Mechanik 5 Aufl , Springer-Verlag, 1972
- [Tariere 75] Tariere, 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
- [VDI 97] VDI-Berichte 1354 Innovativer Insassenschutz im Pkw VDI Verlag GmbH, Dusseldorf, 1997
- [VDI 99] VDI-Berichte 1471 Innovativer KFZ-Insassen- und Partnerschutz VDI Verlag GmbH, Dusseldorf, 1999
- [VDI 01] VDI-Berichte 1637 Innovativer KFZ-Insassen- und Partnerschutz VDI Verlag GmbH, Dusseldorf, 2001
- [Vehicle 92]* Vehicle Crush Data Accident Reconstruction Journal, Vol 4, No 3, 1992
- [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, ISBN 3-540 12373-3
- [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), Berlin, 2000, S 181-210
- [Walsh 91]* Walsh, W H Crash Data Plans for the United States 13th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicle (ESV), 1991, Paris
- [Wanderer 76]* Wanderer, U Unfallerfassende Institutionen In Technologien für die Sicherheit im Straßenverkehr, BMFT (Hrsg), Verlag TÜV Rheinland, 1976, Köln, S 41

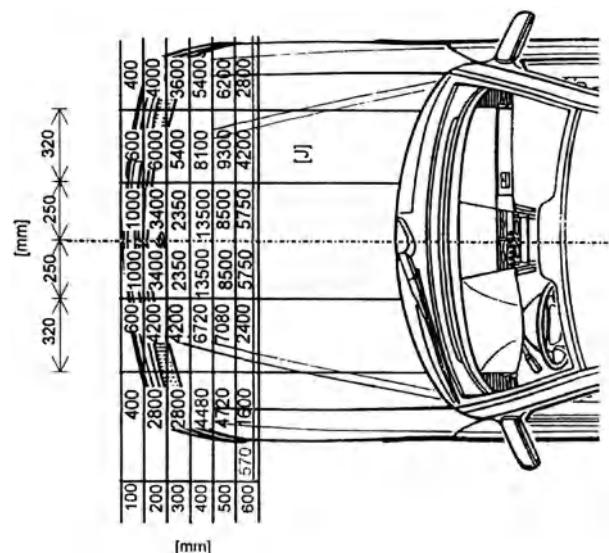
- [Wegner 00/1] Wegner, C , Otte, D , Rau, H Deformationscharakteristik und Einflußparameter von Fahrrädern bei Kollisionen mit der Pkw-Front Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2000, Heft 2, S 32-38 und Heft 3, S 62-70
- [Wegner 00/2] Wegner, C , Otte, D , Rau, H Deformationscharakteristik und Einflußparameter von Fahrrädern bei Kollisionen mit der Pkw-Front Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 2000, Heft 4, S 115-120
- [Weismayr 91]* Weismayr, W EES-k Schnittverfahren Berechnung der Geschwindigkeitsänderung bei Auffahr- und Frontalstoßen, Auffinden des Kollisionsortes Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1991, Heft 4, S 105-107
- [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, 1987, Heft 1, S 29-30
- [Zeidler 79]* Zeidler, F Deformationsverhalten von Kraftfahrzeugen bei Aufprallversuchen unter praxisgerechten Versuchsbedingungen. Der Verkehrsunfall, 1979, Heft 4, S 76-81, Heft 5, S 109-112
- [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 84] Zeidler, F Die Bedeutung der Formanderungsenergie für die Unfallforschung und das EES- Unfallrekonstruktionsverfahren Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1984, Heft 4, S 105-112
- [Zeidler 97] Zeidler, F , Knochelmann, F Der Einfluß der Prüfgeschwindigkeit von Frontalaufpralltests auf die Kompatibilität von realen Pkw-Pkw-Kollisionen In Innovativer Insassenschutz im Pkw VDI Berichte 1354, S 37-54, 1997
- [Zeman 01] Zeman, V Beitrag zur Theorie des schiefen zentralen Stoßes von Körpern sowie zur Simulation eines Zusammenstoßes von Kraftfahrzeugen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Heft 3, 2001, S 75-79
- [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, pp 729-741
- [Zomotor 87] Zomotor, A Fahrwerktechnik Fahrverhalten Vogel-Verlag, Wurzburg, 1987

8 ANHANG

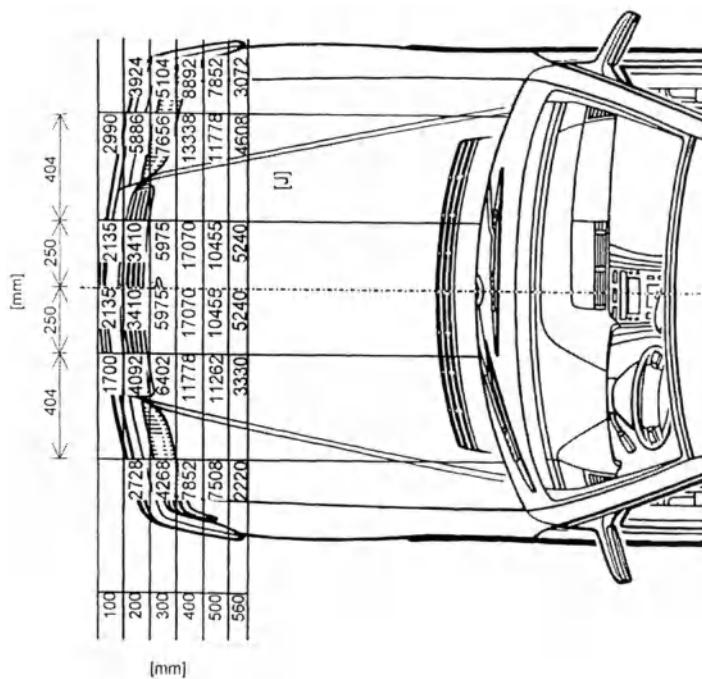
8.1 ENERGIERASTER VON FAHRZEUGEN BEIM FRONTALAUFPRALL, UNTERSCHIEDLICHE MASSEN, UNTERSCHIEDLICHE MOTORANORDNUNGEN (Informelle Angaben der Fa. MB ca. 1990)



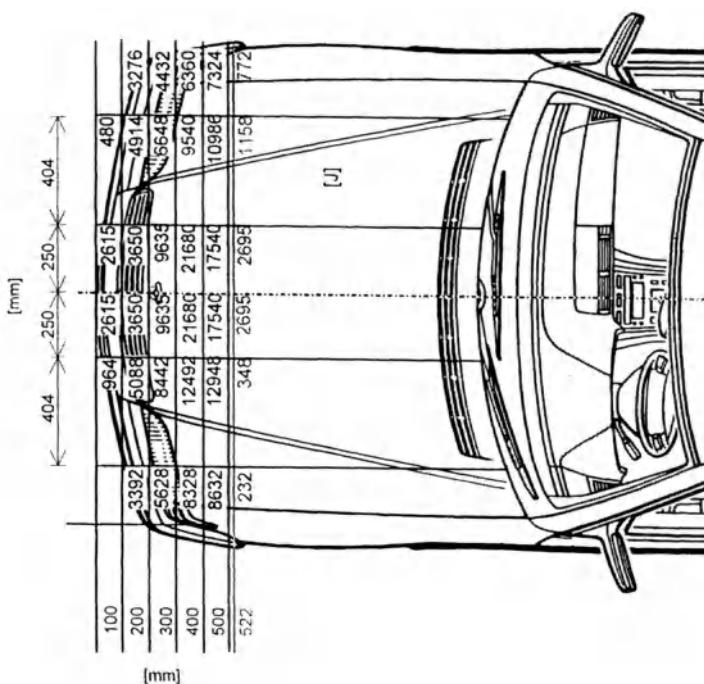
Masse : 1.803 kg
 Motor : R6
 v_0, EES : 48,5 km/h
 E_{Kin} : 164 kJ



Masse : 1 782 kg
 Motor : V6
 v_0, EES : 49,3 km/h
 E_{Kin} : 167 kJ



Masse : 2.440 kg
Motor : V8
 v_0, EES : 49,1 km/h
 E_{Km} : 227 kJ



Masse : 2.602 kg
Motor : V12
 v_0, EES : 48,7 km/h
 E_{Km} : 238 kJ

8.2 AUSGEWÄHLTE ERHEBUNGSBOGEN DER VERKEHRS- UNFALLFORSCHUNG HANNOVER

0 4 1

Fall Fzg.-Nr. Pk

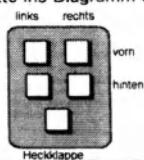
Verletzungsübersicht

AIS - Kopf <input type="checkbox"/>	AIS - Arme <input type="checkbox"/>	AIS - Beine <input type="checkbox"/>
AIS - Hals <input type="checkbox"/>	AIS - Abdomen <input type="checkbox"/>	MAIS <input type="checkbox"/>
AIS - Thorax <input type="checkbox"/>	AIS - Becken <input type="checkbox"/>	NACA <input type="checkbox"/>
Polytraumaschlüssel..		
Polytrauma 1 ja	2 nein	
Glasgow-Coma-Scale		
<i>Augen öffnen</i>		
4 spontan	5 konversationsfähig	6 befolgt Aufforderung
3 auf Aufforderung	4 desorientiert	5 gezielte Schmerzabwehr
2 auf Schmerzreiz	3 Wortsalat	4 ungezielte norm. Beugung
1 gar nicht	2 unverständliche Laute	3 Beugesynergien
	1 keine	2 Strecksynergie
		1 keine
<i>Verbalantwort</i>		
4 Babinski positiv	5 Pupillenveränd. o.n.A	Amnesie <input type="checkbox"/>
5 beide Pupillen weit	6 Pupillen entrundet	Pupille rechts weit <input type="checkbox"/>
6 Paraplegie	7 Tetraplegie	Halbseitenzeichen <input type="checkbox"/>
7 Atemstörung	8 Plexuslärmung	Krämpfe, Streckkrämpfe <input type="checkbox"/>
		Kreislauf <input type="checkbox"/>
<i>motorische Reaktion</i>		
Neurologischer Status <input checked="" type="checkbox"/>	zutr ankreuzen	phys Reflexe schwach <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Armenie	Pupille links weit <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Pupillenveränd. o.n.A	Sensibilitätsverlust <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Pupillen entrundet	Halbseitenzeichen <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Tetraplegie	Krämpfe, Streckkrämpfe <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Plexuslärmung	Kreislauf <input type="checkbox"/>
		Stammhirnzeichen o.n.A <input type="checkbox"/>
Komplikationen für alle gilt 1 o.n.A. 3 Unfallstelle 4 bei Transport 5 im Krankenhaus 6 auf Station		
<input type="checkbox"/>	Thrombose	Embolie o.n.A <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Herzinfarkt	Sepsis <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	ARDS Ateminsuff.	Atemstillstand <input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	Multiorganversagen	Schock <input type="checkbox"/>
		Verbrauchskoagulation <input type="checkbox"/>
Langzeitfolgen		
3 psychische Probleme	1 ja o.n.A	2 keine <input type="checkbox"/>
6 Hörfähigkeit	4 Schmerzen	5 Sehfähigkeit <input type="checkbox"/>
11 Querschnittsyndrom	7 Sensibilitätsverlust	10 Bewegungseinschränk. <input type="checkbox"/>
14 Tod (> 30 Tage nach VU)	12 Gehirnschädigung	13 Verlust Gliedmaßen <input type="checkbox"/>
	8 andere	9 unbekannt <input type="checkbox"/>
Patient verstorben		
3 am Unfallort o.n.A	1 verstorben o.n.A	2 überlebt <input type="checkbox"/>
6 Transport	4 Unfallort sofort	5 Unfallort nach Rean. <input type="checkbox"/>
11 Khs am Unfalltag	7 Krankenhaus o.n.A	10 Khs bei Erstvers. <input type="checkbox"/>
	12 Krankenhaus später	8 andere <input type="checkbox"/>
9 unbekannt <input type="checkbox"/>		9 unbekannt <input type="checkbox"/>
Zeit bis Tod (nach Unfall) IN Minuten (bis 60) <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> IN Stunden (bis 24) <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> IN Tagen <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		
Lokalisation tödlicher Verletzungen (max 3 Angaben)		
1 Kopf	2 Wirbelsäule	3 Thorax <input type="checkbox"/>
5 Becken	6 Extremitäten	4 Abdomen <input type="checkbox"/>
		8 nicht Verletzungsfolge <input type="checkbox"/>
Todesursachen (max 5 Angaben)		
1 Hirntod	2 Volumenmangelschock	3 ARDS, resp. Insuffizienz <input type="checkbox"/>
4 cardiale Insuffizienz	5 Verbrauchskoagulation	6 Sepsis <input type="checkbox"/>
7 Pneumonie	10 Embolie o.n.A	11 Lungenembolie <input type="checkbox"/>
12 Lufembolie	13 Fettembolie	14 Nierenversagen <input type="checkbox"/>
15 Pentitonitis	16 Folge Thoraxverletzung	17 Folge des Schocks <input type="checkbox"/>
18 Folge Vorerkrankung	19 Aspirationspneumonie	8 andere <input type="checkbox"/>
		9 unbekannt <input type="checkbox"/>
Autopsie 0 entfällt <input type="checkbox"/> 1 ja <input type="checkbox"/> 2 nein <input type="checkbox"/>		

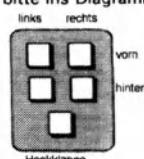
0 8 5

Fall Fzg-Nr. **Türöffnungen nach dem Crash**(Kennziffern bitte ins Diagramm eintragen)

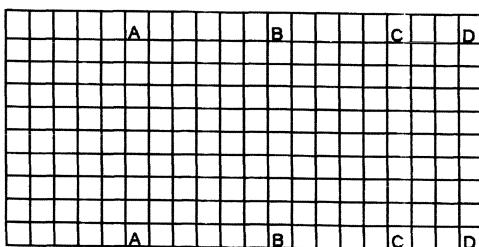
- 3 Tür offen
 4 klemmt
 5 voll funktionsfähig

**Türen durch Fremdhilfe geöffnet**(Kennziffern bitte ins Diagramm eintragen)

- 1 ja
 9 unbekannt

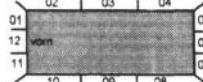
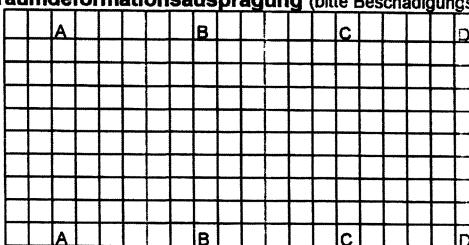
**Fahrzeugbeschädigungen außen (Record 15)**

Maximale Eindringtiefe von außen	gemessen in cm	Beulentiefe	Höhe über Boden
Front			
linke Seite vor A-Holm			
in Höhe Insassenzelle			
hinter Insassenzelle			
rechte Seite vor A-Holm			
in Höhe Insassenzelle			
hinter Insassenzelle			
Heck			
Dach			

Deformationsmuster (Beschädigungsbild in Draufsicht, Nr der Kollision eintragen)**Fahrzeug zerrissen**1 ja3 teilzerrissen

0 8 6

Fall Fzg-Nr. **Innenraum (Record 16)**

Innenraum durch Crash verändert		<input type="radio"/> ja	<input type="radio"/> nein	<input type="checkbox"/>																																										
Hauptregion der Innenraumdeformation 1 Beschädigung <input type="checkbox"/> bis <input type="checkbox"/> 2. Beschädigung <input type="checkbox"/> bis <input type="checkbox"/> 																																														
Deformationsmaße Innenraum in cm <table style="float: right; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Richtung</th> <th>cm (ca.)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Pedale - Verlagerung</td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>vordere Spritzwand linker Bereich</td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>vordere Spritzwand rechter Bereich</td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>Lenkrad (Bezugspunkt Nabe)</td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>Armaturentafel Fahrerseite</td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>Armaturentafel Beifahrerseite</td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>Fahrertür</td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>Beifahrertür</td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>Tur / Innenverkleidung auf Hohe Rucksitz links</td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>Tur / Innenverkleidung auf Hohe Rucksitz rechts</td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>Deformation von hinten rechte Seite/Rucksitz</td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>Deformation von hinten linke Seite/Rucksitz</td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> <tr><td>Deformation von oben / Dach</td><td><input type="checkbox"/></td><td><input type="checkbox"/></td></tr> </tbody> </table>						Richtung	cm (ca.)	Pedale - Verlagerung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	vordere Spritzwand linker Bereich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	vordere Spritzwand rechter Bereich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Lenkrad (Bezugspunkt Nabe)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Armaturentafel Fahrerseite	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Armaturentafel Beifahrerseite	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fahrertür	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Beifahrertür	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Tur / Innenverkleidung auf Hohe Rucksitz links	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Tur / Innenverkleidung auf Hohe Rucksitz rechts	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Deformation von hinten rechte Seite/Rucksitz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Deformation von hinten linke Seite/Rucksitz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Deformation von oben / Dach	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Richtung	cm (ca.)																																												
Pedale - Verlagerung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																												
vordere Spritzwand linker Bereich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																												
vordere Spritzwand rechter Bereich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																												
Lenkrad (Bezugspunkt Nabe)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																												
Armaturentafel Fahrerseite	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																												
Armaturentafel Beifahrerseite	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																												
Fahrertür	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																												
Beifahrertür	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																												
Tur / Innenverkleidung auf Hohe Rucksitz links	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																												
Tur / Innenverkleidung auf Hohe Rucksitz rechts	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																												
Deformation von hinten rechte Seite/Rucksitz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																												
Deformation von hinten linke Seite/Rucksitz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																												
Deformation von oben / Dach	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																																												
für Richtung gilt folgender Code (es sind 2 Angaben möglich) 2 keine (Originalmaß) 3 horizontal nach innen 4 nach oben 5 nach unten 8 andere 9 unbekannt																																														
immer messen Abstand Sitzscheitelpunkt - Lenkradnabe Fahrer <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Beifahrer <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Sitzscheitelpunkt - Kopfstützenoberkante Fahrer <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Beifahrer <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Neigung Rückenlehne (°) Fahrer <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Beifahrer <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>																																														
Innenraumdeformationsausprägung (bitte Beschädigungsbild in Draufsicht eintragen!)																																														
																																														

0 8 7

Fall Fzg-Nr. **Innenraum (Record 13)****Lenksäule**

- | | | |
|---|---|--|
| <input type="radio"/> verlagert o n A | <input type="radio"/> beschädigt | <input type="radio"/> Insassenkontakt (sicher) |
| <input type="radio"/> nach hinten verlagert | <input type="radio"/> nach rechts verlagert | <input type="radio"/> nach links verlagert |
| <input type="radio"/> nach oben verlagert | <input type="radio"/> frontal verlagert | <input type="radio"/> unbekannt |
| <input type="radio"/> andere | | |

Dachöffnung

- | | | |
|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| <input type="radio"/> Schiebedach | <input type="radio"/> Klappverdeck | <input type="radio"/> Hebedach |
| <input type="radio"/> unbekannt | <input type="radio"/> andere | |

Zustand/Beschädigung der Dachöffnung

- | | | |
|---------------------------------|--|---|
| <input type="radio"/> entfällt | <input type="radio"/> beschädigt o n A | <input type="radio"/> vor Unfall geöffnet |
| <input type="radio"/> unbekannt | <input type="radio"/> andere | |

Lenkrad Anzahl der Speichen**Lenkradkranz deformiert**

- | | | |
|---|---|---|
| <input type="radio"/> ja o n A | <input type="radio"/> beschädigt ohne IC | <input type="radio"/> beschädigt mit IC |
| <input type="radio"/> beschädigt nur durch IC | <input type="radio"/> unbeschädigt mit IC | <input type="radio"/> unbekannt |

Lenkradkranz Lage der Deformation (12 Uhr oben unabhängig von Drehung Lenkrad)

- | | | |
|---|---------------------------------|------------------------------|
| <input type="radio"/> keine Deformation | <input type="radio"/> 1 Uhr | <input type="radio"/> 2 Uhr |
| <input type="radio"/> 3 Uhr | <input type="radio"/> 4 Uhr | <input type="radio"/> 5 Uhr |
| <input type="radio"/> 6 Uhr | <input type="radio"/> 7 Uhr | <input type="radio"/> 8 Uhr |
| <input type="radio"/> 9 Uhr | <input type="radio"/> 10 Uhr | <input type="radio"/> 11 Uhr |
| <input type="radio"/> 12 Uhr | <input type="radio"/> unbekannt | |

Lenkradspeichen deformiert

- | | | |
|---|---|---|
| <input type="radio"/> ja o n A | <input type="radio"/> beschädigt ohne IC | <input type="radio"/> beschädigt mit IC |
| <input type="radio"/> beschädigt nur durch IC | <input type="radio"/> unbeschädigt mit IC | <input type="radio"/> unbekannt |

Lenkradnabe deformiert

- | | | |
|---|---|---|
| <input type="radio"/> ja o n A | <input type="radio"/> beschädigt ohne IC | <input type="radio"/> beschädigt mit IC |
| <input type="radio"/> beschädigt nur durch IC | <input type="radio"/> unbeschädigt mit IC | <input type="radio"/> unbekannt |

Beschädigungen und Insassenkontakte innen (bitte ankreuzen - Achtung! rechte und linke Seite!)**Code.**2 unbeschädigt, kein Insassenkontakt3 beschädigt, kein Insassenkontakt4 beschädigt, mit Insassenkontakt5 unbeschädigt, mit Insassenkontakt

links	Teil.	rechts	links	Teil	rechts
	Frontscheibe			Heckscheibenrahmen oben	
	FS-Rahmen oben			Heckscheibenrahmen unten	
	FS-Rahmen unten			Tur vom innen	
	A-Pfosten oben			Turbeschlage vorn	
	A-Pfosten unten			Seitenarmlehne vorn	
	Sonnenblende			Glas A-B	
	Innenspiegel			Scheibenrahmen A-B	
	Schalttafel oben links			B-Pfosten oben	

0 9 9

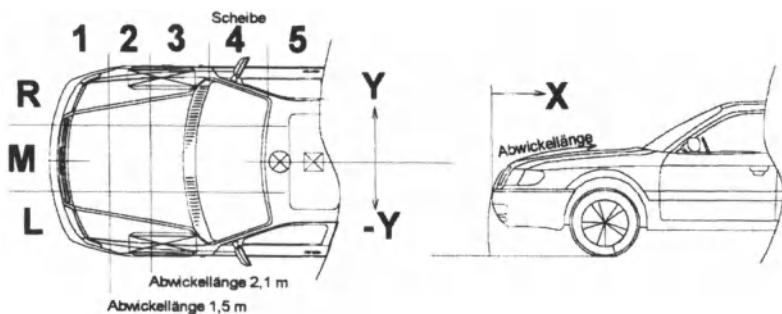
Fall Fzg-Nr. Pk

Maße - Personenanprall

Teambericht vom Unfallort

Die Deformationen bitte annähernd maßstablich auf der Rückseite skizzieren, alle Maßangaben in cm, Bezeichnung der Zonen R1, M2 usw

Definitionen



Art 1 on A 3 Wischspur 4 Deformation 5 Glasbruch

Anprallstellen:

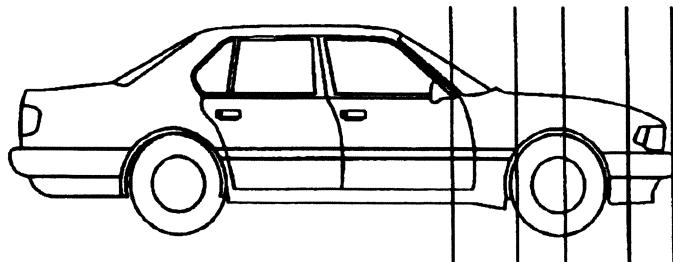
Körperpart	Art	Zone	Maß X	Maß Y	Abwickellänge
Kopf	<input type="checkbox"/>				
Hals	<input type="checkbox"/>				
Schulter	<input type="checkbox"/>				
Thorax	<input type="checkbox"/>				
Arme o n A	<input type="checkbox"/>				
Oberarm	<input type="checkbox"/>				
Ellenbogen	<input type="checkbox"/>				
Unterarm	<input type="checkbox"/>				
Hand	<input type="checkbox"/>				
Beine o n A	<input type="checkbox"/>				
Oberschenkel	<input type="checkbox"/>				
Knie	<input type="checkbox"/>				
Unterschenkel	<input type="checkbox"/>				
Fuß	<input type="checkbox"/>				

MP

Personenanprall

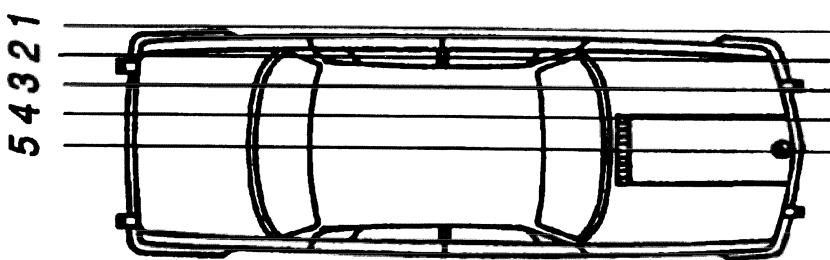
8.3 KLASIFIZIERUNG DER FAHRZEUGBESCHÄDIGUNG NACH DEM GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT [HUK 94]

Beispiel für Front

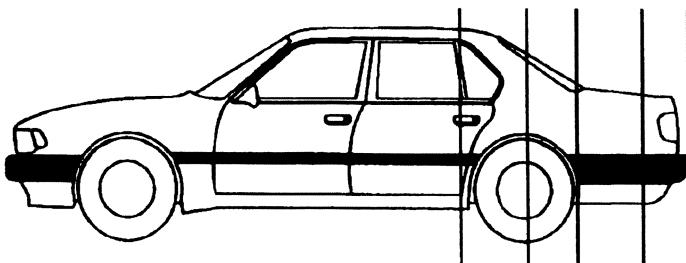


5 4 3 2 1

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*

8.4 SCHUTZKRITERIEN UND BELASTUNGSGRENZEN UNTER STOSSARTIGER BELASTUNG (INOFFIZIELLE ZUSAMMENSTELLUNG DER ARBEITSGRUPPE FÜR UNFALLMECHANIK DER ETH ZÜRICH) [AGU 96, 97]

8.4.1 Schutzkriterien und Belastungsgrenzen des erwachsenen Menschen

Korperteil	Limit	Grenzwert	Quelle/Anwendung
Kopf	HIC ₃₆ (Head Injury Criterion)	< 1000 ($\Delta t \leq 36$ ms)	FMVSS 208
	HIC ₁₅	< 700 ($\Delta t \leq 15$ ms)	FMVSS 208 (ab 2003)
	HPC (Head Protection Criterion)	< 1000	ECE-R 94 und 95
	Beschleunigung a_{res}	< 80 g ($t \leq 3$ ms)	FMVSS 201
	ω (Hirnerschutterung)	20–30 rad/s	
	ω	30–40 rad/s	Gennarelli 1989
	ω (Contusion)	70 rad/s ²	
	$d\omega/dt$ (AIS 2/3/4/5)	1,7/3,0/3,9/4,5 krad/s ²	
	$d\omega/dt$ (Hirnerschutterung)	1 krad/s ²	
	$d\omega/dt$ (Contusion)	4,5 krad/s ²	
	Kraft F_{Stirn}	4–6 kN	
	Beschleunigung a_{Stirn}	120–200 g	
	$F_{Schläfen-, Scheitelbein}$ (AIS 2)	2 kN	
	$F_{Zygomaticum, Maxilla}$	890 N	
	$F_{Mandibula}$	1,68 kN	
	$F_{frontal}$	4–6 kN	unterschiedliche Untersuchungen
	$F_{lateral}$	2–5,8 kN	
	$F_{fraktur}$ Oberkiefer	0,66 kN 1,35 kN 0,80 kN	Schneider u a Nahum 1972 Allsop u a 1988 Welbourne u a 1989
	$F_{fraktur}$ Nase	2,60 kN 3,00 kN	Welbourne u a 1989 Nyquist u a 1986
	$F_{fraktur}$ Unterkiefer, lateral	1,80 kN 0,89 kN	Schneider u a Nahum 1972
	$F_{fraktur}$ Jochbein	0,89 kN 1,80 kN 2,40 kN	Hodgson u a 1964 Nahum u a 1968 Yoganandan u a 1988
	$F_{fraktur}$ Jochbeinbogen	0,45 kN 0,89 kN	Hodgson u.a 1964 Schneider u Nahum 1972
Hals	$F_{Scherung}$ a-p	860 N	Hybrid III
	$F_{Scherung}$ a-p (max, freiwillig)	845 N	Goldsmith (anterior-posterior)
	$F_{Scherung}$ a-p (irrev Schaden)	2 kN	Goldsmith
	$F_{Scherung}$ a-p	1,8–2,6 kN	Burow 1974
	$F_{Scherung}$ a-p	3,3 kN	ECE-R 94 1998
	F_{axial} (Zug)	1,1–2,6 kN	
	F_{axial} (Druck)	3,6–5,7 kN	Culver 1978
	F_{axial} (Zug/Druck)	3,3/4,0 kN	ECE-R 94 1998
	F (Zug hinteres Langsband)	1,740 kN	
	Moment M_x (Hyperextension)	57 Nm	ISO-Vorschlag, APR
	M_x Ligamentschaden, AIS 2	57 Nm	Goldsmith
	M_x (Hyperflexion C0/Cl)	250 Nm	APR

8 Anhang

Korperteil	Limit	Grenzwert	Quelle/Anwendung
Hals	M_x freiwillig, statisch	24 Nm	Goldsmith
	M_x freiwillig, Schmerz, AIS I	60 - 88 Nm	Goldsmith
	M_x AIS 2	190 Nm	Metz
	φ (Extension Kopf/Thorax)	60° / 80° 90°	
	φ (Flexion Kopf/Thorax)	80° 100°	
	ψ (axiale Rotation)	136°	Schneider
	ξ (laterale Biegung)	71°	
	a_x lang in Thorax eingeleitet	40 80 g	
	a_y seitlich eingeleitet	15 18 g	
Thorax	Beschleunigung $a_{\text{Wirbelsäule}}$	60 g / 3 ms (frontal)	FMVSS 208, Hybrd III
	TTI 4-Turen/2-Turen	85 g / 90 g (seitlich)	FMVSS 214, US-SID
	F_{\max} großflächig	4-8kN	
	Thorax-Kompression frontal, ohne Airbag	50 mm	FMVSS 208, R 94 1998, Hybrd III
	mit Airbag	76 mm	
	Rippen-Kompression seitlich	42 mm	ECE-R 95, EuroSID I
Abdomen	Viscous Criterion VC oben	1,0 m/s	ECE-R 95, EuroSID I
	F (intern seitlich, APF)	2,5 kN	ECE-R 95, EuroSID I
	F (extern seitlich)	4,5 kN	ECE WP
	F frontal	1,5 kN	
	F_y Leber (isoliert) seitlich ohne Verletzung	360 N	APR
	leichte Verletzung	500 N	APR
	AIS 3	4,4 kN	APR
	VC Leber seitlich	1,98 m/s	APR
Becken	Dy Leber (AIS 3) seitlich	60 mm	APR
	Beschleunigung a_{lateral}	130 g	FMVSS 214
	Beschleunigung a_{frontal}	60 80 g	
Femur	$F_{\text{Symphysen, lateral (PSPF)}}$	6 kN	ECE-R 95, EuroSID I
	F_z Axialkraft	10 kN	FMVSS 208, R 95
	F_y Querkraft	4 kN	ECE WP10 1999
Knie	M_y Biegemoment	220 Nm	ECE WP10 1999
	Biegeinkel Scherweg	15° 6 mm	ECE WP10 1999, Fußgängertests, Beinimpaktor
Schienbein	F_x frontal	2 5 5 kN	
	Beschleunigung a	150 g	ECE WP10 1999 Fußgängertests, Beinimpaktor
	M_y Biegemoment	120- 170 Nm	
	F_{axial}	8 kN	ECE-R 94 1998
	Tibia-Index	1,3	ECE-R 94 1998, Index für komb Axialkraft- Biegebelastung

8 Anhang

8.4.2 Schutzkriterien und Belastungsgrenzen des Kindes

Körperteil	Limit	Grenzwert	Quelle/Anwendung
Kopf	HIC ₃₆	1000	FMVSS 213
	HIC ₁₅	700/ 570/ 390	FMVSS 208 ab 2003 6J/ 3J / 12M
Thorax	Vorverlagerung	550mm	ECE-R 44
	Beschleunigung a _{res}	60g (t ≤ 3 ms)	FMVSS 213
	Beschleunigung a _{res}	55g	ECE-R 44
	Beschleunigung az	30g	ECE-R 44

8.5 VERLETZUNGSSCHUTZ DER INSASSEN, AUSBLICK

Passive Sicherheit	<ul style="list-style-type: none"> • advanced restraint system <ul style="list-style-type: none"> stufenloser (druckadjustierter) Airbag Sensierung der Unfallschwere OOP-Sensierung Faltungsart des Airbags Aufblasrichtung, Anordnung des Airbags aktive Öffnungsklappe des Airbags mehrere kleine Airbags ersetzen einen großen • Fußraumsicherung: Intrusionsminderung • Kompatibilität (Pkw/Pkw) • Partnerschutz (Nfz/Pkw) • Rückhaltesysteme im Lkw und Reisebus • Vergrößerung Innenvorverlagerung: Entfall des Lenkrades durch steer by wire mit side stick
„Fusion“ Aktive/Passive Sicherheit [Friedrich 01]	<ul style="list-style-type: none"> • Kontrolle Längsdynamik (ACC, ...): Auffahrunfälle • Kontrolle Querdynamik (EPS, ...): Schleudern, Seitenauftprall • Gierunterdrückung bei Einzelrad-ABV durch Lenken: Bremsweg • Spurhaltungsunterstützung: aktives Lenkrad, heading control. Alleinunfälle, Frontalkollisionen • Rundum-Kontrolle: Radar, Radarscanner, IR, IR-Scanner, Ultraschall, Video. z. B. Nfz/Fußgänger, Zweiradfahrer, Abbiegevorgänge, Ausschervorgänge • Kollisionsvermeidung: Bremsen, Lenken • Rettung: Telematik, Streckenwarnung

9 Sachwortverzeichnis

9 SACHWORTVERZEICHNIS

Abgleiten	139	Drehimpuls-Spiegelverfahren	162
Aktive Sicherheit	16, 18	Drehimpulsvektor	93, 98
Alleinunfälle	23	Drehpol	79
Altersgruppen	58	Drehstoß	98
ANALYSER PRO	173	dynamisches Gleichgewicht	114
Anfangsbedingungen	116	dynamische Analyse	.146
Anknüpfungstatsachen	29	ebene Scheibe	98
Anprallgeschwindigkeit	64	ECE	72, 73, 74, 75
Anstoßrichtungen	26	EDCRASH	173
Antriebs-Balanceverfahren	157	EES-Methode	148
Arbeitssatz	105	effektive Masse	86
Aufprallart	19, 24	Eingangsgrößen	146, 156
Auffahrunfall, -kollision	170	eingeprägte Kräfte	91
Aufpralltyp	19, 25	Einlaufbewegung	147
Aufwurfweite	60	Einlaufphase	18, 30
Ausgangsgroßen	143	Einlaufimpulse	144
Auslaufbewegung	109, 147	elastischer Stoß	89
Auslaufphase	18, 30	Energie-Doppelring-Verfahren	181
äußere Kräfte	91	Energie-Ringverfahren	165
außeres Produkt von Vektoren	99	Energiesatz	105
Banderverletzungen	28	Ergänzungshypothesen	96, 104
Band-Schnittverfahren	169	Ersatzsystem, Ersatzmodell	144, 151
Belastungsarten	27	Ersatzmasse	165
Belastungsgrenzen	77	Ersatzsteifigkeit	114
Bewegungsgleichungen	95	Eulersche Formel	82
Bewegungstrajektorien	60	Erweitertes Rhomboid-Schnittverfahren	169
Codierung der Unfallfolgen	50	experimentelle Analyse	137
CARAT	173	exzentrischer Stoß	94, 118
CRASH3	173	Festlegung von Vorzeichen	142
Crashdauer	84	Flugweite	133
Crashkinematik	82	Folgephase	18, 30
Crashphase	18	Frakturen	28
Crashpuls	48	Frontalaufprall-Crashtests	72
D A A D	173	Frontalkollision	66, 113
Daten	30	Frontsteifigkeit	68
Deformationsenergie	45	Fußgangerkollision	133
Deformationskennungen	82	Gangpolbahn	81
Deformationsweg, -länge	49, 70, 88	Gefäßverletzungen	28
Differenzialgleichungen	116, 144	gerader Stoß	94
direkte Krafteinwirkung	27	gerader zentrischer Stoß	100
Draill, Draillsatz	93, 98	grafische Verfahren der Unfallrekonstruktion	143, 155
Drehimpuls	98	geschützter Verkehrsteilnehmer	27
Drehimpulssatz	98	Geschwindigkeitsänderung	44
Drehimpulsgleichungen	104	Geschwindigkeitsänderungen	102

9 Sachwortverzeichnis

gesetzliche Regelungen, Crashtests	57	Normalstoßantrieb	104, 150, 151
Getötete	57	Offset-Kollision	130
Getötetenrate	58	objektive Sicherheit	15
Gleithypothese	97, 104	Organverletzungen	28
Gleitstoß	104, 153	PAFU	174
Grunddaten, Grundlagendaten	31, 55	passive Sicherheit	17, 18
Heckaufprall-Crashtests	74	PC-CRASH	173
Impuls	92, 97	Pfahlaufprall	109, 121
Impulserhaltungssatz	100, 103	physikalisches Pendel	112, 120
Impulsgleichungen	134, 157	Pkw/Fußgängerkollision	66, 68, 76
Impulssatz	97	plastischer Stoß	89
Impuls-Spiegelverfahren	158	Plausibilitätsprüfung	183
In Depth-Unfalluntersuchungen (InDepth, In-Depth)	33	polizeiliche Unfallerhebungen, Unfallaufnahme	32
In-Crashphase=Crashphase	18	Post-Crashphase (Post Crash-Phase)	18
indirekte Krafteinwirkung	27	Pre-Crashphase (Pre Crash-Phase) .	18
Individualrisiko	16	PREFU	174
innere Kräfte	91	Primaranprall .	64
Intrusion	46	Primarerhebungen	32
Intrusionsgeschwindigkeit	46	Rastpolbahn	81
Kinematik	79	Reaktionskräfte	90
Kinematische Diagramme	86	Rechtsprechung	29, 39, 41
kinematische Betrachtung	134, 136	rechnerisch-analytische	
Klassifizierung der Unfallfolgen	50	Unfallrekonstruktion	145, 146
klassische Stoßtheorie	95	rechnerisch-numerische	
Kollisionsarten	19, 22, 61	Unfallrekonstruktion	145, 146
Kollisionsarten-Matrix	23	reduzierte Pendellänge	113
Kollisionsgeschwindigkeit	44	Regelkreis	13
Kollisionsphase	18, 30	Restitution	102
Kollisionstypen	19, 22, 61	Restitutionskoeffizient, Stoßziffer, Stoßzahl	
Kompression	101		45, 89, 100, 104
Kontrollmöglichkeiten	153	retrospektive Erhebungen	32, 35
Korrelation (AIS i A von DV)	52	Rhomboïd-Schnittverfahren	167
Kraftmessung .	86	Richtungshypothese	97
Kraftgleichungen	144	Risiko	14
Kraftrechnung	90, 112, 152	Risikokompensation	15
Lebensbedrohung	53	Rückprallgeschwindigkeit	45
Legalitätsprinzip	33	Rückwärts-Unfallrekonstruktion	144, 147
Letalitätsrate	52, 53	Rupturen	28
MAIS	64	Rutschweite	133
Massenpunkt	144	Schaden	14
Massenträgheitsmoment	94	Scheibe	144
Massenträgheitstensor	93	schiefer exzentrischer Stoß	103
mittlere Verzögerung	48	schiefer Stoß	94
Momentanpol	80, 124, 127	Schutzkriterien	78
monetäre Verletzungsfolgen	54	Schutzsysteme	27
Nachfahren von Unfällen	61, 146	Schwerpunktsatz	92

9 Sachwortverzeichnis

schwerwiegende Unfälle	33	Unfallaufnahme	29
Sehnenverletzungen	28	Unfalldaten	31
Seitenaufprall-Crashtests	73, 75	Unfalldatenspeicher	154
Seitenkollision, Seitenaufprall	67, 128	Unfälle mit Personenschäden	33
Sekundaranprall	64	Unfallerhebungen am Unfallort	34
Sekundarerhebungen	32	Unfallerhebungen	29
Sicherheit	15, 17	Unfallfolgen	50
Sicherheitsforschung	29, 55	Unfallfolgenschwere	43, 44, 50
Sicherheitsmaßnahmen	57	Unfallforschung	29, 55
Sicherheitstests	71	Unfallgut	36
SMAC	172	Unfallhäufigkeit	21
statische Deformation	87	Unfallkenngröße	44, 53
Statistisches Bundesamt	43	Unfallkomponente	30
Steinerscher Satz. .	125, 132	Unfallmechanik	79
Stoffgesetze	94	Unfallphasen	18
Stoßantrieb	99	Unfallrekonstruktion	29, 39, 143
Stoßarten	95	Unfallschwere	43, 44, 66
Stoßdauer	97, 117	Unfallstatistik	56
Stoßgleichungen	144	Unfallsystematik	13
Stoßhypothesen	96	Unfalltyp	19
Stoßmittelpunkt	120	ungeschützter Verkehrsteilnehmer	.27
Stoßrechnung	94, 118	unmittelbare Erhebungen	32
Stoßstellung	96	Variation von Parametern	150, 183
Stoßtheorie	95	Verbrennungen	28
Stoßzahl	102	Verhakungshypothese	97, 125
Stoßzahlhypothese	96, 129	Verletzte	57
Stoßziffer, Stoßzahl, Restitionskoeffizient		Verletztenrate	58
	45, 89, 100, 102, 140	Verletzungarten	27, 68
Straßenverkehrsunfall	19	Verletzungsfolgekosten	54
Streubreiten	182	Verletzungsschwere	51, 63, 66, 68
Streuung	54, 67, 69, 70	Verletzungursachen	28
stumpfe Gewalt	27	Verzogerungs-Substitutions-Methode	181
subjektives Risiko, subjektive Sicherheit	15	Vorwärts-Unfallrekonstruktion	143, 150
Summenhäufigkeit	64	Weichteilverletzungen	28
Tangentialkomponenten-Verfahren	181	Wurfweiten	69, 136
Tangentialstoßantrieb	104, 150, 151	zentrischer Stoß	95
teilplastischer Stoß	89	Zweimassenschwinger	115
Todesursachen	16		
Tragheitsradius	165		
Überschlag	62		
Umsturztest Reisebusse	75		
Unbekannte, Festlegung	141		
Unfall	19		
Unfallanalyse	29, 42, 56		
Unfallart	19		
Unfallaufklärung	29, 39		