

Martin Böhme

Potentiale passiver Sicherheit in Frontalcrashes

Kopfbelastungen bei geringer
und Vorderwagenoptimierung für
große Überdeckung

AutoUni – Schriftenreihe

Band 142

Reihe herausgegeben von/Edited by
Volkswagen Aktiengesellschaft
AutoUni

Die Volkswagen AutoUni bietet Wissenschaftlern und Promovierenden des Volkswagen Konzerns die Möglichkeit, ihre Forschungsergebnisse in Form von Monographien und Dissertationen im Rahmen der „AutoUni Schriftenreihe“ kostenfrei zu veröffentlichen. Die AutoUni ist eine international tätige wissenschaftliche Einrichtung des Konzerns, die durch Forschung und Lehre aktuelles mobilitätsbezogenes Wissen auf Hochschulniveau erzeugt und vermittelt.

Die neun Institute der AutoUni decken das Fachwissen der unterschiedlichen Geschäftsbereiche ab, welches für den Erfolg des Volkswagen Konzerns unabdingbar ist. Im Fokus steht dabei die Schaffung und Verankerung von neuem Wissen und die Förderung des Wissensaustausches. Zusätzlich zu der fachlichen Weiterbildung und Vertiefung von Kompetenzen der Konzernangehörigen fördert und unterstützt die AutoUni als Partner die Doktorandinnen und Doktoranden von Volkswagen auf ihrem Weg zu einer erfolgreichen Promotion durch vielfältige Angebote – die Veröffentlichung der Dissertationen ist eines davon. Über die Veröffentlichung in der AutoUni Schriftenreihe werden die Resultate nicht nur für alle Konzernangehörigen, sondern auch für die Öffentlichkeit zugänglich.

The Volkswagen AutoUni offers scientists and PhD students of the Volkswagen Group the opportunity to publish their scientific results as monographs or doctor's theses within the "AutoUni Schriftenreihe" free of cost. The AutoUni is an international scientific educational institution of the Volkswagen Group Academy, which produces and disseminates current mobility-related knowledge through its research and tailor-made further education courses. The AutoUni's nine institutes cover the expertise of the different business units, which is indispensable for the success of the Volkswagen Group. The focus lies on the creation, anchorage and transfer of new knowledge.

In addition to the professional expert training and the development of specialized skills and knowledge of the Volkswagen Group members, the AutoUni supports and accompanies the PhD students on their way to successful graduation through a variety of offerings. The publication of the doctor's theses is one of such offers. The publication within the AutoUni Schriftenreihe makes the results accessible to all Volkswagen Group members as well as to the public.

Reihe herausgegeben von/Edited by

Volkswagen Aktiengesellschaft

AutoUni

Brieffach 1231

D-38436 Wolfsburg

<http://www.autouni.de>

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/15136>

Martin Böhme

Potentiale passiver Sicherheit in Frontalcrashs

Kopfbelastungen bei geringer
und Vorderwagenoptimierung für
große Überdeckung

Martin Böhme
AutoUni
Wolfsburg, Deutschland

Zugl.: Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2019

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse der im Rahmen der AutoUni – Schriftenreihe veröffentlichten Doktorarbeiten sind allein die der Doktorandinnen und Doktoranden.

ISSN 1867-3635

ISSN 2512-1154 (electronic)

AutoUni – Schriftenreihe

ISBN 978-3-658-28602-6

ISBN 978-3-658-28603-3 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-28603-3>

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020

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

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung.....	1
2 Verletzungen von Fahrzeuginsassen in Frontalunfällen	5
2.1 Verletzungshäufigkeiten der einzelnen Körperregionen	5
2.2 Verletzungshäufigkeiten in verschiedenen Aufprallkonstellationen	7
2.2.1 Große Überdeckung	7
2.2.2 Geringe Überdeckung.....	7
2.2.3 Verletzungen der Körperregionen bei geringer Überdeckung	9
3 Crashtests und Verletzungskennwerte für Kopfverletzungen.....	13
3.1 Crashtests zur Abbildung von Frontalunfällen	13
3.1.1 Etablierte High Speed Crashtests	13
3.1.2 High Speed Crashtests mit geringer Überdeckung	14
3.2 Kopfverletzungen	19
3.2.1 Verletzungsmechanismen.....	20
3.2.2 Messgrößen zur Bewertung der Verletzungswahrscheinlichkeit	22
3.3 Kopfverletzungskriterien in High Speed Crashtests.....	34
3.3.1 Korrelationen zwischen CSDM und BRIC	35
3.3.2 Vergleich der Kopfbelastungen in den einzelnen Crashtests	44
3.3.3 Ursachen erhöhter Belastungswerte	47
3.3.4 Oblique Crashes mit THOR-Dummy.....	52
3.4 Zusammenfassung der Erkenntnisse zu Kopfverletzungen	57
4 Maßnahmen zur Verringerung der Brustverletzungsgefahr	61
4.1 Brustverletzungen.....	61
4.1.1 Brustverletzungsmechanismen.....	61
4.1.2 Messwerte zur Bewertung der Verletzungswahrscheinlichkeit	62
4.2 Einfluss des Fahrzeugs auf die Brustverletzungswahrscheinlichkeit	63
4.2.1 Das Occupant Load Criterion (OLC) zur Bewertung des Fahrzeugpulses ..	63
4.2.2 Einfluss des Fahrzeugs auf das OLC.....	67
4.2.3 Optimierte Pulse zur Verringerung des OLC	71
4.3 Der degressive Vorderwagen.....	73
4.3.1 Einfluss der Längsträger auf die Verzögerung des Fahrzeugs	74
4.3.2 Methoden der Pulsvariation.....	77
4.3.3 Pulsvariation anhand parametrisierter Beschleunigungs-Weg-Kurven	78
4.3.4 OLC-optimierter Puls bei 56 km/h Aufprallgeschwindigkeit	85
4.3.5 OLC-optimierter Puls bei 50 km/h Aufprallgeschwindigkeit	96
4.3.6 Robustheit der Optimierung	98

4.4 Komponentenversuche mit degressiven Längsträgern.....	100
4.4.1 Fallturmversuche an Längsträgerprofilen mit Verstärkungsplatten.....	103
4.4.2 Rollwagenversuche mit Längsträgerprofilen und Deformationselementen	105
4.5 Degressive Längsträger im Bauraum eines Serienfahrzeugs	110
4.5.1 Konstruktion Variante 1	110
4.5.2 Simulation der Konstruktion Variante 1	113
4.5.3 Konstruktion des Versuchsträgers.....	115
4.5.4 Karosserieversuch 1	116
4.5.5 Karosserieversuch 2	120
4.5.6 Simulation der Insassenbelastung in den Karosserieversuchen	123
4.6 Zusammenfassung der Erkenntnisse zum degressiven Vorderwagen	125
5 Fazit.....	129
6 Ausblick	133
Glossar.....	135
Literaturverzeichnis.....	137
Anhang	145

Abkürzungsverzeichnis

AIS	Abbreviated Injury Scale
AUC	Area Under Curve
BES	Barrier Equivalent Speed
BRIC	Brain Rotational Injury Criterion
CCIS	Co-operative Crash Injury Study
CFC	Channel Frequency Class
CIREN	Crash Injury Research and Engineering Network
CSDM	Cumulative Strain Damage Measure
DAI	Diffus Axional Injury (Diffus axonale Verletzung)
DDM	Dilatational Damage Measure
DIVA	Digitale Versuchsauswertung (Software)
Euro NCAP / US NCAP / China NCAP	European / United States / China New Car Assessment Programme
FWRB / FW	Full Width Rigid Barrier Test
GIDAS	German In-Depth Accident Study
HIC	Head Injury Criterion
IIII (50 %)	<i>Hybrid III</i> -Dummy (50 %: 50. Perzentil der männlichen Bevölkerung)
IIHS	Insurance Institute for Highway Safety
MAIS	Maximum Abbreviated Injury Scale
MKS	Mehr-Körper-Simulation
MPV	Multi-Purpose Vehicle (Van)
MVC	Motor Vehicle Crash
NAP	Nine Accelerometer Package
NASS	National Automotive Sampling System
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
NTDB	National Trauma Data Bank
ODB	Offset Deformable Barrier Test
OLC	Occupant Load Criterion
PEsTo	Pulse Estimation Tool
RMDM	Relativ Motion Damage Measure
ROC	Receiver Operating Characteristic
SAE	Society of Automotive Engineers
SIMon	Simulated Injury Monitor
SO	Small Overlap Crash (IIHS)
SOI	Small Overlap Impact (NHTSA)
UCDBM	University College Dublin Brain Model
WSTC	Wayne State Tolerance Curve

1 Einleitung

Es gehört zur Natur des Menschen, sich fortzubewegen, und man kann davon ausgehen, dass damit seit jeher Verletzungen verbunden sind. Beim Laufen kann man umknicken, beim Reiten kann man stürzen. Heutzutage sind Fahrzeuge aller Art entscheidender Bestandteil menschlicher Fortbewegung. Und anders als bei Menschen oder (Reit-) Tieren kann man bei Fahrzeugen Einfluss auf ihre Konstruktion nehmen und damit auch auf Verletzungsgefahren, die von ihnen ausgehen. Dazu versucht man typische Unfälle aus dem Straßenverkehr in repräsentativen Labortests abzubilden, mit denen man die Sicherheitsmaßnahmen von Fahrzeugen bewerten kann.

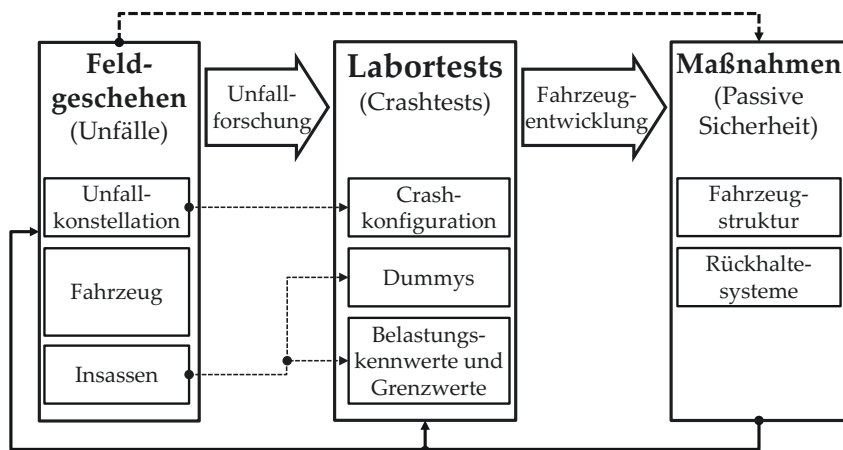


Abbildung 1-1 Ablauf zur Verringerung von Verletzungen im realen Unfallgeschehen durch Labortests und Maßnahmen im Rahmen der Fahrzeugentwicklung

In Abbildung 1-1 sind die Unfälle und dadurch auftretende Verletzungen im Straßenverkehr als sogenanntes **Feldgeschehen** dargestellt. Für das Entstehen von Verletzungen gibt es dabei drei Einflussfaktoren. Einer davon ist die **Unfallkonstellation**, die beschreibt, wie der Unfall abgelaufen ist. Das beinhaltet z.B.

- welches Fahrzeug verunfallt, z.B. PKW, LKW, Motorrad,
- womit es kollidiert, z.B. andere Fahrzeuge, Fußgänger oder feste Hindernisse,
- welcher Bereich des Fahrzeugs getroffen wird, also Front, Seite oder Heck,
- die Größe und Richtung der Fahrzeugdeformation, z.B. eine schmale Deformation von schräg vorn oder eine frontale Deformation der gesamten Fahrzeugbreite,
- und wie schwer der Unfall ist, d.h. welche Energie während des Zusammenpralls umgewandelt wurde (Kramer et al. 2013).

Der zweite wichtige Faktor ist das **Fahrzeug**. Es bildet die Verbindung zwischen der aus der Unfallkonstellation resultierenden äußeren Belastung und dem Insassen. Es muss die

kinetische Energie des Aufpralls durch plastische Deformation umwandeln. Dabei müssen die auftretenden Verzögerungen gering gehalten und der Überlebensraum des Insassen gesichert werden, um Verletzungen zu vermeiden. Wie gut dies gelingt, hängt sowohl vom Kollisionsobjekt als auch davon ab, wo das Fahrzeug getroffen wird. In unterschiedlichen Bereichen des Fahrzeugs resultieren aus einer gegebenen Energie unterschiedliche Deformationen.

Der dritte Einflussfaktor ist der **Insasse** selbst. Sein Alter, sein Geschlecht, seine Größe, sein Gewicht, seine körperliche Verfassung aber auch seine Position im Fahrzeug beeinflussen, welche Verletzungen in einer bestimmte Unfallkonstellation in einem bestimmten Fahrzeug auftreten.

All diese Faktoren führen dazu, dass jeder Unfall ein zufälliges, nicht reproduzierbares Einzelereignis ist. Für das Entwerfen, Optimieren und Testen von Sicherheitsmaßnahmen in der Fahrzeugentwicklung sind Unfälle somit nicht geeignet. Deshalb hat die **Unfallforschung** die Aufgabe, diese Einzelereignisse zu analysieren, zu kategorisieren und zu quantifizieren. Hinsichtlich der **Unfallkonstellation** wird beispielsweise der Aufpralltyp durch die Angabe der Überdeckung in Prozent der Fahrzeugbreite und die Unfallschwere anhand der Geschwindigkeitsänderung quantifiziert. Die Steifigkeit (bzw. das Verhältnis zwischen Fahrzeugdeformation und umgewandelter Energie) von **Fahrzeugen** wird in Crashtests ermittelt oder aus Realunfällen mittels Mehr-Körper-Simulation rekonstruiert. Bezüglich der **Insassen** werden Alter, Größe, Geschlecht und Körpergewicht protokolliert. Die Verletzungen werden anhand ihrer Schwere klassifiziert. Dabei ist die am häufigsten verwendete Systematik die Abbreviated Injury Scale (AIS, Gennarelli et al. 2005), die Einzelverletzungen nach ihrer Letalität von AIS 1 (leichte Verletzung) bis AIS 6 (medizinisch nicht behandelbar) einstuft. Auch die Verletzungsursachen werden im Rahmen der Unfallforschung untersucht. Anhand dieser Daten ist es möglich, die häufigsten Verletzungen zu ermitteln und zuzuordnen, in welchen Konstellationen, mit welchen Fahrzeugen und bei welchen Insassen diese vorwiegend auftreten.

Um Fahrzeuge daraufhin zu entwickeln, eben diese Verletzungen zu vermeiden, benötigt man repräsentative, wiederholbare Ersatzlastfälle. Im Falle der Frontalkollisionen sind dies **Crashtests** mit Fahrzeugen und anthropometrischen Testpuppen, besser bekannt als **Dummys**. Dabei wird die Crashkonfiguration – also der Auftreffbereich des Fahrzeugs, das Kollisionsobjekt, die Richtung des Aufpralls und die Crashgeschwindigkeit – entsprechend den Erkenntnissen aus der Unfallforschung eingestellt. Ein Beispiel für die Entwicklung eines Crashtests ist in Lowne 1994 anhand des ODB Crashes (Offset Deformable Barrier) beschrieben.

Zusätzlich zur Abbildung der äußeren Belastung des Fahrzeugs durch die Crashkonfiguration ist auch eine Abbildung des Insassen durch **Dummys** notwendig. Sie müssen die Bandbreite möglicher Insassen im Feldgeschehen in Gewicht, Größe und Statur repräsentieren. Bei Menschen treten Verletzungen vorwiegend als konkretes Symptom auf - Knochen brechen, es kommt zu Blutungen oder Organverletzungen usw. In Dummys werden hingegen kontinuierliche physikalische Größen gemessen, aus denen man auf die Verletzungswahrscheinlichkeit beim Menschen schließen kann. Der Zusammenhang zwischen den gemessenen **Belastungswerten** am Dummy und der Verletzungswahrscheinlichkeit beim Menschen wird über Versuche an Freiwilligen, Leichen oder Tieren sowie in Simu-

lationen ermittelt. Dabei ist zu beachten, dass kein Dummy geeignet ist, das Verhalten des Menschen in jeder Belastungsart wiederzugeben. Daher werden beispielsweise für Front-, Seiten- und Heckcrashes unterschiedliche Dummies eingesetzt. Sie weisen die für den Einsatzzweck notwendigen Beweglichkeiten und Messstellen auf, können aber nicht ohne weiteres in Crashkonfigurationen eingesetzt werden, für die sie nicht entwickelt wurden.

Für die am Dummy gemessenen Belastungskennwerte werden außerdem **Grenzwerte** festgelegt. Diese sollen einerseits geringstmögliche Verletzungswahrscheinlichkeiten sicherstellen, andererseits aber auch nicht zu unverhältnismäßigen Maßnahmen führen. Zu diesem Zweck werden vom Gesetzgeber die erwarteten volkswirtschaftlichen Kosten einer Sicherheitsmaßnahme denen der damit vermeidbaren Verletzungen gegenübergestellt. Ein Beispiel einer solchen Cost-Benefit-Analyse zeigten Edwards et al. (2007).

Wenn Crashkonfiguration, Dummy und Grenzwerte für den Labortest festgelegt wurden, können diese für die Fahrzeugentwicklung genutzt werden um Maßnahmen zu entwickeln und ihre Wirksamkeit zu prüfen. Diese betreffen die **Fahrzeugstruktur**, welche die kinetische Energie des Aufpralls durch Deformation umwandeln soll und das **Rückhaltesystem**¹, das die auftretende Verzögerung des Fahrzeugs möglichst schonend auf den Insassen übertragen soll. Optimalerweise sollten die Maßnahmen zu verringerten Belastungskennwerten und auch zu weniger Verletzungen im Feldgeschehen führen. Da es sich bei Crashtests aber um eine Vereinfachung des realen Unfallgeschehens handelt, kann es vorkommen, dass Maßnahmen im Labortest, nicht jedoch in realen Unfällen wirksam sind. Der betreffende Crash sollte dann dahingehend verfeinert werden, dass die Wirkmechanismen des Crashtests denen des Feldgeschehens mehr angenähert werden. In Einzelfällen kann es auch möglich sein, unwirksame Maßnahmen direkt aus den Beobachtungen der Unfallforschung zu ermitteln und zu korrigieren.

Der Weg zur Verringerung von Verletzungen im Straßenverkehr führt also von der präzisen Beobachtung und Wiedergabe des Feldgeschehens über die Entwicklung von Labortests, die dieses möglichst genau abbilden können, hin zu Maßnahmen, die wiederum in den entwickelten Ersatzlastfällen möglichst gute Ergebnisse erzielen. Auch in der Crashdisziplin „Frontalcrash“, die schon am längsten durch Gesetze und Verbraucherschutztests berücksichtigt wird, gibt es heute noch viele Verletzte und Tote im Feldgeschehen. Aus diesem Grund sollen in dieser Arbeit Potentiale zur Verbesserung der Insassensicherheit in Frontalcrashes untersucht werden und zwar über den gesamten Bereich des eben beschriebenen Weges. Dabei wird zunächst untersucht, ob die im Feldgeschehen beobachteten Kopfverletzungen in Frontalunfällen mit geringer Überdeckung durch einen neuen Crashtest und einen neuen Belastungskennwert abgebildet werden können. Dies ist die erste Voraussetzung, um wirkungsvolle Maßnahmen entwickeln zu können. Im zweiten Teil werden Brustverletzungen thematisiert, die durch etablierte Crashtests und Belastungskennwerte bereits gut abgebildet werden können. Das Hauptaugenmerk liegt daher auf einer Maßnahme an der Fahrzeugstruktur, welche den Geschwindigkeitsabbau im Crash so verändern soll, dass sich die Brustbelastung des Insassen verringert.

¹ Im engeren Sinne umfasst das Rückhaltesystem den Sicherheitsgurt und die Airbags. Im weiteren Sinne gehören auch Bauteile dazu, die darauf ausgelegt sind, beim Unfall mit dem Insassen in Kontakt zu kommen, z.B. Sitze, Instrumententafel, Fußstütze, Pedalerie etc.

Systeme der aktiven Sicherheit zur Vermeidung von Unfällen werden in dieser Arbeit nicht betrachtet. Trotz ihres unbestrittenen Potentials wird es aufgrund des Reifegrads und der Verbreitung dieser Systeme noch lange Zeit Unfälle geben. Maßnahmen der passiven Sicherheit zur Verringerung der Unfallschäden sind daher weiterhin sinnvoll und nötig.

2 Verletzungen von Fahrzeuginsassen in Frontalunfällen

2.1 Verletzungshäufigkeiten der einzelnen Körperregionen

Gemäß Abbildung 1-1 ist zunächst das Feldgeschehen zu analysieren. Es muss die Frage geklärt werden, welche Verletzungen im realen Unfallgeschehen auftreten.

Laut einer Auswertung der deutschen In-Depth Unfalldatenbank GIDAS (German In-Depth Accident Study), die repräsentative Unfälle in zwei Regionen Deutschlands (Raum Dresden und Hannover) auswertet und zu jedem Unfall bis zu 3000 Daten aufnimmt, sind die häufigsten Verletzungen in frontalen Unfällen Kopf-, Brust- und Beinverletzungen (Anhang A1). Ähnliche Ergebnisse sind auch in der Literatur zu finden.

In (Richards et al. 2010) wurden Verletzungen in Fahrzeug-Fahrzeug-Kollisionen in der britischen In-Depth-Datenbank CCIS (Cooperative Crash Injury Study) untersucht. Auch hier gehörten Thorax- und Beinverletzungen zu den häufigsten Verletzungen. Kopfverletzungen hingegen waren relativ selten. In (Edwards 2009) wurde diese Diskrepanz ebenfalls festgestellt. Als Begründung wurde der höhere Anteil an alten Fahrzeugen in GIDAS genannt. Der Anteil der Kopfverletzungen der Schwere AIS3+ ist verglichen mit weniger schweren Kopfverletzungen bei erstzugelassenen Fahrzeugen zwischen 1995 und 2001 etwa doppelt so hoch, wie bei Fahrzeugen mit Erstzulassungen zwischen 2002 und 2008. Hinzu kommt, dass im CCIS ältere Fahrer überrepräsentiert sind. Sie haben durchschnittlich mehr Thoraxverletzungen und weniger Kopfverletzungen als jüngere Menschen, sodass sich das Verhältnis in Richtung einer höheren Anzahl an Thoraxverletzungen verschiebt. Cuerden et al. (2007) zeigten einerseits, dass die häufigsten Verletzungen vorderer Insassen an Kopf, Thorax und Beinen auftreten. Andererseits zeigten sie auch, dass Unfälle bei denen der Kopf die höchste Verletzungsschwere aller Körperregionen aufwies, meist tödlich sind. Tritt die höchste Verletzungsschwere hingegen an den Beinen auf, überlebt der Insasse meist. In (Frampton et al. 2006) betrug der Anteil der Kopfverletzungen bei getöteten Insassen 62 %, der Anteil an Brustverletzungen 87 %.

In einer US-amerikanischen Studie zum Einfluss von Rückhaltesystemen wurden zwischen 1988 und 2004 35 333 Verletzte aus PKW-Unfällen untersucht. In Unfällen, in denen der Gurt angelegt war und solchen, in denen auch der Airbag auslöste, waren Thorax- und Beinverletzungen am häufigsten, gefolgt von Kopfverletzungen. Das Fahrzeugalter wurde für die Untersuchung jedoch nicht eingeschränkt und die Unfallkonfiguration war nicht auf Frontalcrashes beschränkt (Cummins et al. 2008).

In (Ryb et al. 2010) wurde untersucht, wie repräsentativ Crashtest-Ratings des Insurance Institute for Highway Safety (IIHS) für die Verletzungswahrscheinlichkeit im Feldgeschehen sind. Die geringste Wahrscheinlichkeit eines tödlichen Unfalls trat dabei in gut bewerteten Fahrzeugen (IIHS-Bewertung „Good“) auf, die höchste durchschnittliche Verletzungsschwere hingegen in mangelhaft bewerteten Fahrzeugen (IIHS-Bewertung „Poor“). Unabhängig vom erzielten Testergebnis waren auch hier Verletzungen der Beine und des Thorax (AIS3+) die häufigsten. Dritthäufigste Verletzungen waren wiederum die

Kopfverletzungen, wobei Abdomenverletzungen und Verletzungen der oberen Extremitäten nur geringfügig seltener auftraten. Die Vergleichbarkeit zur Untersuchung in GIDAS ist jedoch beschränkt, da fast 40 % der Insassen nicht angeschnallt waren. Carroll et al. (2009) bestätigten den hohen Anteil von Thoraxverletzungen an schweren und tödlichen Verletzungen. In (O'Brien-Mitchell et al. 2009) wurden Feldunfälle aus der CIREN-Datenbank (Crash Injury Research and Engineering Network) bestehenden Crashtestverfahren zugeordnet, um zu ergründen, welche Verletzungen in welcher Konfiguration auftreten. Obwohl es nicht expliziter Teil der Veröffentlichung war, lässt sich aus den angegebenen Daten errechnen, dass bei Betrachtung aller Unfälle die häufigsten AIS3+-Verletzungen an den unteren Extremitäten auftraten, gefolgt von Thorax- und Kopfverletzungen. Zu ähnlichen Schlussfolgerungen kamen Loo et al. (1996), wobei Verletzungen der unteren Extremitäten nur dann häufiger als Kopf- und Brustverletzungen waren, wenn kein Airbag ausgelöst wurde. Brumbelow et al. (2009) untersuchten 96 schwer und tödlich Verletzte in Frontalcrashs mit Fahrzeugen, die im IIHS-Frontalcrash eine gute Bewertung erhielten. Die meisten AIS3+-Verletzungen traten an Kopf und Brust auf, die unteren Extremitäten wurden jedoch nicht mit betrachtet.

Tabelle 2-1 Quellen zu Verletzungen nach Körperregionen

Quelle	Daten-basis	Verlet-zungs-schwere	Häufigkeit nach Körperregion absteigend
(Richards et al. 2010) (Edwards 2009)	CCIS	AIS2+/ AIS3+	Thorax – untere Extremitäten - Abdomen
(Carroll et al. 2009)	CCIS	AIS3+	Thorax – untere Extremitäten – Kopf
(Cuerden et al. 2007)	GIDAS	AIS2+	Thorax – untere Extremitäten - Kopf
(Frampton et al. 2006)	CCIS	AIS3+	Thorax – Kopf
(Cummins et al. 2008)	NTDB	AIS3+	untere Extremitäten – Thorax - Kopf
(Ryb et al. 2010)	CIREN	AIS3+	untere Extremitäten – Thorax - Kopf
(O'Brien-Mitchell et al. 2009)	CIREN	AIS3+	untere Extremitäten – Thorax - Kopf
(Loo et al. 1996)	200 MVC Patients ²	ISS16+ ³	Thorax – Kopf – untere Extremitäten
(Brumbelow et al. 2009)	NASS	AIS3+	Kopf – Brust – Abdomen Extremitäten nicht betrachtet

Auch wenn sich die Ergebnisse der Studien im Detail unterscheiden, kann geschlussfolgert werden, dass Verletzungen des Kopfes, der Brust und der unteren Extremitäten am häufigsten auftreten. Die Auswertung der GIDAS-Datenbank führt zu demselben Ergebnis. Bezüglich der Todesursachen spielen Verletzungen der unteren Extremitäten eine untergeordnete Rolle und werden im Folgenden nicht weiter betrachtet.

² 200 Patienten, die nach einem Autounfall (Motor Vehicle Crash – MVC) in ein Traumazentrum eingeliefert wurden.

³ ISS – Injury Severity Score: Entspricht der Summe der Quadrate der AIS der drei am stärksten verletzten Körperregionen. Bsp.: Kopf AIS3, Brust AIS2 und Extremitäten AIS2 entspricht ISS17.

2.2 Verletzungshäufigkeiten in verschiedenen Aufprallkonstellationen

Nachdem bekannt ist, welche Verletzungen am häufigsten auftreten, gilt es zu ermitteln, in welchen Unfällen bzw. unter welchen äußeren Belastungen sie auftreten. Eines der wichtigsten Unterscheidungskriterien ist dabei die Überdeckung, also der Anteil der Fahrzeugfront, die bei einem Unfall getroffen wird.

2.2.1 Große Überdeckung

Bei einer breiten Überdeckung von mindestens 50 % der Fahrzeugbreite wird mindestens einer der Längsträger deformiert und auch darüber hinaus große Teile des Vorderwagens. Durch die breite Abstützung sind Deformationen der Fahrgastzelle seltener als bei schmalerer Überdeckung. Es treten jedoch hohe Deformationskräfte und somit starke Verzögerungen auf. Die Folge sind erhöhte Kräfte im Rückhaltesystem, die zu Verletzungen führen können. Sind die Rückhaltekräfte hingegen zu gering, um den Insassen ausreichend zurückzuhalten, kann es zu Kollisionen mit Interieurteilen kommen.

Dies stellten z.B. O'Brien-Mitchell et al. (2009) bei der Untersuchung von 290 Frontalunfällen der CIREN-Datenbank fest. Vor allem bei Unfällen mit größerer Schwere als in den etablierten Crashtests kam es zu Kopf- und Brustverletzungen durch Kontakt mit dem Lenkrad und der Instrumententafel – dies jedoch unabhängig von der Überdeckung. Der Anteil der Verletzungen, die durch den Gurt oder den Airbag ausgelöst wurden, war jedoch in den Unfällen, die eine geringere Schwere als die etablierten Tests hatten, genauso groß wie in Unfällen mit höherer Schwere als in den etablierten Tests. Conroy et al. (2008) zeigten einen signifikant höheren Anteil an Kopfverletzungen bei großer Überdeckung (>41 cm). Dabei war der Anteil der Verletzungen durch Kontakt mit dem vorderen Interieur größer als bei geringerer Überdeckung (statistisch nicht signifikant). Auch Brumelow et al. (2009) stellten eine besonders hohe Anzahl an Brustverletzungen in Crashes mit voller Überdeckung fest. Im europäischen Forschungsprojekt Cover wurde bei steigender Überdeckung ein steigender Anteil an Torsoverletzungen (Brust und Abdomen) festgestellt (Carroll et al. 2009).

2.2.2 Geringe Überdeckung

Seit einiger Zeit liegt besonderes Augenmerk der Unfallforschung auf Unfällen mit geringer Überdeckung. Dabei werden die Längsträger, die durch ihre Konstruktion und Materialwahl auf hohe Deformationskräfte hin ausgelegt wurden, nicht vollständig getroffen. Die Bauteile, die weiter außen liegen, wie das Radhaus und der Kotflügel, weisen einen geringeren Widerstand gegen Deformation auf. Es kommt daher zu größeren Deformationen, die auch die Fahrgastzelle betreffen können. Durch die einseitige Krafteinleitung kann es außerdem zu einer Rotation des Fahrzeugs kommen. Dies birgt zusätzliches Verletzungspotential, wenn der Insasse beispielsweise den Airbag verfehlt oder gegen seitliche Interieurteile geschleudert wird.

Anteil an Frontalunfällen

Eichberger et al. (2007) werteten die angegebenen Überdeckungen in Frontalunfällen in drei unterschiedlichen Datenbanken aus: Jeweils **ein Drittel** der Fahrzeug-Fahrzeug-

Unfälle wiesen eine Überdeckung von unter 30 % auf, wobei der Anteil der Fahrzeug-Fahrzeug-Unfälle an allen Frontalunfällen bei sechs bis neun Prozent lag. Die Verwendung der in den Datenbanken angegebenen Überdeckung ermöglicht die Auswertung vieler Unfälle. Dabei kann aber nicht sichergestellt werden, dass nur die Unfälle ausgewählt werden, in denen der Längsträger kaum oder gar nicht deformiert wurde. So stellten Lindquist et al. (2004) fest, dass die Angaben zur Überdeckung in Frontalunfällen häufig zu hoch ausfallen. Der Bereich des Fahrzeugs, der durch den direkten Kontakt mit dem Hindernis deformiert wird, ist meist nicht scharf konturiert. Vor allem Teile der Außenhaut (Frontklappe, Stoßfängerabdeckung, Kotflügel etc.) werden auch in Bereichen deformiert, die nicht direkt getroffen werden. Von den äußerlichen Beschädigungen auf die tatsächlich getroffenen Bauteile bzw. die Überdeckung zu schließen kann daher zu Ungenauigkeiten führen. Durch eine Detailanalyse der deformierten Bauteile in Realunfällen stellten sie fest, dass nur in 23 % der tödlichen Unfälle einer oder beide Längsträger und der Antriebsstrang als Deformationspotenzial genutzt wurden. **48 %** entfielen hingegen auf Unfälle mit geringer Überdeckung (unter 30 %) bei denen der Antrieb nicht als Deformationspotential genutzt wurde.

Brumbelow et al. (2009) untersuchten 116 Unfälle der NASS-Datenbank (National Automotive Sampling System) mit Fahrzeugen, die im IIHS-Frontalcrash (ODB mit 64 km/h) die höchste Sicherheitsstufe „Good“ erreicht hatten. Die Mindestverletzungsschwere lag bei AIS3, wobei Verletzungen der Extremitäten ausgenommen waren, da diese selten lebensgefährlich sind. Der Anteil der Unfälle, bei denen die Deformation außerhalb der Längsträger auftrat, lag bei **24 %** (23 von 96 Insassen). Der Anteil war damit genauso hoch wie der der Unfälle, die vergleichbar mit dem ODB Crash waren. In (Sherwood et al. 2009a) wurden 21 Small Overlap Unfälle untersucht. Von den betroffenen Fahrzeugen erzielten sieben die Frontcrashbewertung „Good“, fünf die zweitbeste Bewertung „Acceptable“, vier die Bewertung „Marginal“ und zwei Fahrzeuge erhielten die schlechteste Bewertung „Poor“. Die drei verbleibenden Fahrzeuge waren nicht getestet worden. Als Ergebnis wurde ein hoher Anteil von Verletzungen des Kopfes, der Brust und der unteren Extremitäten festgestellt. Außerdem wurde ein Zusammenhang zwischen der Gesamtverletzungsschwere und der Intrusion aufgezeigt.

O'Brien-Mitchell et al. (2009) fanden heraus, dass von 290 Frontalcrashes der CIREN-Datenbank 86 % einem bekannten Testverfahren eines Gesetzgebers, einer Verbraucherschutzorganisation oder eines Herstellers entsprachen. Die meisten Unfälle wurden dem vollüberdeckten 0°-Frontalcrash (FWRB Abbildung 3-1) zugeordnet, gefolgt vom linksseitigen Offset Crash. Bei den verbleibenden **14 %** handelte es sich vorwiegend um Unfälle mit geringer Überdeckung. Bean et al. (2009) untersuchten 122 tödlich Verletzte in Frontalcrashes und ordneten ihnen primäre und sekundäre Todesursachen zu. Eine geringe Überdeckung oder ein schräger Anprall waren die zweithäufigsten Ursachen nach zu hoher Crashschwere oder Anomalien (beispielsweise schwere Zweitkollision oder ungewöhnliche Anprallgegner).

Ein Unfall mit geringer Überdeckung (Small Overlap) zeichnet sich dadurch aus, dass die wichtigsten Bauteile zur Energieabsorption im Frontalcrash, die Längsträger, nicht deformiert werden. In den meisten Studien wurde die Einteilung der Crashkonfigurationen entweder anhand der Deformationscodierung oder durch Einzelfallbewertung vorgenommen. Ersteres ist hinsichtlich der Längsträgerdeformation sehr fehlerbehaftet, da meist nur

das äußere Schadensbild dokumentiert wird. Eine Einzelfallauswertung ist sehr zeitaufwendig und führt dadurch nur zu kleinen Fallzahlen. Sullivan et al. (2008) stellten eine Methode vor, welche die Position der Längsträger anhand der Fahrzeugbreite und der Spurbreite der Räder ermittelt. Für verschiedene Fahrzeugklassen wurden diese Parameter ermittelt und somit eine Position der Längsträger nach Fahrzeugklassen definiert. In Kombination mit den in der Datenbank angegebenen Deformationsbereichen wurden dann acht Crashkonfigurationen definiert. Scullion et al. (2010) verwendeten dieses Schema zur Auswertung der NASS-Datenbank mit Fahrzeugen der Baujahre 1985-2008. Für diese Untersuchung standen damit 26 162 klassifizierte Unfälle zur Verfügung von denen 1118 Small Overlap Crashes waren (unter Berücksichtigung der Fallgewichtungsfaktoren der Datenbank entspricht dies einem Anteil von **6,6 %**). Damit waren Small Overlap Unfälle seltener als vollüberdeckte oder Offset-Unfälle. Laituri et al. (2015) ermittelten mit der gleichen Methode einen Anteil von **11,8 %** (AIS2+) für Unfälle mit Fahrzeugen der Baujahre 1998-2013.

Halloway et al. (2011) widmeten sich dem Problem, dass einige Small Overlaps durch eine vorwiegend seitliche Deformation im Bereich des Kotflügels fälschlicherweise als Seitencrash klassifiziert werden. Sie kombinierten Unfälle mit einem Aufprallwinkel zwischen 320° und 40° mit einer nach hinten abnehmenden seitlichen Deformation des Fahrzeugs. Zusammen mit den Unfällen, die durch Frontdeformation eindeutig als Small Overlap gekennzeichnet waren und den Frontalunfällen, die ähnlich wie bei Scullion et al. (2010) über die Position der Längsträger klassiert wurden, ergab sich eine Häufigkeit des Small Overlap Crashes von **13,6 %** aller Unfälle bzw. **11,5 %** wenn man die Gewichtungsfaktoren der NASS-Datenbank berücksichtigt.

2.2.3 Verletzungen der Körperregionen bei geringer Überdeckung

Zahlreiche Studien haben sich außerdem damit beschäftigt, ob bei geringer Überdeckung eine erhöhte Verletzungsgefahr gegenüber anderen Crashkonfigurationen besteht. In der eben genannten Studie von Scullion et al. (2010) lag beispielsweise keine höhere Verletzungswahrscheinlichkeit vor. Bezogen auf AIS2+ Verletzungen war sie sogar am geringsten. Da jedoch Fahrzeuge ab einem Baujahr von 1985 betrachtet wurden, sind die Ergebnisse nicht direkt auf aktuelle Fahrzeuge übertragbar. Auch in einer australischen Studie von Logan et al. (2007) konnten keine unterschiedlichen Verletzungswahrscheinlichkeiten für den Kopf, die Brust und die Wirbelsäule (AIS2+) in Abhängigkeit von der Überdeckung gefunden werden. Frampton et al. (2004) konnte bei 653 Frontalunfällen der CCIS-Datenbank keinen statistisch signifikanten Einfluss der Überdeckung auf die Häufigkeit von Brust-, Oberschenkel- sowie Fuß- und Knöchelverletzungen feststellen. Rudd et al. (2011) wiederum verglichen Small Overlap Unfälle mit Offset-Unfällen. Signifikant unterschiedliche Häufigkeiten bei Verletzungen einer Körperregion traten dabei nicht auf. Padmanaban et al. (2008) stellten bei Frontalcrashes gegen schmale Objekte (bis 30 cm Breite) einen hohen Anteil an Kopfverletzungen (AIS3+) fest, wobei die Häufigkeit vergleichbar mit anderen Frontalcrashkonfigurationen war. (Pintar et al. 2008) untersuchten 71 Eckanprällen und Crashes mit geringer Überdeckung. Die meisten Verletzungen traten im Bereich der unteren Extremitäten, der Brust und des Kopfes auf. Ein Vergleich mit anderen Crashkonfigurationen wurde jedoch nicht durchgeführt.

Brumbelow et al. (2009) stellten hingegen eine erhöhte Häufigkeit von Kopfverletzungen in Konfigurationen mit geringerer Überdeckung (Center Pole, Small Overlap, Moderate Overlap) fest. Im Bereich der unteren Extremitäten wurde nur die Beckenregion in die Auswertung einbezogen. Die meisten Verletzungen traten dort in Crashes mit geringer Überdeckung auf (Small Overlap). Aufbauend auf diese Untersuchung wurden in (Sherwood et al. 2009a) Unfälle mit geringer Überdeckung untersucht. Obwohl Verletzungen der unteren Extremitäten kein Auswahlkriterium für die Stichprobe waren, traten sie am zweit- (AIS2+) bzw. dritthäufigsten (AIS3+) auf. Auch Logan et al. (2007) ermittelten in Unfällen mit geringer Überdeckung eine größere Häufigkeit von Verletzungen der unteren Extremitäten (von Becken bis Fuß) verglichen mit vollüberdeckten Unfällen. Padmanaban et al. (2008) ermittelten ebenfalls, dass Verletzungen der unteren Extremitäten in Frontalcrashes gegen schmale Objekte (bis 30 cm Breite) häufiger waren als in anderen Konfigurationen.

Hallman et al. (2011) untersuchten die unterschiedlichen Verletzungen bei Frontalcrashes mit geringer und großer Überdeckung (mehr als ein Drittel der Fahrzeugbreite). Dazu werteten sie angegurtete vordere Insassen sowohl aus der NASS- als auch aus der CIREN-Datenbank aus. Die Verletzungshäufigkeiten bei geringer Überdeckung waren größer als bei größerer Überdeckung. Einzige Ausnahme war der Bereich der unteren Extremitäten, der im Gegensatz zu vielen anderen Studien eine geringere Verletzungswahrscheinlichkeit aufwies. Allerdings wurde der Hüft- und Beckenbereich in dieser Studie als eine separate Körperregion betrachtet.

Einen Zusammenhang zwischen einer hohen Intrusion und einem erhöhten Anteil an Brustverletzungen sahen Brumbelow et al. (2009) in Unfällen mit geringer Überdeckung. Grundlage waren jedoch nur 23 Insassen aus Unfällen der NASS-Datenbank mit Fahrzeugen, die die IIHS-Frontcrashbewertung „Good“ erhalten hatten. Scullion et al. (2010) ermittelten, dass die häufigsten Verletzungen (AIS2+) in schmal überdeckten Unfällen an den unteren Extremitäten und am Kopf auftraten. Ein erhöhtes Brustverletzungsrisiko gab es nicht.

Kopfverletzungen durch Rotation des Fahrzeugs

In (Bean et al. 2009) wurden bei tödlich Verletzten in Frontalunfällen mit seitlichem Aufprall ebenfalls beobachtet, dass die Längsträger nicht beaufschlagt wurden und es dadurch zu hohen Intrusionen kam. Darüber hinaus sorgte der seitliche oder schräge Anprall dafür, dass sich einige Insassen seitlich am Airbag vorbeibewegten und dessen Schutzpotenzial nicht nutzen konnten. Zusammen führte dies zu vielen tödlichen Kopfverletzungen. Durch die teils massive Verringerung des Überlebensraums waren aber auch alle anderen Körperregionen betroffen. Ähnliches beobachteten Hallman et al. (2011) bei Unfällen mit geringer Überdeckung. Im Bereich des Kopfes, des Halses und der Brust traten besonders häufig Verletzungen auf, die einen Kontakt mit dem Fahrzeuginterieur nahelegen. Sie traten jedoch nicht nur bei starken Intrusionen auf, was wiederum auf die Bewegung des Insassen im rotierenden Fahrzeug zurückzuführen sein kann.

Auch bei O'Brien-Mitchell et al. (2009) wurde bei Unfällen mit geringer Überdeckung eine erhöhte Anzahl von Kopfverletzungen festgestellt, die durch Kontakt mit der Seitenstruktur des Fahrzeugs hervorgerufen wurde. Als mögliche Gründe wurden eine starke Fahrzeugrotation und daraus resultierende seitliche Bewegung des Insassen im Fahrzeug