

# Intelligente Rückhaltesysteme

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 52

**bast**

# Intelligente Rückhaltesysteme

von  
Volker Schindler  
Matthias Kühn  
Hagen Siegler

Technische Universität Berlin,  
ILS-Kraftfahrzeuge

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 52

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M- Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BASt-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 82.217/2001:**  
Intelligente Rückhaltesysteme

### Projektbetreuung

Eberhard Faerber

### Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

### Redaktion

Referat Öffentlichkeitsarbeit

### Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven  
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0  
Telefax: (04 71) 9 45 44 77  
Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)

ISSN 0943-9307

ISBN 3-86509-192-X

Bergisch Gladbach, November 2004

## Kurzfassung – Abstract

### Intelligente Rückhaltesysteme

Die schnell fortschreitende Entwicklung der Sensortechnologie und der Aktuatorik bietet Ansätze für neuartige Rückhaltesysteme und kann somit den Schutz des Insassen bei Unfällen erheblich verbessern. Kommende Generationen adaptiver Rückhaltesysteme werden eine dosierte Aktivierung der Schutzwirkung (z. B. mehrstufige Airbags oder Gurtstraffer) abhängig von der Unfallschwere und der Fahrzeugbesetzung erlauben. Um solche Systeme voll auszunutzen, werden Sensoren entwickelt, welche die Schwere eines Unfalls in weit- aus höherer Auflösung als bisher erkennen können und somit das Einleiten adaptiver Maßnahmen ermöglichen. Diese Systeme werden unter dem Begriff der intelligenten oder adaptiven Rückhaltesysteme zusammengefasst.

Ziel des Projektes „Intelligente Rückhaltesysteme“ ist es, die möglichen Verbesserungen der passiven Sicherheit durch die neuen Technologien zu analysieren und darzustellen. Außerdem sind die Auswirkungen auf die gesetzlichen Regelungen zu untersuchen, um so mögliche zusätzliche Schutzpotenziale schnell umzusetzen und eventuelle Risiken zu vermeiden.

In einer umfangreichen Literaturrecherche wurde zum einen das Unfallgeschehen analysiert. Ergänzend wurden die Schwerpunkte des Pkw-Unfallgeschehens durch eine Auswertung von Unfalldaten der GIDAS untersucht und dargestellt. Zum anderen wurde der Stand der Technik heutiger und zukünftiger Rückhaltesysteme aufgearbeitet und systematisiert. Dabei wurden die bestehenden und zukünftigen Systeme in ihrer Funktionsweise analysiert und durch ein 3-Ebenen-Modell charakterisiert.

Mit Hilfe des Abgleichs der Schwerpunkte des realen Unfallgeschehens mit den RHS und der bestehenden Gesetzgebung wurden Potenziale und Wirkungsbereiche möglicher Maßnahmen skizziert. Auf der Basis einer Expertenbefragung konnten der Entwicklungsstand der iRHS aufgezeigt und Vorschläge zur Erweiterung der bestehenden Sicherheitsgesetzgebung gemacht werden.

### Intelligent restraint systems

The rapid development in sensor technology and actuators offers chances for developing novel restraint systems and could therefore considerably improve protection of vehicle occupants in accidents. Future generations of adaptive restraint systems will permit graduated activation of protection systems (e.g. multi-stage airbag or seat-belt tightening systems), depending on the severity of the accident and the number of occupants in the vehicle. In order to exploit such systems to the full, sensors are being developed which can recognise the severity of an accident far more accurately than previously and which consequently would make it possible for adaptive measures to be introduced. These systems are grouped under the term intelligent or adaptive restraint systems.

The aim of the “intelligent restraint systems” project is to analyse and present improvements in passive safety which would be possible due to the new technologies. It also aims to investigate the effects on the legal regulations so that any additional potential for protection can be implemented rapidly and any risks which may exist can be avoided.

An extensive literature research was conducted; one of the areas which was focused on in this research was accident occurrence. Further investigation into the main areas of car accident occurrence was then carried out by assessing GIDAS accident data; the results of this investigation were then presented. The research also focused on and systematised the state-of-the-art of present and future restraint systems. The way in which current and future systems function was analysed and portrayed using a 3-level model.

The potential and effects of possible measures were outlined, based on a comparison of the main areas of real accident occurrence with the restraint systems and the existing legislation. A survey of experts was carried out and used to show the state of development of intelligent restraint systems and to make proposals for extending existing safety legislature.



## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	7	<b>4</b>	<b>Reales Unfallgeschehen und mögliche Schutzpotenziale durch iRHS</b> .....	62
<b>2</b>	<b>Das Unfallgeschehen</b> .....	7	<b>5</b>	<b>Gesetzgebung</b> .....	67
2.1	Deutschland 2000 – Angaben des Statistischen Bundesamtes .....	9	5.1	Abgleich der bestehenden Gesetzgebung mit den Erfordernissen des realen Unfallgeschehens .....	67
2.2	Bisherige Unfalldatenerhebungen .....	12	5.1.1	Frontalaufprall .....	67
2.2.1	Der Frontalaufprall .....	13	5.1.2	Seitenaufprall .....	69
2.2.2	Der Seitenaufprall .....	15	5.1.3	Heckaufprall .....	71
2.2.3	Der Heckaufprall .....	17	5.2	Vorschläge zur Erweiterung der Sicherheitsgesetzgebung .....	72
2.2.4	Der Fahrzeugüberschlag .....	17	<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	77
2.2.5	Kompatibilität .....	17	<b>7</b>	<b>Literatur</b> .....	78
2.2.6	Sekundärkollision .....	17			
2.2.7	Verhaltensweisen/Altersstruktur .....	17			
2.3	GIDAS-Unfalldatenauswertung .....	18			
2.3.1	Umgebung .....	19			
2.3.2	Unfallkonstellation .....	20			
2.3.3	Personen .....	27			
<b>3</b>	<b>Rückhaltesysteme</b> .....	36			
3.1	RHS – Stand der Technik .....	36			
3.1.1	Systematisierung der Funktionsweise von RHS .....	39			
3.1.2	Das Gurtsystem .....	42			
3.1.3	Das Frontairbagsystem .....	43			
3.1.4	Das Seitenairbagsystem .....	46			
3.1.5	Kinderrückhaltesysteme .....	48			
3.1.6	Potenziale existierender RHS .....	49			
3.2	Intelligente Rückhaltesysteme – iRHS .....	50			
3.2.1	Systematisierung der Funktionsweise von iRHS .....	50			
3.2.2	Gurtsysteme .....	52			
3.2.3	Adaptive Frontairbagsysteme .....	52			
3.2.4	Adaptive Seitenairbagsysteme .....	56			
3.2.5	Systeme zum Schutz bei Fahrzeugüberschlägen .....	57			
3.2.6	Übergeordnete Sicherheitssysteme .....	58			
3.2.7	Allgemeine Einschätzung der Situation .....	59			



## 1 Einleitung

Die schnell fortschreitende Entwicklung der Sensortechnologie und der Aktuatorik verhalf neuartigen Rückhaltesystemen zum Durchbruch und kann somit den Schutz des Insassen bei Unfällen erheblich verbessern. Weitere Verbesserungen werden von der Einführung neuartiger Sensoren (z. B. Pre-Crash-Sensorik) und anderer aktiver Systeme erwartet. Diese Systeme werden unter dem Begriff der intelligenten Rückhaltesysteme zusammengefasst.

Dieser Trend in der Sicherheitsgesetzgebung hat sich auch in dem Gesetzesvorschlag zur Überarbeitung des amerikanischen Kraftfahrzeugsicherheitsstandards FMVSS 208 niedergeschlagen. Hier zeigt sich die natürliche Entwicklungsrichtung im Sicherheitsbereich, die Unfallrealität in ihrer Vielfältigkeit immer genauer abzubilden. Vor allem sind es die Verletzungen, hervorgerufen durch Out-Of-Position-Konstellationen von Fahrer und Beifahrer im Kraftfahrzeug, sowie die Ausweitung der Gültigkeit der biomechanischen Belastungsgrenzen auf die drei genormten Erwachsenendummygrößen, denen der Gesetzesvorschlag der FMVSS 208 mit neuartigen Testanforderungen begegnet.

Kommende Generationen adaptiver Rückhaltesysteme werden eine dosierte Aktivierung der Schutzwirkung (z. B. mehrstufige Airbags oder Gurtstraffer) abhängig von der Unfallschwere und der Fahrzeugbesetzung erlauben. Um solche Systeme voll auszunutzen, werden Sensoren entwickelt,

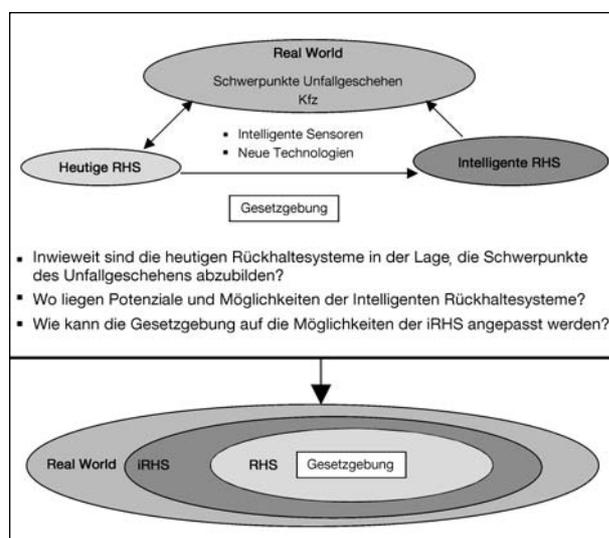
welche die Schwere eines Unfalls in weitaus höherer Auflösung als bisher erkennen können und somit das Einleiten präventiver Maßnahmen ermöglichen.

Ein weitaus größeres Schutzpotenzial werden in naher Zukunft Systeme bieten, die das Unfallrisiko durch eine Bewertung des eigenen Fahrzustandes und die Beobachtung der Fahrzeugumgebung erkennen. Der Fahrzustand wird über die Auswertung vorhandener Daten aus fahrdynamischen Regelsystemen (z. B. ABS, ESP, Bremsassistent) beurteilt. Die Fahrzeugumgebung wird mit Hilfe von Radar/LIDAR und/oder bildverarbeitenden Sensoren bewertet. Vorbeugende Maßnahmen, die durch diese Systeme eingeleitet werden können, sind zum Beispiel eine adaptive Gurtstraffung, eine Sitz- und Lenkradverstellung oder ausfahrbare Schutzpolster. All diese Maßnahmen werden in Abhängigkeit von der zu erwartenden Unfallkonstellation (Kollisionsparameter, Unfallart,  $\Delta v$ , Anstoßstelle etc.) und der Fahrzeugbesetzung aktiviert. In einer Gefahrensituation wird dann eine entsprechende präventive Maßnahme zum Insassenschutz eingeleitet. Es ist also notwendig, die Anzahl und die Position der Insassen zu bestimmen, sowie deren Größe, Massen und Alter, um entsprechend angepasste Aktionen einzuleiten. Des Weiteren können auch Maßnahmen zur Konditionierung eines Fahrzeuges im Vorfeld eines Unfalls eingeleitet werden. Hier können automatisch Seitenscheiben und das Schiebedach geschlossen werden. Es werden aber auch Systeme realisierbar, die Steifigkeitseigenschaften des Fahrzeugvorbaus gezielt beeinflussen.

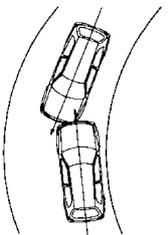
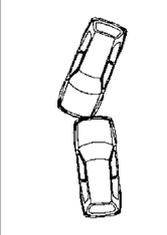
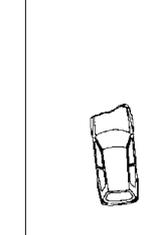
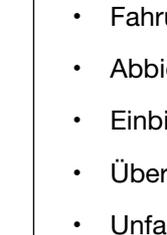
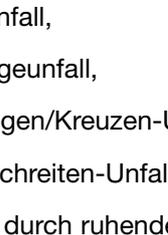
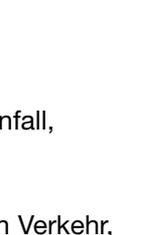
Ziel des Projektes ist es, die möglichen Verbesserungen der passiven Sicherheit durch die neuen Technologien zu analysieren und darzustellen. Außerdem sind die Auswirkungen auf die gesetzlichen Regelungen zu untersuchen, um so einerseits mögliche zusätzliche Schutzpotenziale schnell umzusetzen und eventuelle Risiken zu vermeiden.

## 2 Das Unfallgeschehen

Um mit Statistiken und Ergebnissen von Unfalldatenerhebungen richtig umzugehen und sie inhaltsgetreu zu interpretieren, ist es wichtig, die verwendeten Begriffe zu definieren. In Bild 2.0 werden die Begriffe zur Strukturierung des Unfallgeschehens näher erläutert.



**Bild 1.1:** Verdeutlichung des Vorgehens und der Ziele des Projektes

Unfallart	Unfalltyp	Kollisionsart	Kollisionstyp	Aufprallart	Aufpralltyp
Unfallablauf, Bewegungsrichtung der Beteiligten	Situation des Verkehrsablaufes	Betroffene Kollisionskontrahenten	Stellung der Kollisionskontrahenten vorher	Lage der Beschädigung am Fahrzeug	Detailliertes Beschädigungsmuster
					
Gegenverkehrsunfall, Unfallart 4	Unfall im Längsverkehr	Pkw-Pkw-Kollision	schräge Frontalkollision mit 50 % Offset	Frontalaufprall	11FYMW3 30 % (VDI)

**Bild 2.0:** Strukturierung des Unfallgeschehens in der Unfallerhebung und Unfallforschung am Beispiel eines Pkw-Unfalls [APPEL, KRABBEL, 1994]

## Unfallart

Die Unfallart beschreibt die Bewegungsrichtung der beteiligten Fahrzeuge zueinander beim ersten Zusammenstoß auf der Fahrbahn oder, wenn es nicht zum Zusammenstoß gekommen ist, die erste mechanische Einwirkung auf einen Verkehrsteilnehmer. Es wird in 10 Unfallarten unterschieden:

- Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das anfährt, anhält oder im ruhenden Verkehr steht,
- Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das vorausfährt oder wartet,
- Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das seitlich in gleicher Richtung fährt,
- Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das entgegenkommt,
- Zusammenstoß mit anderem Fahrzeug, das einbiegt oder kreuzt,
- Zusammenstoß zwischen Fahrzeug und Fußgänger,
- Aufprall auf ein Hindernis auf der Fahrbahn,
- Abkommen von der Fahrbahn nach rechts/links,
- Unfall anderer Art.

## Unfalltyp

Der Unfalltyp beschreibt die Konfliktsituation, die zum Unfall führte, d. h. die Phase des Verkehrsgeschehens, in der ein Fehlverhalten oder eine sonstige Ursache den weiteren Ablauf nicht mehr kontrollierbar machte. Im Gegensatz zur Unfallart geht

es also beim Unfalltyp nicht um die Beschreibung der wirklichen Kollision, sondern um die Art der Konfliktauslösung vor diesem Zusammenstoß. Es wird in sieben Unfalltypen unterteilt:

- Fahrrunfall,
- Abbiegeunfall,
- Einbiegen/Kreuzen-Unfall,
- Überschreiten-Unfall,
- Unfall durch ruhenden Verkehr,
- Unfall im Längsverkehr,
- sonstiger Unfall.

## Kollisionsart

Mit den Kollisionsarten werden die Unfälle zwischen den einzelnen Kollisionskontrahenten, unabhängig von Verursachungszuweisung und Beteiligungsreihenfolge, wie dies in der Bundesstatistik ausgewiesen ist, gekennzeichnet.

## Kollisionstyp

Mit Hilfe der Kollisionstypen wird die Unfallsituation innerhalb einer Kollisionsart hinsichtlich der geometrischen Gegebenheiten und des Deformationsverhaltens der beteiligten Strukturen beschrieben. Das heißt, der Kollisionstyp beschreibt die Stellung der Fahrzeuge im Moment der ersten Berührung.

## Aufprallart

Die Aufprallart beschreibt die Unfallsituation des einzelnen Kollisionsobjektes, d. h., sie beschreibt die Unfallsituation eines einzelnen Unfallbeteiligten. Es wird unterschieden in:

- Frontalaufprall,
- Seitenaufprall
- Heckaufprall,
- Überschlag.

## Aufpralltyp

Der Aufpralltyp spezifiziert die Aufprallart. Es ist für die Kinematik und die Belastungen der Insassen von entscheidender Bedeutung, in welchem Bereich und in welchem Ausmaß das Fahrzeug beim Aufprall beschädigt wird. So kann zum Beispiel die

Unterscheidung der Deformationsbereiche des Fahrzeugs mit Hilfe des Fahrzeug-Deformationsindex (VDI nach CDC) erreicht werden. Es werden der Grad der Überdeckung und die Lage der Deformation gekennzeichnet. Der Aufpralltyp wird sowohl für das Kollisionsobjekt als auch für den Kollisionskontrahenten angegeben [Statistisches Bundesamt, 2001], [KRAMER, 1998], [APPEL, 1994].

## 2.1 Deutschland 2000 – Angaben des Statistischen Bundesamtes

Die Zahl der Getöteten auf deutschen Straßen ging von 19.193 im Jahre 1970 auf 7.503 im Jahr 2000 zurück. Dies entspricht 39 % der im Jahr 1.970 Getöteten. Auch in den letzten zehn Jahren ist diese abnehmende Tendenz erkennbar. Sie wird in Bild 2.1 deutlich. Es ist ein Rückgang bei den Getöteten von 11.300 im Jahr 1991 auf 7.503 im Jahr 2000 und bei den schwer Verletzten von 131.093 auf 102.416 zu verzeichnen. Die Gesamtzahl der Verunglückten bleibt jedoch deutlich über 500.000. Diese Zahlen gewinnen umso mehr an Bedeutung, wenn man berücksichtigt, dass der Pkw-Bestand auf 284 % und der Gesamtfahrzeugbestand auf 254 % im Vergleich zum Jahr 1970 angestiegen ist. Auch die Fahrleistungen der Fahrzeuge haben sich im Vergleich zu 1970 verdreifacht.

Betrachtet man die Verunglückten nach Art der Verkehrsbeteiligung, ergibt sich die in Bild 2.2 dargestellte Tendenz. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei Pkw-Unfällen mit hohem Abstand die meisten Verunglückten zu verzeichnen sind. Fahrradunfälle, Unfälle mit motorisierten Zweirädern und Unfälle mit Nutzkraftfahrzeuge folgen auf den nächsten Plätzen. Bezieht man jedoch die Verunglücktenzahlen auf den Fahrzeugbestand, so ist festzustellen, dass es bei Pkw-Unfällen zu 140 getöteten Personen pro einhunderttausend Pkw kommt. Bei den Nkw-Unfällen kommt es jedoch zu 670 getöteten Personen pro einhunderttausend Nkw. Auch auf die jährliche Fahrleistung bezogen liegt der Pkw mit 10 getöteten Personen pro Mrd. Pkw-km besser als der Lkw mit 20 Getöteten pro Mrd. km Fahrleistung. Leider ist aus den vorhandenen Quellen keine Unterscheidung zwischen Nutzkraftfahrzeugen mit einem Gesamtgewicht bis zu 3,5 t und entsprechenden Fahrzeugen mit einem Gesamtgewicht von mehr als 3,5 t zu treffen. Somit sind diese Zahlen nur bedingt für die Klasse der Nutzkraftfahrzeuge bis 3,5 t gültig. Es ist also aus diesen Zahlen für die Klasse der Kleintransporter wie den

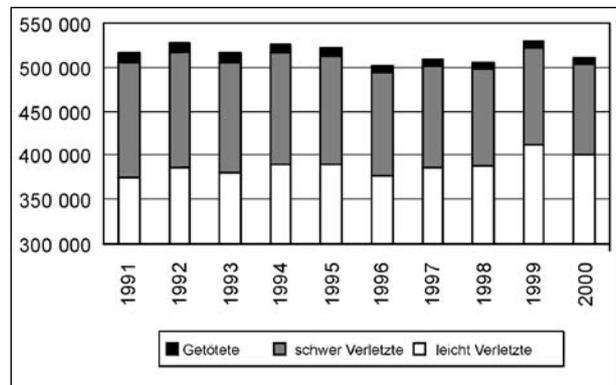


Bild 2.1: Verunglückte im Verkehrsunfallgeschehen

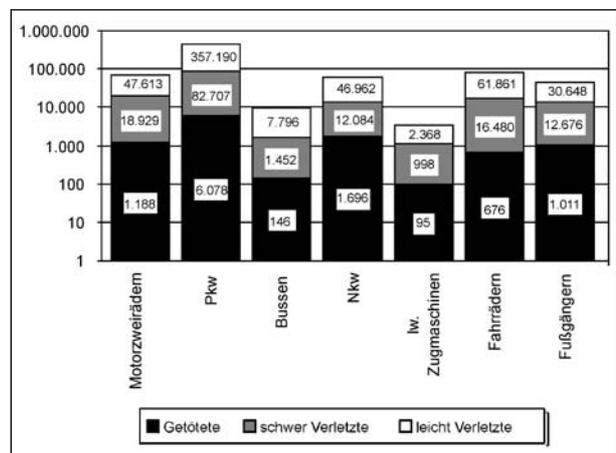


Bild 2.2: Unfälle nach Art der Verkehrsbeteiligung

VW T4 oder den Mercedes Benz Vito nicht auf Ähnlichkeiten im Unfallgeschehen mit Pkw zu schließen.

Die in Bild 2.2 genannten Zahlen enthalten Mehrfachnennungen, da an einem Unfall mehrere Verkehrsteilnehmer beteiligt sein können. Die hier als Nutzkraftfahrzeuge bezeichneten Fahrzeuge werden vom Statistischen Bundesamt als Güterkraftfahrzeuge geführt.

In den Bildern 2.3 und 2.4 werden die Unterschiede zwischen Unfällen mit Personenschaden innerorts und außerorts deutlich. Bei Unfällen innerhalb geschlossener Ortschaften werden 83,6 % der Personen leicht verletzt, 15,7 % der Personen werden schwer verletzt und 0,6 % der Beteiligten werden getötet. Außerhalb geschlossener Ortschaften werden 71 % der Beteiligten leicht verletzt, 26 % schwer verletzt und 2,7 % getötet. Ein Vergleich zeigt deutlich die Verschiebung hin zu schwereren Unfällen außerhalb geschlossener Ortschaften.

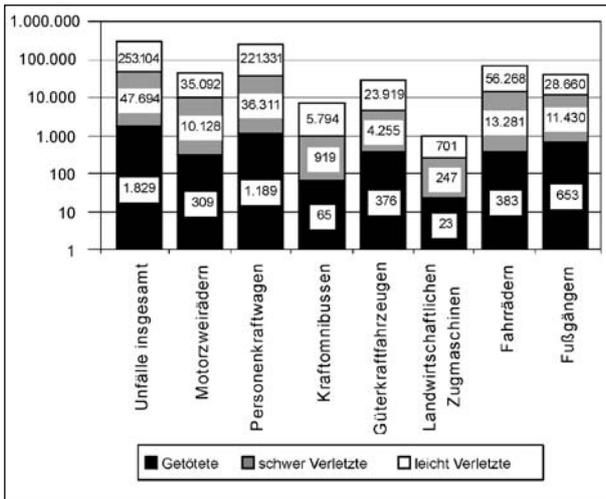


Bild 2.3: Unfälle mit Personenschaden innerorts

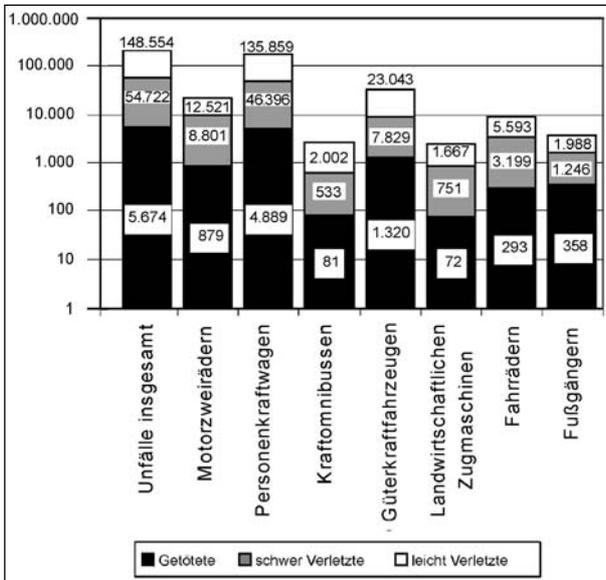


Bild 2.4: Unfälle mit Personenschaden außerorts

Die gleiche Tendenz lässt sich auch für den Pkw aufzeigen. So werden innerorts 85,5 % der Beteiligten im Pkw-Unfall leicht verletzt, 14 % schwer und 0,46 % werden getötet. Außerorts werden nur noch 72 % der beteiligten Personen leicht verletzt, 24,8 % schwer und 2,6 % der Beteiligten werden getötet.

Insgesamt werden außerorts 3,1 Mal mehr Personen getötet als innerorts. Bezogen auf den Pkw werden außerorts sogar 4,1 Mal mehr Verkehrsteilnehmer getötet als innerorts. Grund hierfür sind das höhere Geschwindigkeitsniveau der Fahrzeuge außerorts und die vorhandene Infrastruktur (z. B. Alleen).

Für den Güterkraftverkehr ergeben sich für die leicht Verletzten keine signifikanten Unterschiede

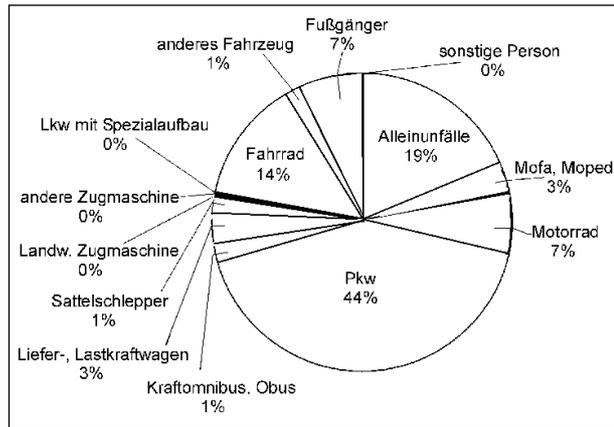


Bild 2.5: Unfallgegner von Pkw mit Personenschaden

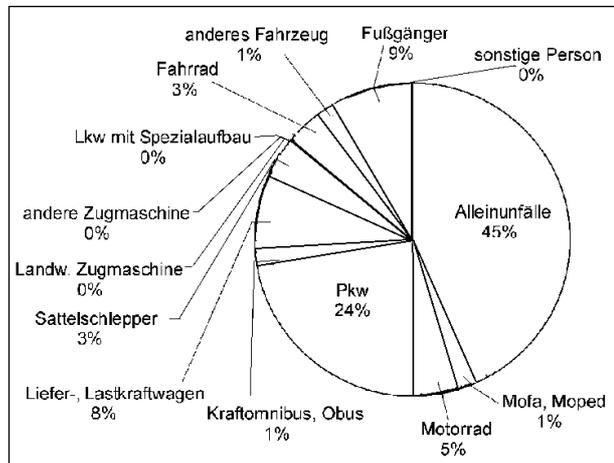
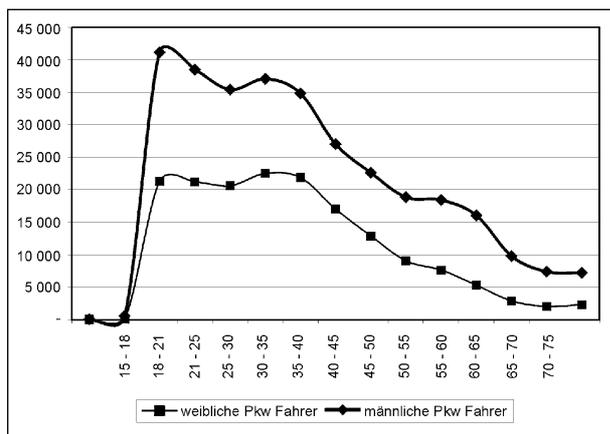


Bild 2.6: Getötete Unfallgegner von Pkw

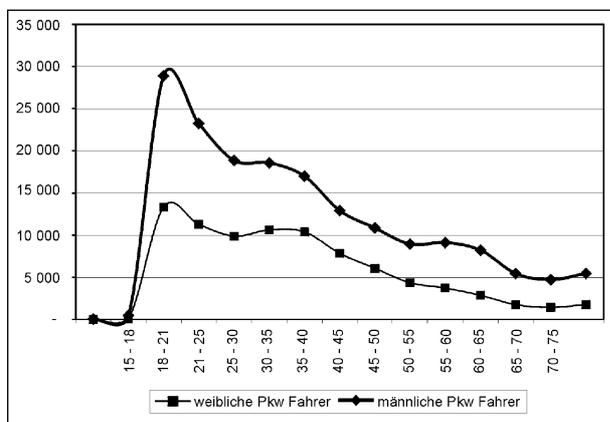
zwischen Unfällen innerhalb und außerhalb geschlossener Ortschaften. Außerorts werden allerdings 3,5 Mal mehr Personen getötet als innerorts.

Es zeigt sich also auch hier deutlich die Verschiebung hin zu schwereren Unfällen außerorts.

In den Bildern 2.5 und 2.6 sind die Unfallgegner der Pkw dargestellt. Betrachtet man nur die Getöteten, so ist der Alleinunfall mit 45 % dominierend. Gefolgt wird er durch den Pkw-Pkw-Unfall mit 24 %. Der Fußgänger-Pkw-Unfall rangiert mit 9 % immerhin an dritter Stelle. Das Bild wandelt sich, wenn man die Unfälle mit Personenschaden, also alle Unfälle inklusive der Getöteten betrachtet. Hier ist der Pkw mit 44 % der häufigste Kollisionspartner des Pkw. An zweiter Stelle mit 19 % folgt der Alleinunfall. An dritter Stelle liegen hier gleich auf mit jeweils 7 % der Fußgänger und der Motorradfahrer als Unfallgegner des Pkw. Es ist allerdings deutlich zu erkennen, dass der Alleinunfall des Pkw die höchste Unfallfolgeschwere hervorruft. Unter Alleinunfall werden alle Unfälle des Pkw verstanden,



**Bild 2.7:** Beteiligte an Verkehrsunfällen nach Alter und Geschlecht

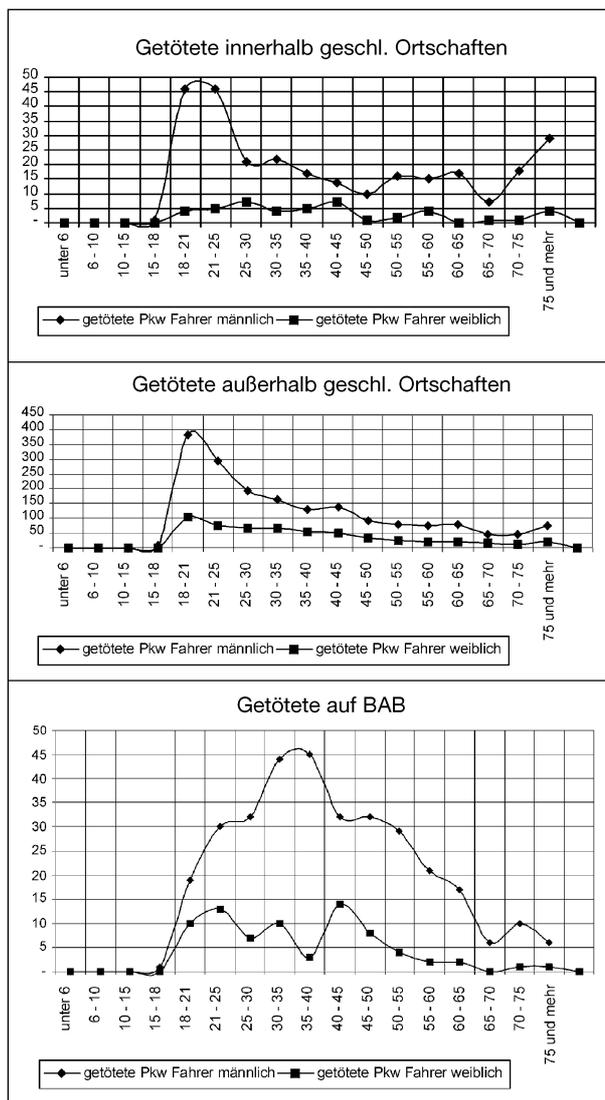


**Bild 2.8:** Hauptverursacher von Verkehrsunfällen

an dem kein anderer Verkehrsteilnehmer beteiligt war. Er beinhaltet also unter anderem den Baumunfall und das Abkommen des Fahrzeugs von der Straße. Speziell der dabei häufig auftretende Pfahlaufprall wird derzeit durch kein eigenes gesetzliches Testverfahren abgedeckt.

Betrachtet man nun den Pkw-Unfallfahrer genauer, so kann man feststellen, dass männliche Fahrer deutlich öfter an Unfällen beteiligt sind als weibliche Fahrer. Eine Spitze in der Beteiligung an Verkehrsunfällen ist hier bei den 18–21-jährigen männlichen Fahrern zu sehen. Generell sind die 18–40-jährigen Fahrer besonders häufig an Verkehrsunfällen beteiligt. Bei den Frauen, die zwar deutlich weniger häufig an Verkehrsunfällen beteiligt sind als die Männer, kann man aber auch für die 18–40-jährigen Fahrerinnen eine besonders häufige Beteiligung an Verkehrsunfällen feststellen.

Bei den Hauptverursachern von Verkehrsunfällen bilden wiederum die 18–21-jährigen männlichen Fahrer die Spitzengruppe. Fahrerinnen verursachen im Vergleich dazu deutlich weniger Verkehrs-



**Bild 2.9:** Getötete Pkw-Fahrer nach Geschlecht, Alter und Ortslage

unfälle. Auch bei ihnen bilden die 18–21-jährigen Fahrerinnen die Risikogruppe, wenn auch bei weitem nicht so deutlich wie bei den jungen männlichen Pkw-Fahrern.

Es ist allerdings zu bedenken, dass hier die absolute Zahl der am Straßenverkehr teilnehmenden männlichen und weiblichen Pkw-Fahrer nicht berücksichtigt wurde. Da außerdem keine Zahlen über die Dauer des Führerscheinbesitzes in den jeweiligen Altersgruppen zu entnehmen waren, ist eine Bewertung bezüglich des von bestimmten Personengruppen getragenen Risikos nicht durchführbar.

Bringt man nun die Ortslage mit dem Geschlecht und dem Alter der getöteten Pkw-Fahrer in Verbindung, so ergibt sich der in Bild 2.9 dargestellte Verlauf. Qualitativ ähneln sich die Kurven für die inner-

orts und außerorts getöteten männlichen und weiblichen Pkw-Fahrer. Die männlichen 18–25-Jährigen sind die am häufigsten getöteten Pkw-Fahrer, sowohl innerorts als auch außerorts. Deutlich zu erkennen ist allerdings, dass auf Autobahnen eher ältere männliche Pkw-Fahrer im Alter von 30–40 Jahren verunglücken. Das sonst bei jungen Fahrern zu erkennende Maximum verschiebt sich deutlich hin zu höherem Alter [Statistisches Bundesamt, 2001]

## 2.2 Bisherige Unfalldatenerhebungen

Durch die Analyse großer Unfalldatenbanken ist es möglich, das Unfallgeschehen im Detail zu betrachten. Bezogen auf den Pkw-Unfall bedeutet das, dass Schwerpunkte des Unfallgeschehens herausgefiltert werden, die dann gezielt untersucht werden können. Die Auswertung solcher Datenbanken führt zu Aussagen über die Effektivität von Schutzsystemen und die Realitätsnähe der existierenden Crash-Tests.

### Kollisionstypen

In diesem Abschnitt sollen die Kollisionstypen des Pkw-Unfalls einander gegenübergestellt werden.

In einer Großzahluntersuchung des GDV<sup>1</sup> mit 15.000 Pkw-Pkw-Unfällen aus dem Jahr 1990 werden die Kollisionstypen miteinander verglichen. Es dominiert der Kollisionstyp Heck-Front mit 53,9 % gefolgt vom Kollisionstyp Seite-Front mit einem Anteil von 32,5 % und dem Kollisionstyp Front-Front mit 13,6 %. Demgegenüber verschiebt sich das Bild, wenn man nur die Unfälle mit schweren Verletzungen MAIS  $\geq 3$  betrachtet. Hier führt der Kollisionstyp Seite-Front mit 49,1 %, gefolgt vom Kollisionstyp Front-Front mit 45,3 % und der Heck-Heck-Kollision mit 5,6 % [LANGWIEDER, 1998], [VDS, 1994]. Es zeigt sich also deutlich, dass der Heck-Front-Aufprall zwar eine hohe Bedeutung für die Pkw-Unfälle insgesamt hat, allerdings nur sehr selten schwere Verletzungen (MAIS 3+) zur Folge hat. Entscheidend für die schweren Verletzungen im Unfallgeschehen des Pkw ist der Front-Seiten-Aufprall dicht gefolgt vom Front-Front-Unfall.

Übereinstimmend dazu ergeben die Daten der Verkehrsunfallforschung Hannover für MAIS 3+ ver-

RESIKO					FS90						
Kollisionstyp Front/Front					Kollisionstyp Front/Front						
n = 367					n = 1.932						
0101	0102	0103	0104		0101	0102	0103	0104			
%	2,6	13,3	7,5	21,9	45,3	%	0,5	1,4	2,7	9,0	13,6
Kollisionstyp Seite/Front					Kollisionstyp Seite/Front						
n = 388					n = 4.630						
0201	0202	0203	0204		0201	0202	0203	0204			
%	7,8	19,2	18,0	4,1	49,1	%	2,6	9,2	16,2	4,5	32,5
Kollisionstyp Heck/Front					Kollisionstyp Heck/Front						
n = 45					n = 7.652						
0301	0302	0303	0304		0301	0302	0303	0304			
%	1,4	2,2	0,1	1,9	5,6	%	16,5	22,6	3,3	11,5	53,9

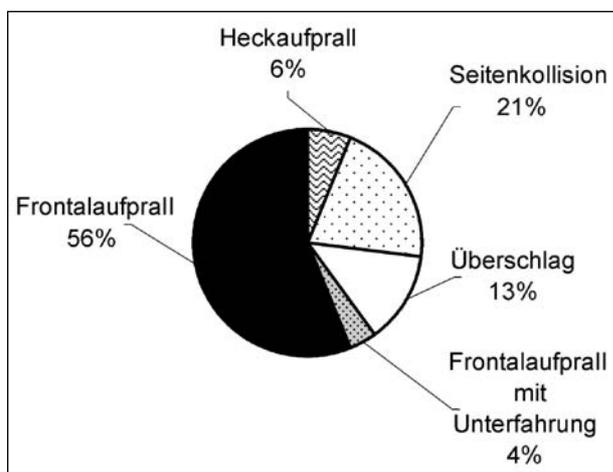
**Bild 2.10:** Verteilung der Kollisionstypen im RESIKO- und FS90-Material [LANGWIEDER, 1998]

letzte Insassen, dass die Frontalkollision mit schräger Anprallrichtung des Kollisionspartners und Teilüberdeckung der Fronten sowie der schräge Seitenanprall eines Pkw gegen die Fahrgastzelle des anderen  $\frac{3}{4}$  des Unfallgeschehens beim Pkw in Deutschland ausmachen. Des Weiteren ließ sich feststellen, dass der mittige Pfahlaufprall gegen die Front sowie der rechtwinklige Pfahlanprall gegen die seitliche Fahrgastzelle dominierende Kollisionstypen des Pfahlanpralls sind, die  $\frac{2}{3}$  aller schwerstverletzten Pkw-Insassen beim Pfahlaufprall darstellen [OTTE, 1997].

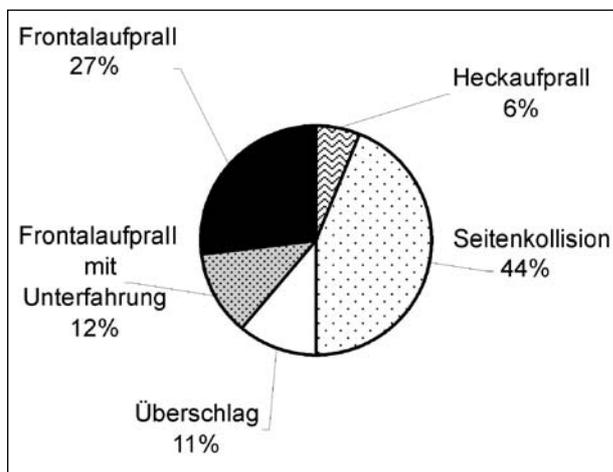
### Aufprallarten

Betrachtet man die Aufprallartenverteilung des Pkw, also die Unfallsituation des einzelnen Kollisionsobjektes, für die schweren und tödlichen Verletzungen Ende der 80er Jahre, so ergibt sich das in Bild 2.11 dargestellte Bild. Der Frontalaufprall dominiert das Unfallgeschehen des Pkw mit 56 %, gefolgt von der Seitenkollision mit 21 % und dem Überschlag mit 13 %. Betrachtet man nur die Seitenkollision so änderte sich die Situation und schon Anfang der 90er Jahre wurde diese Aufprallart dominanter. Wurden 1985 nur 14 % der Insassen beim Seitenaufprall, verletzt, waren es 1995 schon 30 %. Noch deutlicher wird die Dominanz bei der Betrachtung der Getöteten. Hier stieg die Rate auf 44 %, die in Bild 2.12 zu erkennen ist. Damit ist die Seitenkollision die Aufprallart mit dem größten Anteil an getöteten Insassen. Gefolgt wird sie vom Frontalaufprall mit 39 %. Hier zeigt sich auch, dass der Frontalaufprall mit Unterfahmung eines Hindernisses mit 12 % eine nicht zu unterschätzende Aufprallart darstellt.

<sup>1</sup> GDV – Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.



**Bild 2.11:** Aufprallartenverteilung für schwer verletzte und getötete Pkw-Insassen Ende der 80er Jahre [ORIZARIS, 1998]



**Bild 2.12:** Aufprallartenverteilung für getötete Pkw-Insassen 1995 [ORIZARIS, 1998]

### Verletzungsmuster

Nach einer Studie von 1996 [OTTE, 1997] entspricht der Anteil der MAIS 3+ verletzten Pkw-Insassen 5,5 % aller verletzten Pkw-Insassen. Überlagert man die Verletzungsschwere und die Ortslage des Unfallgeschehens, so ergibt sich, dass 35 % der Pkw mit MAIS 3+ verletzten Insassen außerorts verunfallten. Dagegen verunfallten aber nur 21 % der Pkw-Insassen mit einer Verletzungsschwere von MAIS 0 bis 2 außerorts. Dabei waren 66 % der MAIS-3+-Patienten Fahrer, 21 % Beifahrer und 10 % waren Fondinsassen. Es zeigte sich weiter, dass diese Insassen häufig polytraumatisiert waren. Hauptsächlich wurden sie an Kopf, Thorax und Beinen schwer verletzt. Der Kopf wurde in fast allen Fällen verletzt. Etwa die Hälfte der Personen erlitt Hirnverletzungen, ein Viertel verstarb an den Unfallfolgen.

Verletzungen der oberen Extremitäten treten zwar nicht sehr häufig (2,9 % aller Verletzten) und hauptsächlich bei hoher Unfallschwere (72 % bei  $\Delta v > 30$  km/h) auf, sind jedoch problematisch zu behandeln und verursachen dadurch hohe Verletzungsfolgekosten. Die meisten Armverletzungen treten bei versetzten Frontalunfällen sowie bei Seitenkollisionen mit einem rechtwinkligen bis schrägem Anstoß vorn auf. Auch beim Pfahlaufprall treten Armverletzungen recht häufig in Erscheinung. [OTTE, 1992].

Verletzungen der oberen Extremitäten erlangen durch den Rückgang von Thorax- und Kopfverletzungen relativ an Bedeutung. Die von Airbag und Gurtsystem geschützten Bereiche werden seltener und weniger schwer verletzt, was die Effektivität der vorhandenen Systeme unterstreicht. Ein großer Teil der Beinverletzungen tritt beim Frontalunfall auf. Bei einem Offset-Unfall besteht eine erhöhte Gefahr, dass Teile in den Fußraum eindringen, da nur ein Teil der Frontstruktur effektiv Stoßkräfte aufnimmt. Dies führt auch zu einem erhöhten Verletzungsrisiko bei Offset-Unfällen. Durch hohe kurzzeitige Verzögerungen besteht ebenfalls eine hohe Verletzungsgefahr, die sich für den Fahrer durch die Pedalarie noch erhöht. Mehr als die Hälfte aller Beinverletzungen mit einer Schwere von AIS 2+ treten unterhalb des Knies auf, wobei Fuß und Knöchel am häufigsten verletzt werden.

Auffallend ist der Einfluss von Alter, Geschlecht und Größe des Insassen auf das Verletzungsrisiko. Mit zunehmender Insassengröße nimmt das Verletzungsrisiko ab. Frauen unterliegen einem höheren Risiko als Männer, was durch die geringere durchschnittliche Körpergröße zu einer zusätzlichen Risikosteigerung führt. Da mit zunehmendem Alter die Stabilität und Flexibilität der Knochen abnimmt, steigt das Verletzungsrisiko mit zunehmendem Alter an [GRANDALL, 1997].

Schwer verletzte Pkw-Insassen sind nicht durch ein hohes Alter geprägt [OTTE, 1997].

### 2.2.1 Der Frontalaufprall

Wie bereits herausgearbeitet, kommt dem Frontalaufprall im heutigen Verkehrsunfallgeschehen eine sehr bedeutende Rolle zu. Betrachtet man die Aufprallarten für die schweren und tödlichen Verletzungen Ende der 80er Jahre, so bildet der Frontalaufprall mit einem Anteil von 60 % die Spitze. Bei der Analyse der tödlichen Verletzungen Mitte der

90er Jahre rangiert der Frontalaufprall mit 39 % an zweiter Stelle, hinter der Seitenkollision mit 44 % [OZIARIS, 1998].

Das zeigt, dass das Risiko, bei Frontalunfällen schwere Verletzungen zu erleiden oder getötet zu werden, durch die Ausstattung von Gurt und Airbag im Fahrzeug stark zurückgegangen ist.

In verschiedenen Studien wird die sinkende Zahl an Getöteten trotz steigender Unfallzahlen als Folge der stark verbesserten passiven Sicherheit mit Zahlen hinterlegt [DISCHINGER, 1996, LANGWIEDER, 1997 und 1998]. So sinkt das Verletzungsrisiko durch die Ausstattung der Fahrzeuge mit Airbag und Gurt um 80–90 % gegenüber dem ungeschützten Insassen. Bei Fahrzeugen mit Airbag, in denen die Insassen nicht gurtgesichert waren, wird nur eine Reduzierung des Verletzungsrisikos um 20 % erreicht. LANGWIEDER stellte weiterhin fest, dass das Verletzungsrisiko für schwere und tödliche Verletzungen allein durch den Dreipunktgurt um 75 % reduziert wird. Zusammen mit dem Airbag ist gegenüber nur gurtgesicherten Fahrern eine Verringerung um mehr als 40 % festzustellen. Das zeigt eindrucksvoll, dass der Airbag nur in Verbindung mit dem Gurtsystem sein optimales Schutzpotenzial ausschöpft. Das Gurtsystem im Fahrzeug ist aus Sicht der passiven Sicherheit der Fahrzeuginsassen unverzichtbar [LANGWIEDER, 1997].

Die Verletzungsschwere bei mit Airbag Verunglückten ist eindeutig geringer, jedoch treten airbagtypische Verletzungen auf, wie in Tabelle 2.1 dargestellt. Dazu gehören die Verletzungen der oberen Extremitäten, insbesondere Unterarmbrüche, Verletzungen im Gesicht sowie Verletzungen des Gewebes im Bereich der Augen. Die Verletzungen von Kopf, Nacken und Thorax sowie schwere Gesichtsverletzungen nehmen durch den Airbageinsatz ab. Verletzungen, die durch den Airbag verursacht werden, bleiben im Allgemeinen im AIS-1-Bereich und sind, wenn schwere Verletzungen verhindert werden, durchaus tolerabel [DISCHINGER, 1996, LANGWIEDER, 1997].

Die positive Wirkung des Airbags auf die Verletzungsreduktion verdeutlicht auch eine Studie des GDV. Im Vergleich zu nur gurtgesicherten Fahrern kam es zu 40 % weniger Kopfverletzungen. Schwere Gesichtsverletzungen, die man bei nur gurtgesicherten Fahrern häufiger findet (10,2 % AIS 2+ und 0,3 % AIS 4+), fehlen hingegen völlig. Auch der Hals weist eine reduzierte Verletzungshäufigkeit im unteren AIS-Bereich auf. Bei Bauch-

Verletzung durch Airbagauslösung		AIS	Fahrer (n = 41)	Beifahrer (n = 10)
Gesicht	Gesichtsprellung/-schürfung	1	8	3
	Stirmprellung/-schürfung	1	3	3
	Nasenprellung/-schürfung	1	10	1
	Lippenbiss/-platzwunde	1	2	
	Kinnprellung/-schürfung	1	3	
	Linsentrübung	1	1	
	Gehörbeeinträchtigung (bleibend)	1	2	
Unterarm	Gesichtsverbrennungen	1		2
	Unterarmprellung/-schürfung	1	6	
Hand	Unterarmverbrennung	1	5	
	Mittelhandknochenfraktur	2	1	
	Handprellung/-schürfung	1	3	
	Hand-/Fingerverstauchung	1		1
Oberschenkel	Handverbrennung	1	3	
	Oberschenkelprellung/-schürfung	1		1

**Tab. 2.1:** Airbaginduzierte Verletzungen bei Fahrer und Beifahrer [LANGWIEDER, 1997]

verletzungen und der Frakturhäufigkeit von Ober- und Unterarmen ist allerdings kein Unterschied festzustellen. Ein erhöhtes Risiko für Brillenträger oder Raucher durch den Airbag ist nicht festzustellen, da die Verletzungen im Bereich AIS 1 liegen [LANGWIEDER, 1997], [LANGWIEDER, 1998].

Bei einer Frontalkollision werden Fondinsassen im Vergleich zu Frontinsassen generell geringer belastet, wenn sie sich angurten. Das erscheint plausibel und wird in verschiedenen Arbeiten [LANGWIEDER, 1998] belegt. So ergeht es durch einen 2-Punkt-Gurt gesicherten Rücksitzinsassen besser als mit einem 3-Punkt-Gurt angeschnallten Frontinsassen [HUELKE, 1995]. Durch die weichen Anprallstrukturen der Vordersitze bleiben Kopfverletzungen der Rücksitzinsassen auf Gehirnerschütterungen mit einem Anteil von 14 % (AIS 2) beschränkt. Kritische Verletzungsmuster für Rücksitzinsassen stellen schwere Abdominal- und Thoraxverletzungen dar. Dies ist auf die schlechtere Gurtgeometrie der Rücksitze im Vergleich zu den Frontsitzen und den daraus resultierenden Submarining-Effekt zurückzuführen, sowie auf eine im Allgemeinen lässigere Sitzposition der Fondpassagiere. Weiterhin werden häufig Frakturen der Oberarme festgestellt, wohingegen die unteren Extremitäten nur gering gefährdet sind [LANGWIEDER, 1998].

Ein besonders schwerer Kollisionstyp stellt die Frontalkollision mit Teilüberdeckung dar. Überproportional häufig treten hier schwere Bein- und Fußverletzungen bei Fahrern auf. Da diese Verletzungen hohe volkswirtschaftliche Kosten durch langwierige Heil- und Rehabilitationsmaßnahmen verursachen, gewinnen sie bei einer monetären Bewertung der Verletzungsfolgen an Bedeutung. Bei

Injury Location	Inboard Limb Only	Outboard Limb Only	Both Limbs	Total	Unweighted Number of Occupants with Injury	Significance of Bias to Outboard Limb (unweighted sample)
Shoulder	13 %	86 %	1 %	100 %	75	p < 0.001
Arm	27 %	68 %	5 %	100 %	58	p < 0.001
Forearm	38 %	59 %	3 %	100 %	133	p < 0.001
Wrist-Hand	21 %	77 %	2 %	100 %	68	p < 0.001

**Tab. 2.2:** AIS 2+ Verletzungen der oberen Extremitäten von Frontinsassen bei Frontalkollisionen [FRAMPTON, 1997]

den unteren Extremitäten ist der Unterschenkel mit 26,3 %, der Oberschenkel mit 17,3 % und der Fuß mit 13,6 % an den AIS 2+ Verletzungen des Fahrers beteiligt. Ursachen hierfür sind starke Intrusionen der Spritzwand oder ein Kontakt des Knies mit dem Armaturenbrett. Die starke Verformung der Spritzwand führt zu einer verletzungsinduzierenden Eindringung der Pedalarie in den Fußraum. Auch herkömmliche Lenksäulen, die starr mit der Spritzwand verbunden sind, wirken verletzungsinduzierend auf die unteren Extremitäten, wie Oberschenkel und Kniebereich des Fahrers. Dem entspricht auch das signifikant geringere Risiko für Verletzungen der unteren Extremitäten bei den Beifahrern. Hier beträgt die Frakturhäufigkeit für Oberschenkel (3,7 %), Unterschenkel (11 %) und Fuß (5,5 %) nur ein Drittel des Wertes für den Fahrer. Grund hierfür sind der Wegfall der Pedale und die geringere Fußraumbelastung bei der teilüberdeckten Frontalkollision, wie z. B. beim Gegenverkehrsunfall [LANGWIEDER, 1998].

Ein Zusammenhang zwischen den schweren Verletzungen der unteren Extremitäten und einem Airbagesatz kann nicht ausgeschlossen werden [DISCHINGER, 1996]. So kann die durch den Airbag veränderte Kinematik des Insassen möglicherweise zu einer Mehrbelastung der unteren Extremitäten führen.

Betrachtet man die Verletzungen der oberen Extremitäten bei einer Frontalkollision, so sind die häufigsten Verletzungen im Bereich des Unterarmes und der Hand zu finden. Der Unterarm wird mit 46 % aller Verletzungen der oberen Extremitäten am häufigsten verletzt, gefolgt von der Hand mit 25 %. Der Arm, der sich dichter an der Seitenstruktur befindet, wird grundsätzlich häufiger verletzt, da er sich nicht so frei bewegen kann und eher mit Strukturteilen wie der Tür oder der Seitenscheibe in Kontakt kommt [FRAMPTON, 1997].

Handverletzungen treten schon bei einer relativ geringen Unfallschwere auf. Die Wahrscheinlichkeit steigt mit der Unfallschwere stark an:

- $\Delta v$  11 – 20 km/h: 2,7 %,
- $\Delta v$  21 – 30 km/h: 45,6 %.

Bei größerer Unfallschwere wird auch das Handgelenk in Mitleidenschaft gezogen. Als Ursache ist hauptsächlich ein Kontakt mit Teilen des Innenraumes (z. B. Armaturentafel, Lenkrad) zu erkennen [OTTE, 1992].

### 2.2.2 Der Seitenaufprall

Der Seitenaufprall gewinnt mehr und mehr an Bedeutung im Unfallgeschehen, vor allem bei schweren Verletzungen der Fahrzeuginsassen.

Da nach Erhebungen der MH Hannover 36 % aller Pkw-Unfälle Seitenkollisionen sind und bei Frontalunfällen das Risiko, schwere Verletzungen zu erleiden, durch Gurt und Airbag stark zurückgegangen ist, nimmt die Bedeutung von Insassenverletzungen durch Seitenkollisionen stark zu, zumal beim Seitenaufprall prinzipbedingt nur eine sehr geringe Knautschzone zur Verfügung steht. Dies entspricht den Aussagen aus den Bildern 2.10 bis 2.12, in denen die in den letzten Jahren zunehmende Dominanz der Seitenkollision zum Ausdruck kommt. Es lässt sich weiterhin feststellen, dass 81 % der Seitenkollisionen in einem Winkel von 15–105° erfolgen und 60 % im Bereich der Fahrgastzelle stattfinden. Bei Anstößen außerhalb der Fahrgastzelle bleiben immerhin 64,9 % der Insassen unverletzt, während beim Auftreffen auf die Fahrgastzelle nur noch 40,9 % der auf der stoßzugewandten Seite sitzenden Insassen unverletzt bleiben [OTTE, 1995].

Dass der Seitenaufprall eine besonders schwere Aufprallart darstellt, wird auch in einer Studie des GDV bestätigt. Rund zwei Drittel aller getöteten Fahrer sterben bei Seitenkollisionen. Hierbei besteht ein besonderes Risiko für den Insassen auf der stoßzugewandten Seite [LANGWIEDER, 1998; vgl. ORIZARIS, 1998].

Besonders schwere Verletzungen sind im Bereich des Kopfes, des Brustkorbes der Oberschenkel und des Beckens festzustellen [LANGWIEDER, 1998; THEINART, 2000], Bild 2.13.

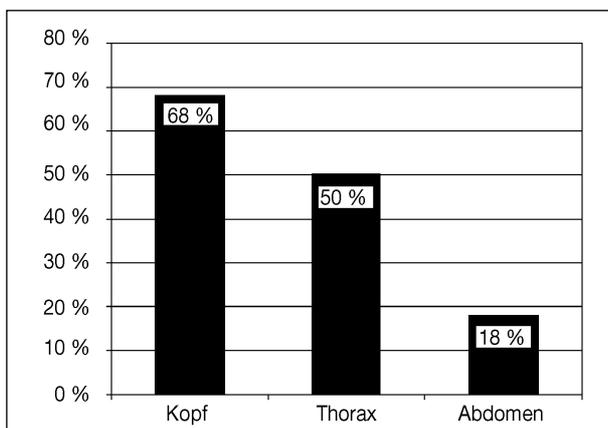
Andere Studien finden für Seitenkollisionen hohe Verletzungsschweren vor allem im Kopf- und Thoraxbereich [OTTE, 1995].

Es wurde gezeigt, dass der dem Stoß zugewandte Insasse einer höheren Verletzungsgefahr ausgesetzt ist als der Insasse auf der stoßabgewandten Seite. Es bleiben nur 48,5 % der dem Stoß zugewandten Insassen unverletzt, im Vergleich zu 67,3 % der Insassen auf der stoßabgewandten Seite. 12,9 % der Insassen auf der stoßzugewandten Seite erleiden Verletzungen von MAIS 2+ [OTTE, 1995].

Betrachtet man nur den Anstoß im Bereich der Fahrgastzelle, liegt für die einzelnen Körperregionen mit Ausnahme des Halses ein höheres Verletzungsrisiko vor als bei einem Anstoß außerhalb der Fahrgastzelle. Die am häufigsten verletzten Bereiche sind:

- 23,6 % Kopf,
- 13,5 % Thorax,
- 13,4 % Arme,
- 10,9 % Beine.

43,6 % der Kopfverletzungen treten durch einen Kontakt mit der Seitenscheibe auf, auch Thorax, Abdomen und Becken werden häufig durch Kontakt mit der Seitenstruktur verletzt. Ein großes Problem und ein erhebliches Verletzungsrisiko beim Seitenunfall stellen Intrusionen dar. Diese treten gerade bei Anstößen im Bereich der Fahrgastzelle



**Bild 2.13:** Verletzungsrisiko verschiedener Körperteile beim Seitenaufprall [THEINERT, 2000]

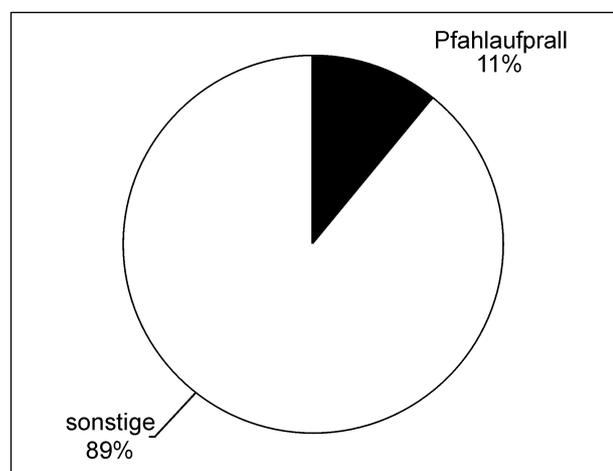
auf und sind für einen großen Teil der Verletzungen bei Seitenkollisionen verantwortlich. Eine Eindringtiefe von bis zu 50 % der Fahrzeugbreite zwischen A- und B-Säule ist durchaus möglich [OTTE, 1995; TSCHÄSCHKE, 2000].

Bei Seitenkollisionen ist das Verletzungsrisiko für Oberarm und Schulter schon bei geringen Unfallschweren recht hoch. Die Ursache hierfür ist meistens ein Direktanprall mit der eindringenden Struktur [OTTE, 1995].

Im Bereich der oberen Extremitäten werden die der Fahrzeugaußenseite zugewandten Körperteile häufiger verletzt als die zum Fahrzeuginneren weisenden, was in 83 % der Fälle auf den Kontakt mit der eindringenden Seitenstruktur zurückzuführen ist. Verletzungen des zum Fahrzeuginneren weisenden Arms entstehen zu 85 % durch Kontakt mit dem zweiten Frontinsassen. Der Kontakt der Insassen miteinander ist darauf zurückzuführen, dass der auf der stoßabgewandten Seite sitzende Insasse aus dem Teil des Dreipunktgurtes herausrutschen kann, der über seine Schulter läuft [FRAMPTON, 1997].

Verletzungen von Unterarm und Hand sind erst bei größerer Unfallschwere zu beobachten, da sie sich relativ frei im Fahrzeug bewegen können. Zu Frakturen des Unterarmes oder der Hand kann es durch Direktanprall oder Quetschung kommen, was aber stärkere Intrusionen voraussetzt [OTTE, 1995].

Der seitliche Pfahl- oder Baumaufprall hat einen Anteil von 11 % an den Seitenkollisionen. Diese Unfallart verursacht dabei 47 % der schweren Verletzungen (MAIS 3+) [THEINERT, 2000].



**Bild 2.14:** Anteil des Pfahlaufpralls an der Seitenkollision [THEINERT, 2000]

Die Kollisionspartner von Pkw in Seitenkollisionen mit Verletzungen von MAIS 2+ lassen sich in drei Haupttypen einteilen. Mit 41 % ist der Pkw der häufigste Kollisionskontrahent, gefolgt vom Baum/Pfahl-Aufprall mit 40 % und dem Nfz mit 14 %.

Der Aufprall des Pfahls in die Seite eines Pkw führt zu starken Intrusionen der seitlichen Fahrzeugstruktur. Das führt zu einem hohen Verletzungsrisiko für den Kopf und den Thorax. Beckenfrakturen sind das Ergebnis von direkten seitlichen Anstößen auf Höhe des Beckens. Sie treten mit 8–9 % bei Kollisionen mit den drei Hauptkollisionspartnern Pkw, Nfz und Objekten relativ selten auf. Bei Kollisionen mit einem Objekt müssen auch Verletzungen im Oberschenkel- und Hüftbereich erwartet werden. Besonders der Oberschenkel ist bei einem Seitenaufprall erheblichen Kräften ausgesetzt [OTTE, 1995].

Weitere Unfallstudien bestätigen, dass der Pfahl-aufprall einen bedeutenden Teil des Seitenaufpralls ausmacht, wenn man die erlittenen Verletzungen betrachtet. So werden überdurchschnittlich oft Verletzungen des Kopfes und der Brust festgestellt [EDWARDS, 2001].

### 2.2.3 Der Heckaufprall

Betrachtet man alle Pkw-Unfälle, so lässt sich mit dem Material der Verkehrsunfallforschung Hannover ein Anteil der Heckkollision an den vier Aufprallarten von 2,3 % bestimmen [APPEL, 1998].

Nach einer Studie des GDV tritt die Heckkollision bei Pkw-Unfällen mit schweren Verletzungen mit einem Anteil von 5,6 % deutlich in den Hintergrund. Im Gegensatz dazu dominiert dieser Kollisionstyp bei Unfällen mit leichten Verletzungen mit einem Anteil von 53,9 %. Bei den Verletzungen im Bereich AIS 2+, also den schwereren Verletzungen, haben Untersuchungen ergeben, dass Kopfverletzungen dominieren, gefolgt von Thoraxverletzungen und Abdominalverletzungen. Diese Verletzungen resultieren aus dem Kontakt mit der Fahrzeugstruktur oder der Interaktion mit dem Gurt [LANGWIEDER, 1998].

Leichtere Heckkollisionen haben sehr häufig Halswirbelverletzungen zur Folge. Grund hierfür ist die Relativbewegung von Kopf und Oberkörper des Insassen. So werden der Oberkörper und der Kopf zu unterschiedlichen Zeiten von heutigen Sitzsystemen gestoppt. Dies hat hohe biomechanische Belastungen zur Folge, die dann zu Verletzungen im Halsbereich führen.

### 2.2.4 Der Fahrzeugüberschlag

Betrachtet man den Anteil des Fahrzeugüberschlags am Pkw-Unfallgeschehen in Deutschland, so tritt er mit 2,8 % gemeinsam mit der Heckkollision in den Hintergrund [APPEL, 1998].

### 2.2.5 Kompatibilität

Die Notwendigkeit für Betrachtungen der Kompatibilität ergibt sich aus Daten des realen Unfallgeschehens, wie z. B. der Mortalitätsrate, die für den Insassen eines 800-kg-Fahrzeugs vier Mal höher ist als für den Insassen eines 1.500-kg-Fahrzeugs. Die Inkompatibilitäten lassen sich verringern, indem man die Steifigkeiten der Fahrzeuge entsprechend auslegt. Die Auswirkungen der vorhandenen Masseninkompatibilität lassen sich durch entsprechend ausgelegte Rückhaltesysteme begrenzen [KRAMER, 1993].

### 2.2.6 Sekundärkollision

Sekundärkollisionen bedeuten für die Fahrzeuginsassen in den meisten Fällen eine sehr große Gefahr, da die heutigen Rückhaltesysteme im Fahrzeug ausschließlich auf die Primärkollision ausgelegt werden. Einmal durch einen Primäraufprall ausgelöst, sind sie bei einem eventuell folgenden Sekundär- oder Tertiäraufprall nicht mehr in der Lage, die Insassen zu schützen.

In verschiedenen Untersuchungen wird auf das hohe Risiko von Sekundärkollisionen hingewiesen. So ereignet sich in ungefähr einem Drittel der Unfälle mit schweren und tödlichen Verletzungen eine zweite Kollision. Für die Analyse wurde hier in Unfallverursacher (V) und -beteiligten (B) unterschieden. Der zweite Anstoß erfolgt dabei mit am häufigsten gegen einen:

- Pkw (V: 9,6 %; B: 7,1 %),
- Graben/Böschung (V: 5,9 %; B: 8,1 %),
- Leitplanke (V: 5,4 %; B: 5,3 %),
- Baum/Mast (V: 4,0 %; B: 4,9 %),

[LANGWIEDER, 1998].

### 2.2.7 Verhaltensweisen/Altersstruktur

Junge Fahrzeugführer sind aufgrund ihrer mangelnden Fahrerfahrung überdurchschnittlich oft in Verkehrsunfälle verwickelt. Dieses hohe Unfallrisiko

junger Fahrer wird durch die folgende Zahl betätigt: So werden 40 % der schweren bzw. tödlichen Unfälle von Fahrern bis 24 Jahren verursacht. Als eine mögliche Lösung des Problems kann eine obligatorische zweistufige Fahrausbildung für junge Fahrer angesehen werden. Dabei werden die Fahrer gerade in der kritischen Anfänger-Phase von berechtigten Erwachsenen begleitet, sodass die gefährliche Zeit des Sammelns von Erfahrungen sowie des Erkennens von kritischen Situationen entscheidend entschärft wird [LANGWIEDER, 1998]. Das hohe Unfallrisiko junger Fahrer zeigt sich unter anderem auch daran, dass mehr als die Hälfte der schwer verletzten oder getöteten Insassen beim Pfahlaufprall junge Männer unter 30 Jahren sind [EDWARDS, 2001]. Dies trifft besonders für Deutschland zu, weniger für Großbritannien und Schweden. Eine Erklärung kann die hohe Anzahl von Unfällen in geschützten Baumalleen in Deutschland sein.

Der Missbrauch von Alkohol spielt weiterhin eine entscheidende Rolle im Straßenverkehr. So wurde in [LANGWIEDER, 1998] festgestellt, dass 25 % der untersuchten Pkw-Pkw-Unfälle unter Alkoholeinfluss verursacht wurden.

Der Gurt ist und bleibt das wichtigste Rückhaltesystem. Auch der Airbag kann seine volle Schutzwirkung nur im Zusammenspiel mit dem Gurtsystem entfalten. Umso wichtiger ist das Anlegen des Gurtes. Gerade bei schweren und tödlichen Unfällen besonders zur Nachtzeit sind überdurchschnittlich häufig Sicherheitsgurte nicht angelegt. So waren laut einer Studie 73 % der dabei Getöteten angeschnallt, 27 % aber nicht durch den Gurt gesichert. Unfallverursacher sind drei Mal so häufig nicht angeschnallt wie unschuldig Beteiligte. Des Weiteren lag die Anschnallquote auf den Rücksitzen bei nur 60 % [LANGWIEDER, 1998].

Durch den Einsatz des Sicherheitsgurtes sinkt die Wahrscheinlichkeit, tödliche Verletzungen zu erleiden, um 45–60 % gegenüber dem ungesicherten Insassen. Die Gurtanlagequoten lagen in Deutschland auf Autobahnen bei 95 %, auf Landstraßen bei 91 % und innerorts bei 85 % [LENZ, 1997].

Diese Fakten sind Grund genug, über technische oder administrative Maßnahmen nachzudenken, welche die herausragende Rolle des Gurtes im Fahrzeug noch mehr unterstreichen.

In Untersuchungen wird deutlich der Trend bestätigt, dass die Verletzungsanfälligkeit deutlich al-

ters- und geschlechtsabhängig ist. So wurde anhand des ISS-Verfahrens<sup>2</sup> der verletzten angegurteten Fahrer bei Frontalkollisionen festgestellt, dass Frauen im Durchschnitt eine höhere Verletzungsanfälligkeit aufweisen als Männer. Außerdem ist bei Männern eine Altersabhängigkeit der Verletzungsfolgeschwere anhand einer kontinuierlichen Steigerung der durchschnittlichen ISS-Werte bis zu der Gruppe der über 60-Jährigen erkennbar. Es ist zu überlegen, die RHS so zu gestalten, dass sie auch dieser Altersabhängigkeit gerecht werden [LANGWIEDER, 1998].

### 2.3 GIDAS-Unfalldatenauswertung

Das hier zur Untersuchung herangezogene Datenmaterial entstammt der GIDAS-Datenbank<sup>3</sup>. Es setzt sich aus 1.672 Pkw-Unfällen zusammen. An diesen Unfällen waren 3.238 Insassen in 2.116 Fahrzeugen beteiligt.

Die Verletzungen der Insassen wurden für die hier getroffenen Aussagen wie folgt zusammengefasst:

leicht verletzt	AIS 1, AIS 2
schwer verletzt	AIS 3, AIS 4, AIS 5
getötet	AIS 6

Die Auswertung gliedert sich in die Teilaspekte Umgebung, Unfallkonstellation und Personen. Dabei werden innerhalb der drei Aspekte folgende Auswertungen vorgenommen:

Umgebung	Unfallkonstellation	Personen
Ortslage	Fahrzeugmasse	Alter
Witterung	Unfalltyp	Gewicht
Tageszeit	Aufprallart	Größe
	Kollisionsart	Geschlecht
	Unfallursache	Verletzungen

<sup>2</sup> ISS – Injury Severity Score. Zur Codierung von Mehrfachverletzungen werden die Quadrate der jeweils höchsten AIS-Werte der drei am schwersten verletzten Körperregionen addiert. Der Maximalwert kann höchstens 108 betragen (AIS 6). AIS 6 bei nur einem Körperteil legt den ISS-Wert auf 75 fest. Der ISS-Wert korreliert in starkem Maße mit der Mortalität der Unfallopfer [KRAMER, 1998].

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

<sup>3</sup> GIDAS – German-In-Depth-Accident-Study; Unfalldatenbank von FAT und BSt (seit 1. Juli 1999, davor Unfallforschung an der MH Hannover im Auftrag der BSt)

### 2.3.1 Umgebung

#### Ortslage

Die Unfälle dieser Datenbasis ereignen sich zu fast gleichen Teilen innerorts und außerorts. Innerhalb geschlossener Ortschaften geschehen 52,22 % (n = 873) der Unfälle, außerhalb geschlossener Ortschaften 47,73 % (n = 798). Dabei blieb die Ortslage eines Unfalls unbekannt (s. Bild 2.15).

#### Verletzungen

Man kann feststellen, dass sowohl innerorts als auch außerorts die Mehrzahl der Pkw-Insassen nur leicht verletzt wird (innerorts: 95,2 %; außerorts: 89,5 %). Bei den außerorts stattfindenden Unfällen ist dagegen die Gefahr, schwere oder tödliche Verletzungen zu erleiden, deutlich höher als bei Unfällen innerhalb geschlossener Ortschaften. So sterben 86,6 % aller getöteten Insassen außerorts und 68,1 % aller schwer verletzten Insassen werden außerorts verletzt. Das zeigt u. a. den Einfluss des erhöhten Geschwindigkeitsniveaus auf die Verletzungssituation außerorts.

#### Witterung

Der Einfluss der Witterung auf die Unfallhäufigkeit und Unfallfolgeschwere wird in den Bildern 2.16 bis 2.19 deutlich erkennbar. So finden überproportional viele Unfälle bei gutem Wetter statt. 78,2 % der Unfälle ereignen sich bei trockenem Wetter, obwohl es an etwa 36 % der Tage im Jahr regnet [Wetter, 2002]. Dagegen finden nur 21,8 % der Unfälle bei Niederschlag statt. Hier dominieren die Unfälle bei Regen deutlich mit einem Anteil von 20 %. Dies kann nur ein erster Hinweis darauf sein, dass es einer detaillierten Analyse zum Einfluss der Witterung auf das Unfallgeschehen bedarf.

#### Verletzungen

Aus Bild 2.17 geht hervor, dass 72,3 % aller an Unfällen beteiligten Insassen bei trockenem Wetter leicht verletzt werden und dagegen nur 19,4 % bei Witterungen mit Niederschlag. Damit machen die leichten Verletzungen den größten Anteil am Verletzungsbild der Insassen aus (91,7 %).

5,1 % aller bei Niederschlag verletzten Insassen werden schwer verletzt. Dagegen sind dies nur 2 % bei trockener Witterung. Damit ist das Risiko, bei Niederschlag schwer verletzt zu werden, mehr als

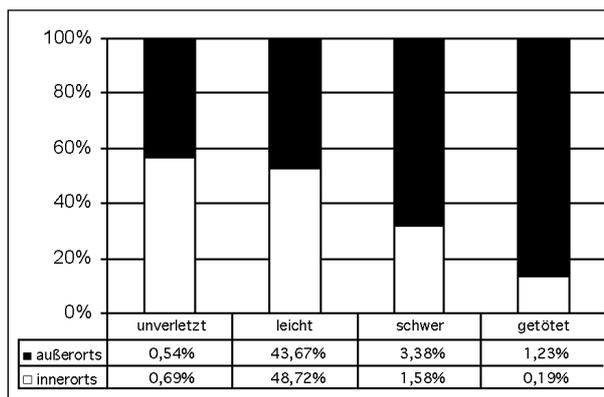


Bild 2.15: Verletzungsverteilung in Abhängigkeit von der Ortslage

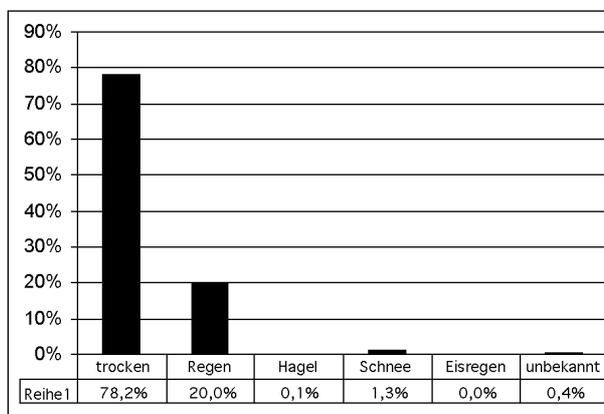


Bild 2.16: Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit von der Witterung

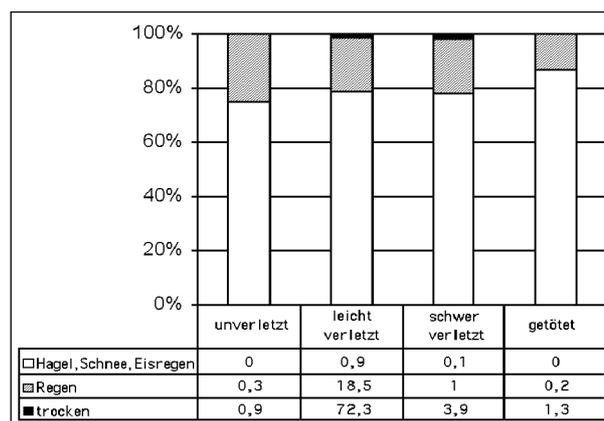
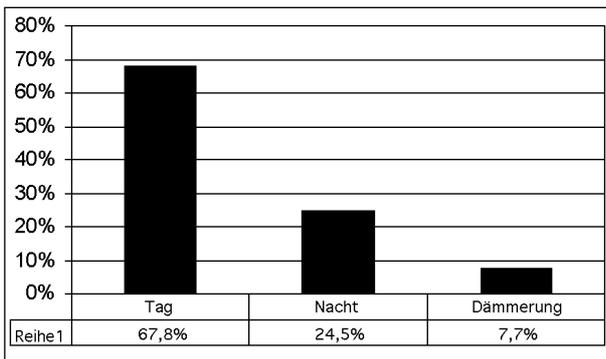
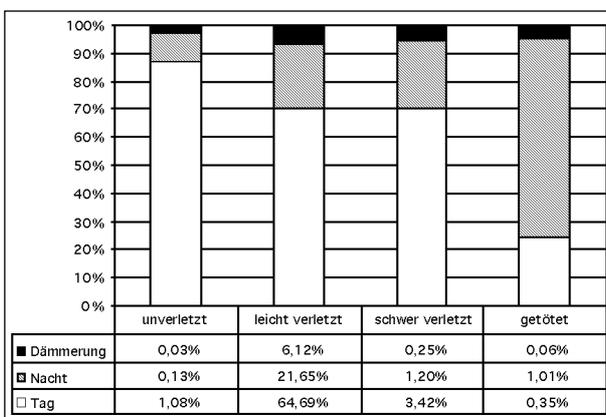


Bild 2.17: Verletzungsverteilung in Abhängigkeit von der Witterung

doppelt so hoch wie das bei trockener Witterung. Allerdings werden nur 0,8 % aller bei Niederschlag verletzten Insassen getötet. Bei trockenem Wetter sind dies 1,6 % aller verletzten Insassen. Somit ist hier das Risiko doppelt so hoch, getötet zu werden. So kann man nicht von einer allgemeinen Zunahme der Verletzungsschwere bei einer Verschlechterung der Witterung sprechen.



**Bild 2.18:** Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit von der Tageszeit



**Bild 2.19:** Verletzungsverteilung in Abhängigkeit von der Tageszeit

Betrachtet man nur die getöteten Insassen, so verunglücken 86,7 % aller Getöteten bei trockenem Wetter. Für die schwer verletzten Insassen liegt diese Zahl bei 78 %.

### Tageszeit

Die tageszeitliche Verteilung der Unfälle ist auf die jeweilige Verkehrslast zurückzuführen. Am Tage geschehen 67,8 % (n = 1.134) aller Unfälle. Bei Nacht ereignen sich mit 24,5 % (n = 410) deutlich weniger Unfälle, was auf die deutlich geringere Verkehrsbelastung zurückzuführen ist. Bedenkt man die Kürze der Dämmerung im Verhältnis zur gesamten Tagesdauer, so sind 7,7 % (n = 128) Anteil am Gesamtunfallgeschehen sehr viel. Dabei wird die Tageszeit entsprechend der Helligkeit zum Zeitpunkt des Unfalls angegeben (Bild 2.18).

### Verletzungen

Deutlich zu erkennen ist die Dominanz der leicht verletzten Insassen am Gesamtverletzungsbild (92,5 %). In der Nacht geschehen jedoch in erster Linie sehr schwere Unfälle. So sterben 75,5 % aller

getöteten Insassen in den Nacht- und Dämmerungsstunden (Nacht: 71,1 %; Dämmerung: 4,4 %). Das Bild verschiebt sich bei der Betrachtung der schwer verletzten Insassen. Hier verletzen sich 70,1 % aller Insassen am Tage schwer, nur 24,7 % bei Nacht und 5 % während der Dämmerung (Bild 2.19).

## 2.3.2 Unfallkonstellation

### Fahrzeugmasse

Betrachtet man die Massenverteilung der Pkw, so fällt auf, dass nur 19,6 % der Fahrzeuge eine Masse von unter 1.000 kg haben. Der größte Teil der Fahrzeuge liegt mit 41,4 % zwischen 1.200 und 1.600 kg.

Dieser Trend hin zu schwereren Pkw sollte auch in den entsprechenden Sicherheitstests (Masse der Barriere beim Seitenaufprall) berücksichtigt werden.

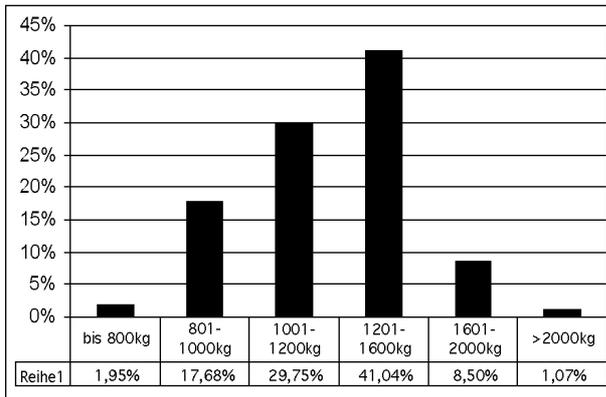
Die starke Spreizung bei den Massen der Pkw wird auch in Zukunft bestehen bleiben, da Pkw mit einem geringen Verbrauch immer auch ein geringes Gewicht haben müssen, wohingegen mehr Komfort in den anderen Fahrzeugkonzepten im Allgemeinen mit einer Gewichtszunahme verbunden ist (Bild 2.20).

### Verletzungen

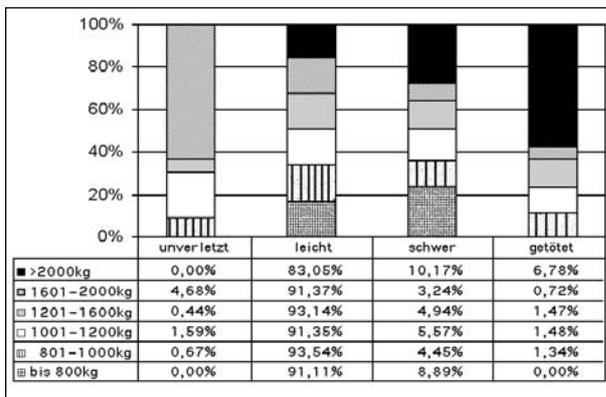
Bei der Betrachtung der Verletzungsschwere der Insassen fällt auf, dass in den Massenklassen unter 800 kg und über 2.000 kg die Wahrscheinlichkeit schwere Verletzungen zu erleiden, fast doppelt so hoch ist wie im Bereich zwischen 800 bis 2.000 kg. Bei Fahrzeugen über 2 Tonnen Masse werden 6,78 % aller Insassen getötet. Das Risiko, in einem solchen Fahrzeug zu sterben, ist damit etwa 4,5 Mal höher als das in Fahrzeugen der anderen Massenklassen.

Hier ist auf Grund der sehr gemischten Fahrzeugstruktur, bestehend aus Van, Transporter, Geländewagen und großer Limousine, eine genauere Betrachtung nötig, um für diese Fahrzeugklasse detaillierte Aussagen bezüglich des Verletzungsrisikos treffen zu können. Diese Analyse ist hier aufgrund des Umfangs des Datenmaterials nicht möglich.

Eine Ausnahme bilden die Fahrzeuge mit einem Gewicht zwischen 1.200 kg und 1.600 kg. Hier blei-



**Bild 2.20:** Anteil am Unfallgeschehen in Abhängigkeit von der Fahrzeugmasse



**Bild 2.21:** Verletzungsverteilung in Abhängigkeit von der Fahrzeugmasse

ben im Vergleich deutlich mehr Personen unverletzt (63,4 % aller Unverletzten). Es werden auch weniger Insassen schwer verletzt (13,3 % aller schwer verletzten Insassen). So stellt diese Massenklasse die sicherste in Bezug auf die Verletzungsschwere der Insassen dar (Bild 2.21).

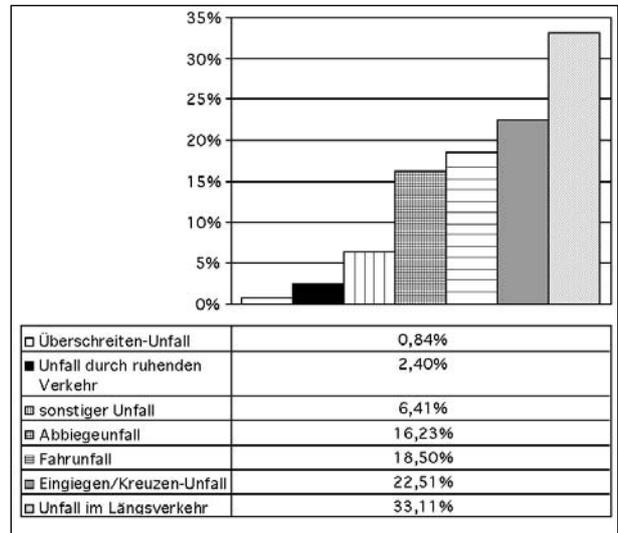
**Unfalltyp**

Der Unfalltyp bezeichnet den Verkehrsvorgang bzw. die Konfliktsituation, aus welcher der Unfall entstanden ist.

Betrachtet man die Häufigkeit des Auftretens eines bestimmten Unfalltyps, so ergibt sich folgende Rangfolge:

1. Unfälle im Längsverkehr mit 33,1 % (n = 553),
2. Einbiegen/Kreuzen-Unfälle mit 22,5 % (n = 376),
3. Fahr Unfall mit 18,5 % (n = 309),
4. Abbiegeunfall mit 16,2 % (n = 276).

Mit 33,1 % Anteil dominieren die Unfälle im Längsverkehr das Unfallgeschehen. Um einen Unfall im



**Bild 2.22:** Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit vom Unfalltyp

Längsverkehr handelt es sich, wenn der Unfall durch einen Konflikt zwischen Verkehrsteilnehmern ausgelöst wurde, die sich in gleicher oder entgegengesetzter Richtung bewegten. Mit einem Anteil von 46 % dominieren hier die Unfälle, bei denen auf ein vorausfahrendes Fahrzeug, ein Stauende oder ein wartepflichtiges Fahrzeug aufgefahren wurde.

Zur Vermeidung solcher Unfälle bieten sich in erster Linie Maßnahmen an, die geeignet sind, die Aufmerksamkeit des Fahrers auf die Gefahrensituation zu lenken. Bremsleuchten, die dem Nachfolgenden eine Information zur Stärke der Bremsung geben, können hier schon einen wichtigen Beitrag leisten. Ein System, das in der Lage ist, eine kritische Annäherung festzustellen, könnte den Fahrer auf die drohende Gefahr aufmerksam machen und ihn zu angemessenem Handeln auffordern. Zur Minderung der Unfallfolgen kann hier auch ein PRE-SAFE-System beitragen, das bei einer nicht mehr vermeidbaren Kollision durch geeignete Maßnahmen die Unfallschwere reduziert (Insassen auf die Kollision vorbereiten, Fahrzeug und Rückhaltesysteme konditionieren).

**Verletzungen**

Betrachtet man alle schwer verletzten oder getöteten Insassen, so werden beim Unfall im Längsverkehr 26,5 % aller Pkw-Insassen schwer verletzt oder getötet. Betrachtet man nur die Unfälle im Längsverkehr, so werden nur 4,3 % der Insassen schwer verletzt oder getötet.

Der zweithäufigste Unfalltyp, mit einem Anteil von 22,5 % am Gesamtunfallgeschehen, ist der Einbiegen-/Kreuzen-Unfall. Um einen solchen Unfall handelt es sich, wenn der Unfall durch einen Konflikt zwischen einem einbiegenden oder kreuzenden Wartepflichtigen und einem Vorfahrtberechtigten ausgelöst wurde.

Hier stellt besonders das Nichtbeachten der Vorfahrt ein Problem dar. So sind Unfälle mit bevorrechtigten Fahrzeugen von rechts und von links mit einem Anteil von 88 % die häufigste Unfallkonstellation. Dabei sticht vor allem der Unfall mit Bevorrechtigten von rechts deutlich hervor. Er macht schon allein einen Anteil von 34 % am Gesamtaufkommen dieses Unfalltyps aus. Besonders kritisch bei diesem Unfalltyp ist die hohe Wahrscheinlichkeit für einen Seitenaufprall, der zu einer erhöhten Verletzungsfolgeschwere führt.

Betrachtet man alle schwer verletzten oder getöteten Insassen, so werden beim Einbiegen-/Kreuzen-Unfall 15,9 % schwer verletzt oder getötet. Betrachtet man nur den Einbiegen-/Kreuzen-Unfall, so haben die schwer verletzten oder getöteten Insassen einen Anteil von nur 4,3 %.

Der dritthäufigste Unfalltyp ist der Fahrnfall mit 18,5 %. Dieser Unfalltyp ist gleichzeitig der mit den schwersten Verletzungsfolgen. Um einen Fahrnfall handelt es sich, wenn ein Fahrer die Kontrolle über das Fahrzeug verliert, weil er die Geschwindigkeit nicht entsprechend dem Verlauf, dem Querschnitt, der Neigung oder dem Zustand der Straße gewährt hat oder weil er deren Verlauf oder die Querschnittsänderung zu spät erkannt hat. Innerhalb dieses Unfalltyps dominieren die Fahrnfälle in Kurven (43 %) und auf gerader Strecke (41,4 %). Diese Unfälle machen also mit 84,4 % den Hauptteil des Fahrnfalls aus. Unfallträchtig erscheinende Situationen wie Inseln, Gefälle, Steigungen oder Fahrbahnverschwenkungen führen nur in seltenen Fällen zum Fahrnfall.

Allgemein könnte das Wissen der Fahrer um die physikalischen Grenzen ihres Fahrzeuges weiterhelfen, Situationen nicht zu unterschätzen. Ein in die Fahrausbildung integriertes Fahrtraining, bei dem der Fahrschüler physikalische Grenzen des Fahrzeuges erfährt, kann in der Praxis zu einer besseren Einschätzung von kritischen Fahrsituationen führen.

Da ein großer Teil der Alleinunfälle auf gerader Fahrbahn geschieht (41,4 %), besteht vor allem hier der Verdacht, das unangepasste Geschwindig-

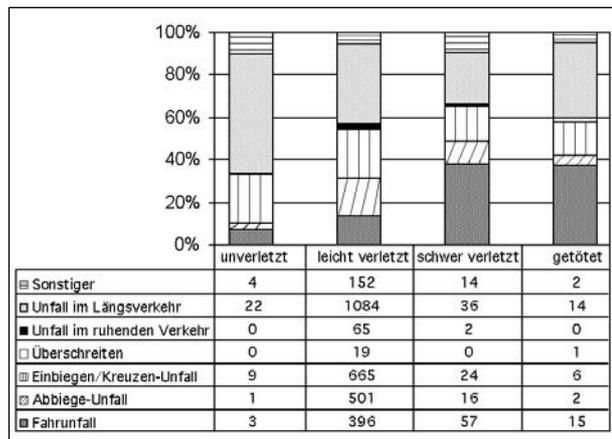


Bild 2.23: Absolute Verletzungsverteilung in Abhängigkeit vom Unfalltyp

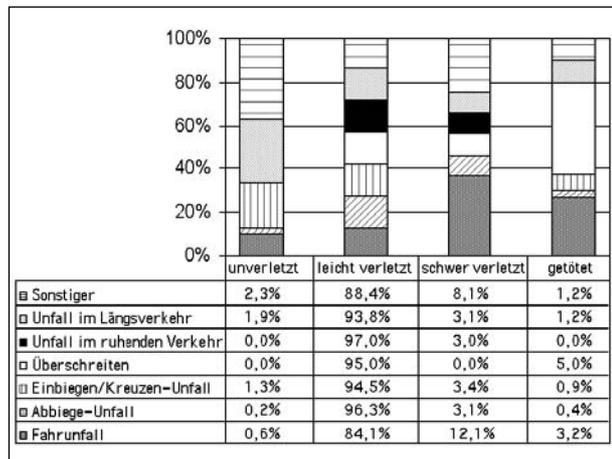


Bild 2.24: Verletzungsverteilung innerhalb der Unfalltypen

keit die Ursache für die Unfälle darstellt. Ein System, das die Fahrstabilität überwacht und den Fahrer auf nicht nur optische Weise warnt, könnte eine Hilfe zur Vermeidung von Alleinunfällen sein. Die hohe Unfallfolgeschwere zeigt, dass gerade in diesem Bereich noch viel zu tun ist.

Betrachtet man alle schwer verletzten oder getöteten Insassen, so verunglücken 38,1 % beim Fahrnfall. Damit nimmt dieser Unfalltyp eine negative Sonderstellung ein. Diese Tatsache drückt sich auch bei der Betrachtung der schwer verletzten und getöteten Insassen innerhalb des Fahrnfalls aus. Hier haben die schwer verletzten oder getöteten Insassen einen Anteil von 15,3 %. Damit ist das Risiko mehr als vier Mal größer, bei einem Fahrnfall getötet zu werden, als bei einem Unfall im Längsverkehr oder beim Einbiegen-/Kreuzen-Unfall.

Der vierthäufigste Unfalltyp mit 16,2 % ist der Abbiegeunfall. Um einen Abbiegeunfall handelt es sich, wenn der Unfall durch einen Konflikt zwischen

einem Abbieger und einem aus gleicher oder entgegengesetzter Richtung kommenden Verkehrsteilnehmer ausgelöst wurde. Hier dominiert ganz deutlich mit 63,5 % die Kollision zwischen Linksabbiegern und dem Gegenverkehr.

Ursache für diesen Unfalltyp kann das falsche Einschätzen der Annäherungsgeschwindigkeit des Gegenverkehrs sein. Ein System, das den Fahrer bei der Schätzung der Annäherungsgeschwindigkeit des Gegenverkehrs unterstützt, kann Abhilfe schaffen.

Nur 9,5 % der Insassen von Pkw werden schwer verletzt oder getötet, die in einen Abbiegeunfall verwickelt sind. Innerhalb des Abbiegeunfalls werden 3,5 % der Insassen schwer Verletzten oder getötet. Er ist damit der Unfalltyp mit den geringsten Verletzungsfolgen.

### Aufprallart

Die Aufprallart dient der Beschreibung der Kollisionssituation eines einzelnen Kollisionskontrahenten, d. h. sie beschreibt die Unfallsituation eines Unfallbeteiligten. Analysiert man das Unfalldatenmaterial unter dem Aspekt der Häufigkeit des Auftretens einer Aufprallart, so ergibt sich folgende Reihenfolge:

1. Frontalaufprall mit 54,7 %,
2. Heckaufprall mit 21,6 %,
3. Seitenaufprall mit 21,2 % (rechts: 9,1 %, links: 12,1 %).

Betrachtet man die Aufprallarten über die Verletzungsfolgeschwere der Insassen, so wird deutlich, dass der Heckaufprall die geringste Verletzungsfolgeschwere nach sich zieht. So werden 95,9 % ( $n = 700$ ) aller Verletzten bei Heckkollisionen leicht verletzt, nur 3 % ( $n = 22$ ) schwer verletzt und 0,1 % ( $n = 1$ ) getötet. Unter den leicht verletzten Insassen (AIS 1–2) sind mit 89,6 % der größte Teil AIS1-Verletzungen.

Diese hohe Zahl an AIS1-Verletzungen kann in Zusammenhang mit den HWS-Verletzungen stehen. Dieser Verletzungstyp zieht trotz geringer Verletzungsschwere erhebliche Folgekosten nach sich, weshalb die hohe Anzahl durchaus zum Handeln Anlass geben sollte. Die auf dem Markt erhältlichen Systeme aktiver Kopfstützen können die Gefahr von Halswirbelsäulenverletzungen erheblich reduzieren. Sie stellen somit eine kostengünstige Möglichkeit zur Verbesserung der passiven Sicherheit dar.

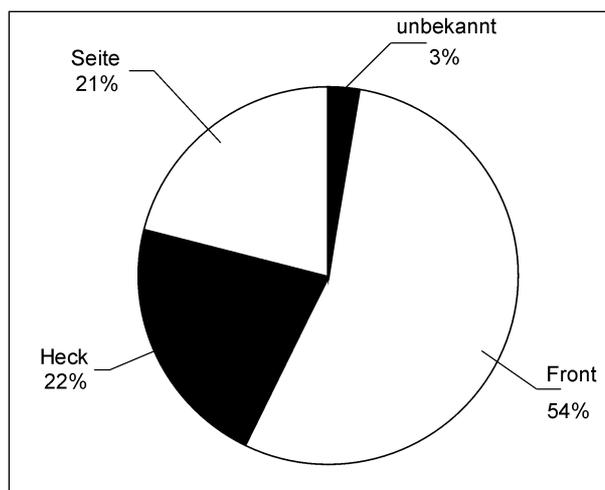


Bild 2.25: Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit von der Aufprallart

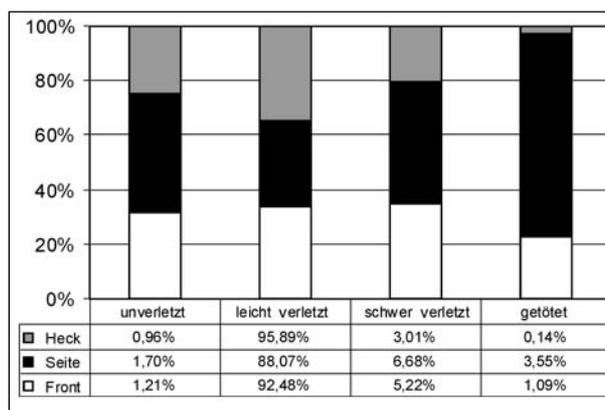


Bild 2.26: Verletzungshäufigkeit in Abhängigkeit von der Aufprallart

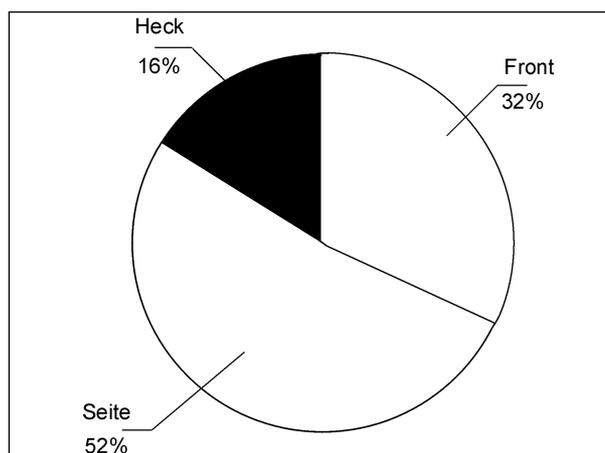


Bild 2.27: Verletzungshäufigkeit in Abhängigkeit von der Aufprallart für AIS3+ Verletzungen

Der Vergleich mit dem Frontalaufprall zeigt, dass der Seitenaufprall der mit den höheren Verletzungsfolgen ist. So werden mehr als drei Mal so viele Insassen betroffener Fahrzeuge beim Seitenaufprall getötet wie beim Frontalaufprall (3,6 % zu 1,1 %). Entsprechend liegt das Niveau der schwer

verletzten Insassen bei einem Seitenaufprall über dem des Frontaufpralls (6,7 % zu 5,2 %).

Speziell für die schweren Verletzungen AIS 3+ (n = 186) wird deutlich, dass der Seitenaufprall das Verletzungsgeschehen mit 52 % dominiert, obwohl er deutlich weniger häufig ist als der Frontaufprall. Mit 31 % sind dem Frontaufprall am zweithäufigsten AIS 3+ Verletzungen zuzuschreiben, gefolgt vom Heckaufprall mit 16 %.

Überdeckungsgrade

Um Ableitungen für relevante Testkonfigurationen machen zu können, bedarf es der Analyse der Aufprallarten hinsichtlich des Überdeckungsgrades. Der Überdeckungsgrad gibt an, welcher Anteil des Fahrzeuges vom gegnerischen Fahrzeug überdeckt worden ist. Die Angabe erfolgt als Prozentwert, wobei bei Kollisionen an der Front oder dem Heck des Fahrzeuges die Originalfahrzeugbreite 100 % und bei Kollisionen an der Seite des Fahrzeuges die Originalfahrzeuglänge 100 % entspricht.

Beim Frontaufprall ereignen sich 52,5 % aller Kollisionen mit Überdeckungsgraden von bis zu 50 %. In 30,7 % der Fälle wird das Fahrzeug zu 90–100 % vom Kollisionskontrahenten überdeckt. Besonders die Unfälle mit Teilüberdeckung stellen hohe Anforderungen an die Fahrzeugstruktur. Dagegen steigen bei vollen Überdeckungsgraden die Anforderungen an die Rückhaltesysteme.

Den Unfall mit seiner entsprechenden Überdeckungscharakteristik zu erkennen, um darauf reagieren zu können, stellt eine besondere Herausforderung für intelligente Rückhaltesysteme dar.

Beim Seitenaufprall dominieren mit 44,7 % Unfälle mit einem Überdeckungsgrad von bis zu 20 % der Fahrzeuglänge. Das ergibt bei einem Fahrzeug von etwa 4 m Länge einen Hauptdeformationsbereich von etwa 40 cm. Ein flächig mit der Front in die Seite prallendes Fahrzeug mit etwa 1,6 m Breite erzeugt einen Überdeckungsgrad von etwa 40 % beim Kollisionskontrahenten. In der Datenbasis sind die Unfallkonstellationen mit 31–50 % Überdeckung mit 29,4 % sehr häufig vertreten. Auch eine im Test nach ECE-R95 einlaufende Barriere erzeugt annähernd diesen Deformationsbereich. Dabei entstehen erheblich geringere Intrusionen als bei geringeren Überdeckungsgraden, die damit die höheren Anforderungen an die Fahrzeugstruktur stellen.

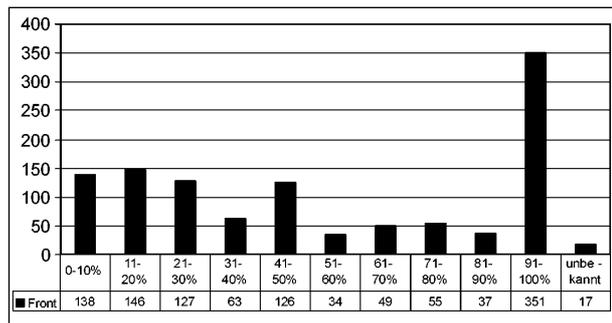


Bild 2.28: Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit vom Überdeckungsgrad für den Frontaufprall

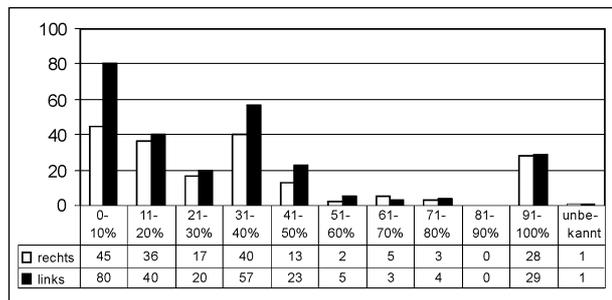


Bild 2.29: Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit vom Überdeckungsgrad für den Seitenaufprall

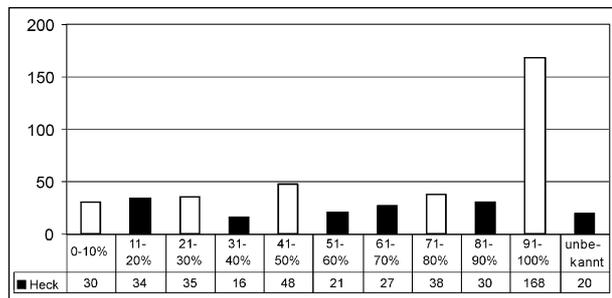


Bild 2.30: Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit vom Überdeckungsgrad für den Heckaufprall

Beim Heckaufprall dominieren mit einem Anteil von 36 % Kollisionen mit einem Überdeckungsgrad von 90–100 %. Das bedeutet, dass es sich typischerweise um Auffahrunfälle handelt, bei denen das gesamte Fahrzeugheck durch die Front des Kollisionskontrahenten überdeckt wird.

Aufprallarten und EES-Verteilung

Betrachtet man die Aufprallarten nach energieäquivalenten Geschwindigkeitsbereichen (EES), so ist festzustellen, dass 89,1 % aller Frontalkollisionen in einem EES-Bereich von bis zu 46 km/h stattfinden. Bereits 96,4 % der EES-Werte liegen unterhalb von 61 km/h. Das würde bedeuten, dass Aufprallversuche mit dieser Testgeschwindigkeit unter Verwendung einer starren Barriere 96,4 % aller realen Frontalkollisionen abdeckt.

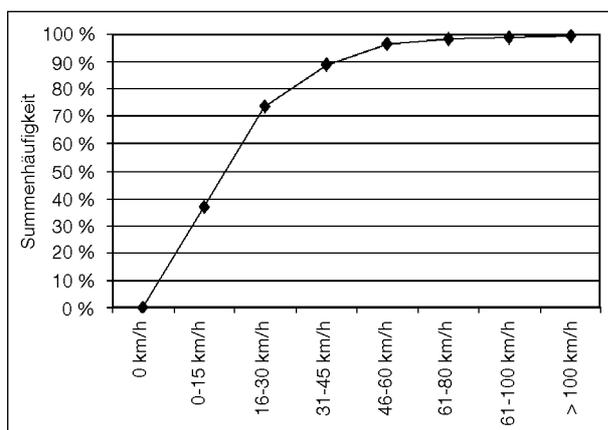


Bild 2.31: EES-Verteilung für den Frontalaufprall

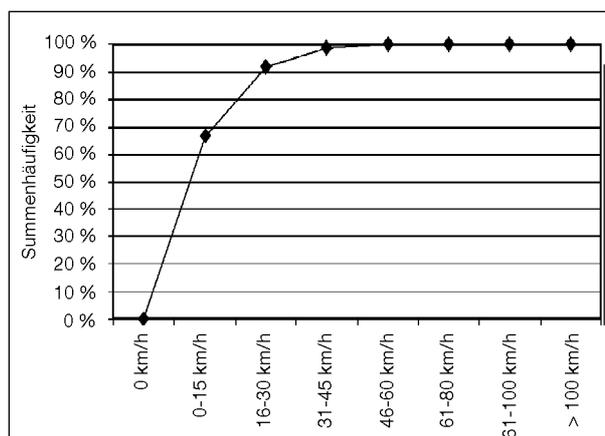


Bild 2.33: EES-Verteilung für den Heckaufprall

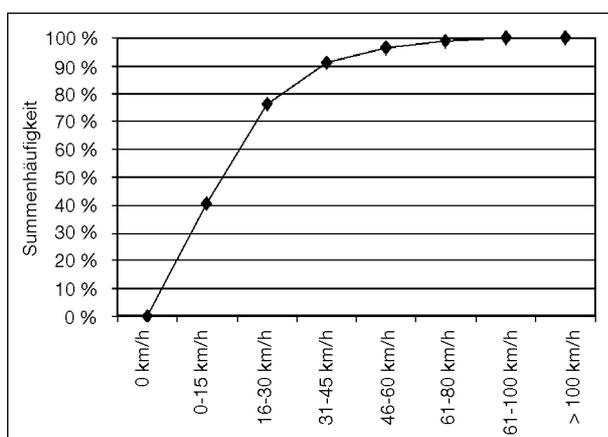


Bild 2.32: EES-Verteilung für den Seitenaufprall

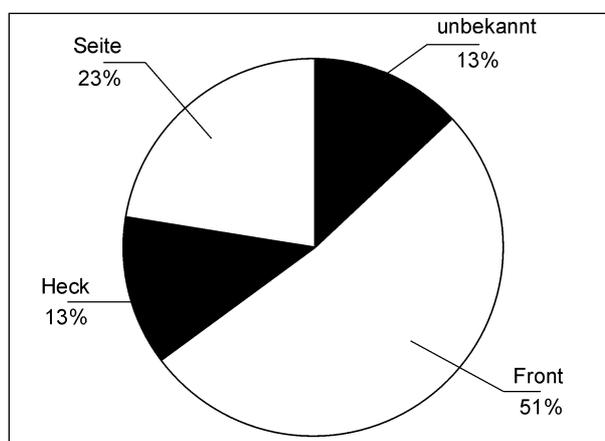


Bild 2.34: Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit von der Aufprallart für die Sekundärkollision

Für den Seitenaufprall ergibt sich ein ähnliches Bild. Hier liegen 91 % aller Werte unterhalb von 46 km/h und 96,6 % unterhalb von 61 km/h.

Für den Heckaufprall verschieben sich die energie-äquivalenten Geschwindigkeiten zu geringeren Werten, also zu Unfällen mit einer geringeren Unfallschwere. So liegen bereits 91,6 % aller Werte unterhalb von 31 km/h und 98,4 % unterhalb von 46 km/h.

#### Aufprallart und Sekundärkollision

Analysiert man die Sekundärkollision unter dem Gesichtspunkt der Aufprallart, so ergibt sich folgendes Bild:

1. Frontalaufprall mit 51 %,
2. Seitenaufprall mit 23 % (rechts: 17,9 %, links: 9,4 %),
3. Heckaufprall mit 13 %.

Die Reihenfolge der Aufprallarten entspricht der Primärkollision. Der Anteil an Heckkollisionen

nimmt allerdings stark ab. Mit 12 % sind aber auch deutlich mehr Aufprallarten unbekannt als bei der Primärkollision (3 %). Im Unterschied zur Primärkollision dominiert beim Seitenaufprall die rechte Fahrzeugseite und nicht die linke.

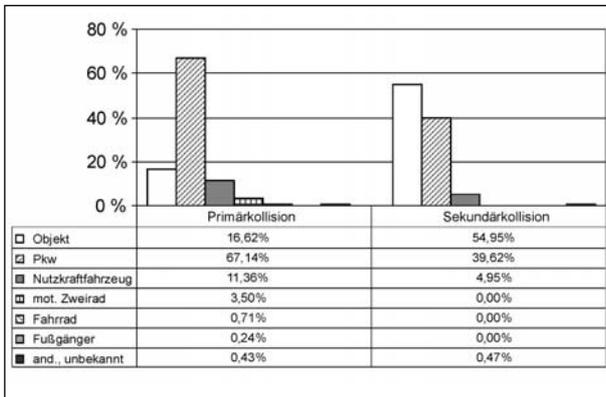
#### Kollisionskontrahenten

##### Primärkollision

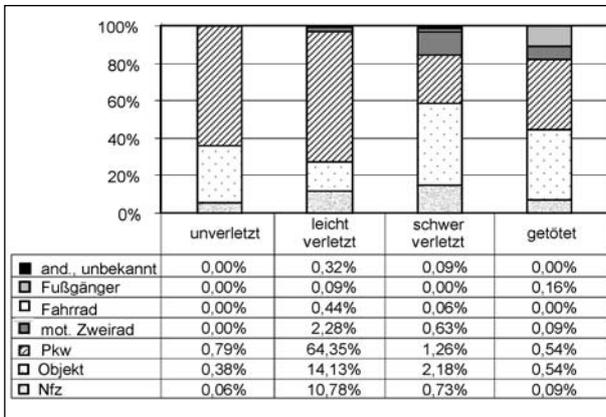
Es wird deutlich, dass bei der Primärkollision der Pkw als Gegner mit 67 % das Unfallgeschehen dominiert. Mit 16,6 % ist ein feststehendes Objekt der zweithäufigste Kollisionskontrahent des Pkw, gefolgt vom Nutzkraftfahrzeug mit 11,4 % und dem motorisierten Zweirad mit nur noch 3,5 %.

##### Sekundärkollision

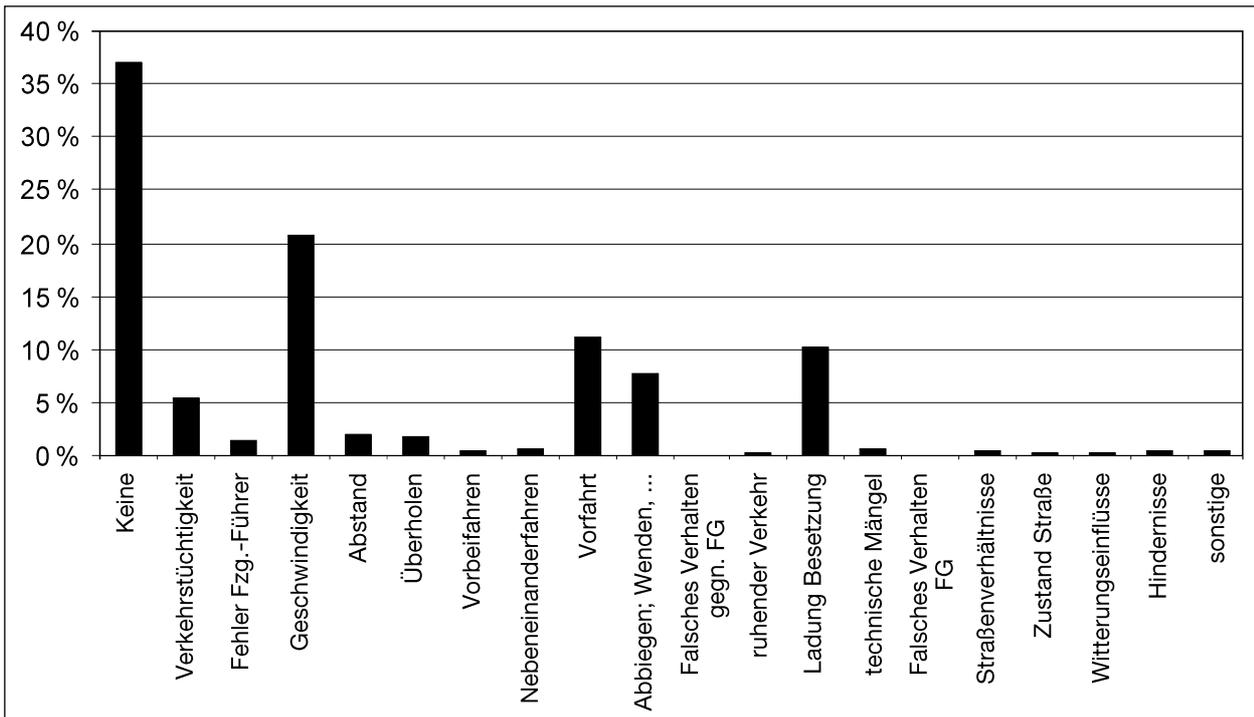
Betrachtet man die Sekundärkollision, so verschiebt sich das Bild deutlich. Während bei der Primärkollision der Pkw dominiert, ist bei der Sekundärkollision das Objekt mit ca. 55 % der häu-



**Bild 3.35:** Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit vom Kollisionskontrahenten für Primär- und Sekundärkollision



**Bild 2.36:** Verletzungshäufigkeit in Abhängigkeit vom Kollisionskontrahenten für die Primärkollision (100 % ist die Summe der Anzahl aller Verletzten)



**Bild 2.37:** Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit von der Unfallursache

figste Kollisionskontrahent. Am zweithäufigsten ist der Pkw mit 39,6 % vertreten, gefolgt vom Nutzkraftfahrzeug mit nur 4,9 %.

**Verletzungen Primärkollision**

Betrachtet man die Verletzungsfolgeschwere, so wird ersichtlich, dass gerade im Bereich der schweren Verletzungen das Objekt als Kollisionskontrahent deutlich mit 44 % Anteil an allen schwer verletzten Insassen vor dem Pkw (25,5 %) liegt.

Daraus könnte zum einen geschlossen werden, dass die Auslegung der Fahrzeuge auf einen Objektanprall notwendig ist, und zum anderen, dass der sekundäre Objektanprall in die grundsätzlichen Überlegungen zur Auslegung der RHS aufgenommen werden sollte.

Bei den getöteten Insassen dominieren Pkw und Objekt mit einem Anteil von jeweils 38 % an allen getöteten Pkw-Insassen das Bild.

**Unfallursachen**

Bei der Betrachtung der Unfallursachen fällt auf, dass in 36,9 % (767 Fälle) keine Ursache für den Unfall ermittelt werden konnte. Damit wird die Aussagekraft der restlichen Fälle verringert, trotzdem

lassen sich Tendenzen erkennen. Zu den häufigsten primären Unfallursachen gehören somit:

1. unangepasste Geschwindigkeit mit 20,6 % (n = 429),
2. Missachtung der Vorfahrt mit 11,1 % (n = 231),
3. falsche Ladung/Besetzung mit 10,1 % (n = 209),
4. falsches Verhalten bei Abbiegen/Wenden mit 7,7 % (n = 159),
5. mangelnde Verkehrstüchtigkeit des Fahrers mit 5,3 % (n = 111).

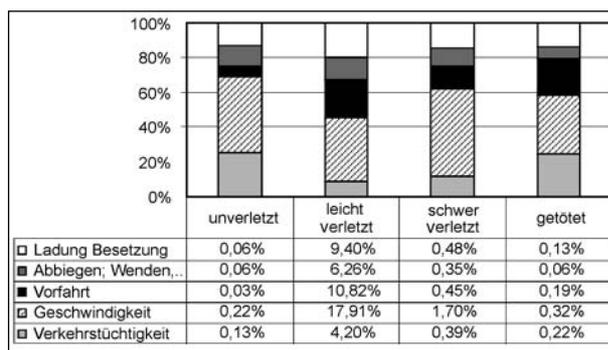
Zu dem Punkt „Falsche Beladung/Besetzung“ zählen alle Unfälle, die primär durch Überladung, Überbesetzung und ungesicherte Ladung verursacht worden sind.

### Verletzungen

Der größte Teil der Unfälle ohne ermittelte Ursache geht nur mit Verletzungen im MAIS1-Bereich einher (94,9 %).

Für eine detaillierte Betrachtung der Verletzungen in Abhängigkeit der Unfallursache werden nur die fünf häufigsten Unfallursachen analysiert.

Unfälle mit unangepasster Geschwindigkeit als Ursache haben am häufigsten schwere Folgen. So sind 24,2 % aller Getöteten und 34,2 % aller



**Bild 2.38:** Verletzungshäufigkeit für die fünf häufigsten Unfallursachen

	leicht verletzt	schwer verletzt	getötet
Verkehrstüchtigkeit	4,5 %	7,8 %	19,7 %
Geschwindigkeit	19,4 %	34,2 %	24,2 %
Vorfahrt	11,7 %	9 %	14,4 %
Abbiegen/Wenden	6,8 %	7 %	4,5 %
Ladung/Besetzung	10,2 %	9,7 %	9,8 %

**Tab. 2.3:** Verletzungshäufigkeit für die fünf häufigsten Unfallursachen bezogen auf die jeweilige Verletzungs-kategorie

schwer Verletzten auf unangepasste Geschwindigkeit zurückzuführen.

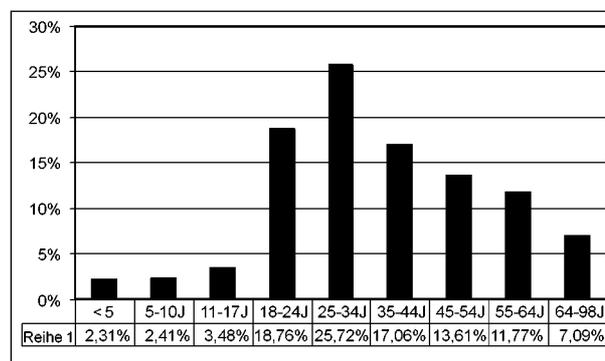
Obwohl die Verkehrstüchtigkeit mit 5,3 % nur die fünfhäufigste Unfallursache ist, rangiert sie doch mit 19,7 % Anteil an allen getöteten Insassen an zweiter Stelle.

### 2.3.3 Personen

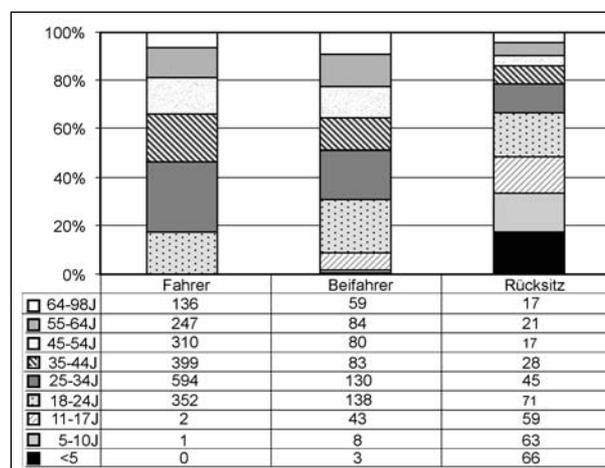
#### Alter

Für alle Sitzplätze kann man feststellen, dass 44,5 % aller Insassen zwischen 18 und 34 Jahren alt sind (18–25 Jahre: 18,8 %, 25–34 Jahre 25,7 %). Dies stellt die dominierende Altersgruppe bei den Fahrzeuginsassen dar.

Betrachtet man das Alter der in die Unfälle verwickelten Fahrer, so sind 29,1 % von ihnen zwischen 25 und 34 Jahren alt. Die zweithäufigste Altersklasse stellen die 35–44-jährigen Fahrer mit 19,5 % dar, gefolgt von den 18–24-Jährigen mit einem Anteil von 17,3 %.



**Bild 2.39:** Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit vom Alter der Fahrzeuginsassen



**Bild 2.40:** Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit vom Alter für Fahrer, Beifahrer und Rücksitzinsassen

Bei den Beifahrern dominiert die Altersgruppe von 18–24 Jahren mit 22 %. Die 25–34-jährigen Beifahrer haben einen Anteil von 20,7 %. Alle anderen Altersklassen liegen unter 15 %.

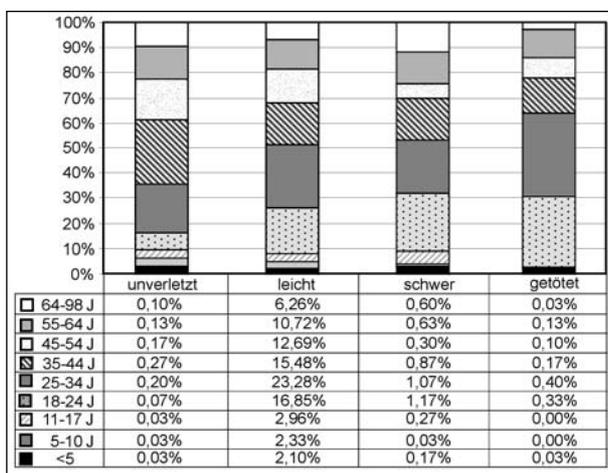
Ein deutlicher Unterschied besteht im Vergleich zu den Rücksitzinsassen. Auf der Rückbank dominieren deutlich die jüngeren Insassen. Insassen unter 11 Jahren haben einen Anteil von 40,2 % (< 5 Jahre: 20,6 %, 5–10 Jahre: 19,6 %). Mit 22,1 % Anteil folgen die 18–24-jährigen Insassen, gefolgt von den 11–17-jährigen mit 18,4 %.

**Verletzungssituation in Abhängigkeit vom Alter**

Bei den leicht verletzten Insassen führt die Gruppe der 25–34-Jährigen mit 23,3 % Anteil an den Gesamtverletzten, gefolgt von den 18–24-Jährigen (16,9 %) und den 25–44-Jährigen (15,5 %).

Insassen im Alter zwischen 18 und 24 Jahren werden am häufigsten schwer verletzt (1,2 %), im Vergleich zu allen Altersklassen bezogen auf alle Verletzten, gefolgt von den 25–34-Jährigen (1,1 %) und den 35–44-Jährigen (0,9 %). Damit ist die Wahrscheinlichkeit, im Alter zwischen 18 und 24 Jahren schwer verletzt zu werden, vier Mal höher als in der Altersgruppe zwischen 45 und 54 Jahren (1,2 % zu 0,3 %) und immer noch doppelt so hoch wie für die 55–98-Jährigen (1,2 % zu 0,6 %).

Die Gruppe der 45–54-Jährigen weist außer dem geringen Risiko für schwere Verletzungen auch eine deutlich geringere Wahrscheinlichkeit für tödliche Verletzungen auf (0,1 %) bezogen auf alle Verletzten in allen Altersgruppen. Das ist nur ein Viertel des Risikos von dem in der Altersklasse zwischen 25 und 34 Jahren (0,4 %).



**Bild 4.41:** Verletzungshäufigkeit in Abhängigkeit vom Alter

Betrachtet man die Verletzungsfolgeschwere innerhalb der Altersgruppen, so fällt auf, dass der überwiegende Anteil aller Insassen in allen Altersklassen nur leicht verletzt wird (> 90 %).

Bei den erwachsenen Unfallbeteiligten ist das Risiko für schwere Verletzungen innerhalb der 45–54-Jährigen mit 2,2 % am geringsten. Damit ist das Risiko für schwere Verletzungen in dieser Gruppe 3,7 Mal geringer als innerhalb der Gruppe von 64 bis 98 Jahren (8,6 %) und noch 2,7 Mal geringer als bei den jugendlichen Fahrern zwischen 18 und 24 Jahren (6,3 %).

In der Altersklasse von 45–54 Jahren ist die Wahrscheinlichkeit für tödliche Verletzungen 2,4 Mal geringer als bei den 18–24-Jährigen und noch 2,1 Mal geringer als bei den 25–34-Jährigen. Dabei ist zu erwähnen, dass die 64–98-Jährigen zwar mit 0,5 % das geringste Risiko aufweisen, diese Zahl aber auf einer viel zu kleinen Anzahl von Fällen aufbaut (n = 1).

Bei den Insassen unter 18 Jahren ist die Fallzahl sehr gering, so dass man für schwer verletzte Insassen nur Tendenzen, aber keine belastbaren Aussagen machen kann. Das Risiko für schwere Verletzungen im Alter zwischen 5 und 10 Jahren ist am geringsten (1,4 %). Es ist damit über fünf mal kleiner als in den angrenzenden Altersklassen (< 5 Jahre: 7,14 %; 11–17 Jahre: 8,16 %).

**Gewicht**

Für alle Sitzplätze kann man feststellen, dass 81 % der Insassen zwischen 56 und 85 kg wiegen. Im Einzelnen ergibt sich die in Tabelle 2.4 dargestellte Reihenfolge.

Alle anderen Gewichtsklassen haben einen Anteil unter 5 %.

Aus Bild 2.42 geht hervor, dass die Gewichtsverteilung nach Sitzplatz sehr stark differiert.

Betrachtet man den Pkw-Fahrer, so dominieren zwei Gewichtsklassen: 42 % der Fahrer wiegen

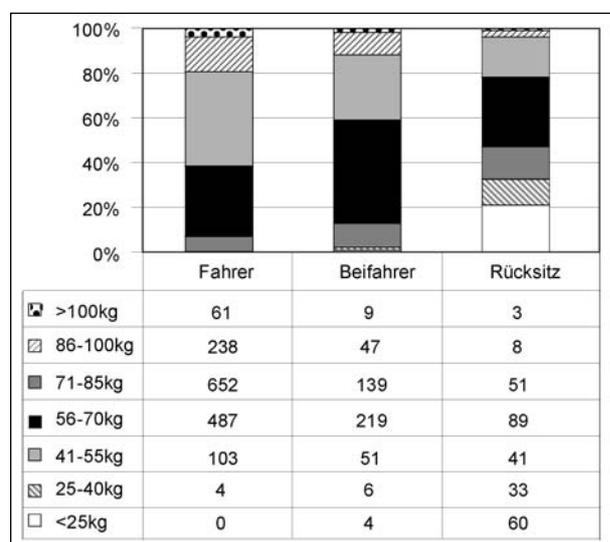
Gewichtsklasse	Häufigkeit
71 – 85 kg	36,5 %
56 – 70 kg	34,5 %
86 – 100 kg	12,7 %
41 – 55 kg	8,5 %

**Tab. 2.4:** Häufigkeitsverteilung der Gewichtsklassen

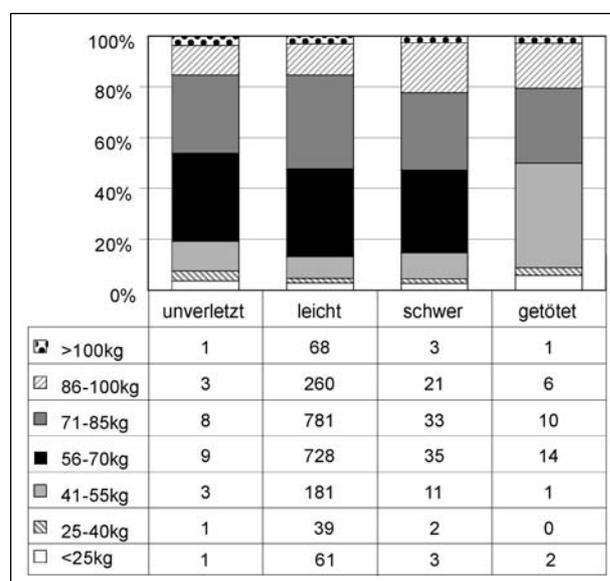
zwischen 71 und 85 kg, gefolgt von der Gewichtsklasse von 56–70 kg mit 31,5 %.

Ein ähnlich dominantes Verhalten dieser Gewichtsklassen lässt sich für die Beifahrer feststellen. 46,1 % der Beifahrer liegen in der Gewichtsklasse von 56–70 kg, gefolgt von der Klasse zwischen 71 und 85 kg mit 29,3 %.

Entsprechend der Altersverteilung finden wir auf den Rücksitzen die leichteren Insassen. 47 % der Rücksitzinsassen wiegen unter 55 kg (< 40 kg: 32,6 %). 31,2 % der Rücksitzinsassen wiegen zwischen 56 und 70 kg, gefolgt von den 71–85 kg schweren Insassen mit 18 %.



**Bild 2.42:** Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit vom Gewicht für Fahrer, Beifahrer und Rücksitzinsassen



**Bild 2.43:** Verletzungshäufigkeit in Abhängigkeit vom Gewicht

Verletzungssituation in Abhängigkeit des Gewichtes

Leichte Verletzungen treten hauptsächlich bei den 56–85 kg schweren Insassen auf (71,2 %), gefolgt von den über 86 kg schweren (15,5 %) und den unter 55 kg schweren Insassen (13,3 %).

Bei den schweren Verletzungen dominieren zu fast gleichen Anteilen die 56–70 kg schweren (32,4 %) und die 71–85 kg schweren Insassen (30,6 %). Allerdings nimmt der Anteil der 86–100 kg schweren Insassen auf 19,4 % zu. Der Anteil der Insassen mit 41–55 kg steigt im Vergleich zu den leichten Verletzungen auf 10,2 % an.

Bei den Getöteten dominieren mit 41,7 % die 56–70 kg schweren Insassen. Es folgen mit 29,4 % die 71–85 kg Insassen, gefolgt von den 86–100 kg Insassen mit 17,6 %. Der Anteil der 41–55 kg Insassen nimmt deutlich ab (2,9 %), allerdings steigt dagegen der Anteil der unter 25 kg Insassen an (5,9 %).

Betrachtet man die Verletzungsverteilung innerhalb der Gewichtsklassen, so fällt auf, dass 3 % ( $n = 2$ ) aller Insassen unter 25 kg getötet werden. Das ist sechs Mal so häufig wie in der Klasse 41–55 kg (0,5 %). Diese Klasse stellt auch das geringste Risiko für tödliche Verletzungen dar (56–70 kg: 1,9 %; 71–85 kg: 1,2 %; 86–100 kg: 1,4 %). Der Anteil der schwer Verletzten innerhalb einer Klasse liegt für alle Gewichtsklassen auf etwa demselben Niveau (4,1 %–5,6 %). Der Datenbasis entsprechend dominieren die leichten Verletzungen, die wiederum über alle Klassen hinweg auf gleichem Niveau liegen (89,7 %–93,2 %).

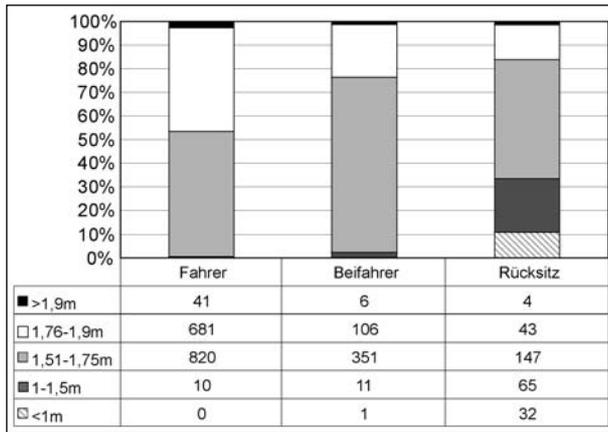
### Körpergröße

Sitzplatzunabhängig kann man feststellen, dass 56,9 % aller Insassen zwischen 1,51 m und 1,75 m groß sind. Über die Größenklassen hinweg ergibt sich die in Tabelle 2.5 dargestellte Rangfolge.

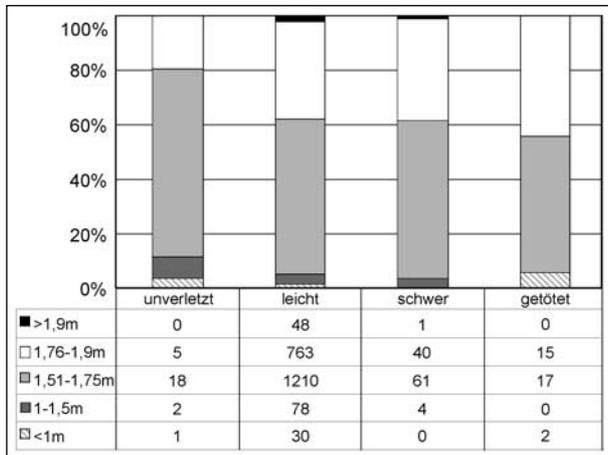
Betrachtet man die Größe der Insassen in Abhängigkeit der Sitzplätze, so dominieren auf den vor-

Größenklasse	Häufigkeit
1,51 – 1,75 m	56,9 %
1,76 – 1,9 m	35,8 %
1 – 1,15	3,7 %
> 1,9 m	2,2 %
< 1 m	1,4 %

**Tab. 2.5:** Häufigkeitsverteilung der Größenklassen



**Bild 2.44:** Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit von der Körpergröße für Fahrer, Beifahrer und Rücksitzinsassen



**Bild 2.45:** Verletzungshäufigkeit in Abhängigkeit von der Körpergröße

deren Sitzen die Insassen zwischen 1,51 m und 1,9 m.

Für den Fahrerplatz lässt sich ermitteln, dass 52,8 % der Insassen hinter dem Steuer zwischen 1,51 m und 1,75 m groß sind, gefolgt von der Klasse der 1,76 m–1,9 m großen Insassen mit 43,9 %.

Ein ähnliches Bild ergibt sich auch für den Beifahrer. Allerdings ist die Dominanz der Gruppe zwischen 1,51 m und 1,75 m am größten, verglichen mit den anderen Sitzplätzen. Hier gehören 73,9 % aller Beifahrer dieser Größenklasse an, gefolgt von den 1,76 m bis 1,9 m großen Beifahrern mit nur noch 22,3 % Anteil.

Auf den Rücksitzen dagegen verteilen sich die Größenklassen mehr, ohne dass die Dominanz der 1,51–1,76 m großen Insassen verloren geht (30,9 %). Mit 13,7 % ist die Größenklasse zwischen 1 m bis 1,5 m vertreten, gefolgt von den 1,76 m–1,9 m großen Insassen mit 9,1 %. Man kann feststellen, dass Menschen mit einer Körpergröße ab 1,76 m kaum noch die Rücksitze benutzen (9,9 %).

### Verletzungssituation in Abhängigkeit von der Körpergröße

Bei den unverletzten Insassen dominieren die 1,51–1,75 m großen Insassen deutlich mit 69,2 %.

Es ist wieder erkennbar, dass die deutliche Mehrheit aller Insassen leicht verletzt wird. Hier dominiert wiederum die Größenklasse 1,51–1,75 m mit 56 %, gefolgt von den 1,76–1,9 m großen Insassen mit 35,8 %. Der Anteil der anderen Größenklassen liegt unter 5 %.

Das gleiche Bild ergibt sich bei den schwer verletzten Insassen (1,51–1,75 m: 57,6 %; 1,76–1,9 m: 37,7 %).

Auch bei den getöteten Insassen dominieren diese beiden Klassen ganz klar, wobei der Anteil der 1,76–1,9 m großen Insassen auf 44,1 % steigt (1,51–1,75: 50 %).

Allerdings werden 6,1 % der Kinder (< 1 m) getötet. Damit besteht hier ein etwa dreifach höheres Risiko für tödliche Verletzungen im Vergleich zu den anderen Größenklassen. Aufgrund der geringen Zahlen für diese Gruppe sind die Zahlen statistisch nicht belastbar. So blieb von 33 Kindern (< 1 m) ein Kind unverletzt, 30 wurden leicht verletzt und zwei getötet.

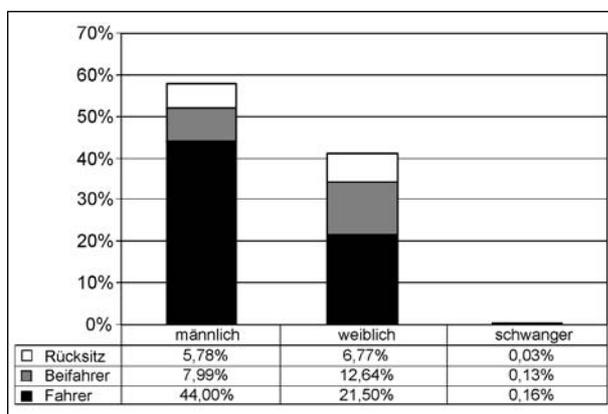
### Geschlecht

Aus Bild 2.46 geht hervor, dass das Verhältnis männlicher zu weiblichen Fahrern in etwa 2 zu 1 ist (21,5 % zu 44 %). Für den Beifahrer ergibt sich ein Verhältnis von 1 zu 1,5 (8 % zu 12,6 %). Auf den Rücksitzen sind die Verhältnisse bedeutend ausgeglichener (5,8 % zu 6,8 %).

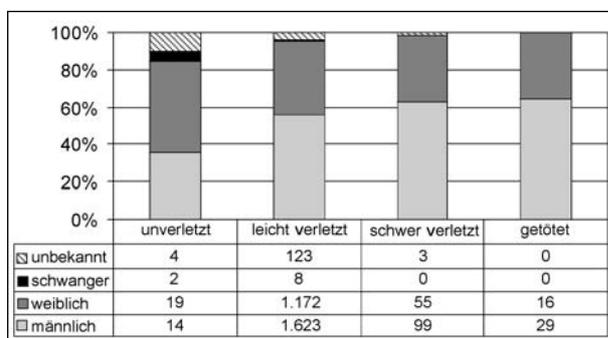
### Verletzungssituation in Abhängigkeit vom Geschlecht

Bei den leicht verletzten Insassen dominieren mit 51,3 % Anteil an allen Verletzten die männlichen Pkw-Fahrer (weiblich: 37 %). Bei den schwer verletzten Insassen führen wiederum die männlichen Insassen mit 3,1 % (weiblich: 1,7 %). Das gleiche Bild ergibt sich auch für die getöteten Insassen (männlich: 0,9 %; weiblich: 0,5 %). Generell werden die Männer im Fahrzeug schwerer verletzt als Frauen bezogen auf alle Verletzten.

Analysiert man die Verletzungsfolgeschwere innerhalb der Geschlechter, so liegen Männer und Frauen sowohl für die leicht Verletzten (91,9 % zu



**Bild 2.46:** Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit vom Geschlecht



**Bild 2.47:** Verletzungshäufigkeit in Abhängigkeit vom Geschlecht

92,9 %), die schwer Verletzten (5,6 % zu 4,4 %) als auch die Getöteten (1,6 % zu 1,3 %) auf etwa demselben Niveau. Allerdings bleiben Männer fast doppelt so häufig unverletzt wie Frauen (0,8 % zu 1,5 %).

## Gurtanlegequote

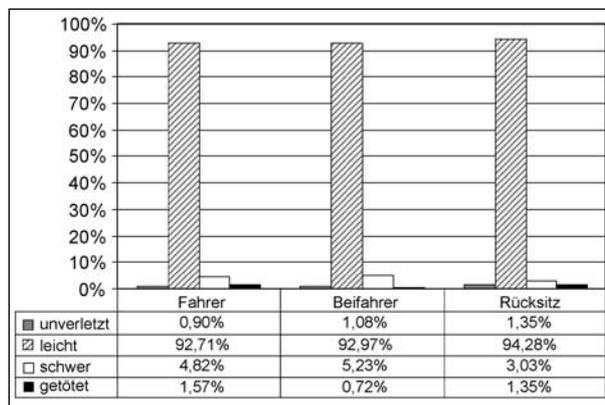
Ein entscheidender Punkt ist die Akzeptanz der Rückhaltesysteme bei den Insassen. Hier verdeutlicht die Gurtanlegequote, dass noch ein beträchtliches Potenzial zur Minimierung der Verletzungsfolgeschwere besteht. Es ergibt sich das in Tabelle 2.6 gezeigte Bild für die Gurtanlegequote.

Möglicherweise sind die niedrigen Gurtanlegequoten darauf zurückzuführen, dass den Fahrzeuginsassen nicht ausreichend verdeutlicht wird, wie effektiv der Gurt schützt, und dass andere Systeme (Airbag) ohne Gurt nur eine minimale Schutzwirkung erzielen können.

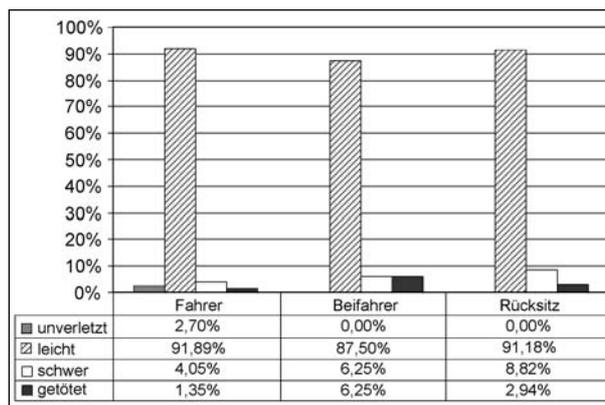
Hier sollte in Zukunft mehr Arbeit geleistet werden, um die Insassen auf einen nicht angelegten Gurt hinzuweisen. Dies kann optisch und auch akustisch geschehen (seat belt reminder).

Sitzplatz	Anlegequote
Fahrer (n = 2.107)	86 % (n = 1.813)
Beifahrer (n = 679)	84,8 % (n = 576)
Rücksitz (n = 428)	70,6 % (n = 302)

**Tab. 2.6:** Gurtanlegequote nach Sitzplätzen



**Bild 2.48:** Verletzungshäufigkeit in Abhängigkeit vom Sitzplatz bei angelegtem Gurt (n = 2.636)



**Bild 2.49:** Verletzungshäufigkeit in Abhängigkeit vom Sitzplatz bei nicht angelegtem Gurt (n = 124)

## Verletzungen

Ein Vergleich der Verletzungsrisiken bei angelegtem und nicht angelegtem Gurt zeigt insbesondere für Beifahrer und Rücksitz deutlich, wie sich die Gefahr, schwere oder tödliche Verletzungen zu erleiden, erhöht, wenn kein Gurt angelegt ist.

Die Chance, einen Unfall unverletzt zu überstehen, ist für Beifahrer und Rücksitzinsassen bei nicht angelegtem Gurt gleich null (Bilder 2.48 und 2.39). Zu beachten sind allerdings die geringen Fallzahlen (n = 124), sodass man Tendenzen erkennen kann, diese aber statistisch nicht belastbar sind.

So ist die Wahrscheinlichkeit, auf den Rücksitzen unangegurtet schwere Verletzungen zu erleiden, in etwa 2,5 mal höher als angegurtet (8,8 % zu 3 %).

Für die getöteten Insassen liegt dieser Faktor bei ca. 2 (2,9 % zu 1,3 %).

Für die Beifahrer liegt die Wahrscheinlichkeit, gegurtet oder ungegurtet schwer verletzt zu werden, in etwa auf gleichem Niveau (5,2 % zu 6,2 %).

Für die Beifahrer ist die Wahrscheinlichkeit, unangegurtet getötet zu werden, 8,5 mal höher als angegurtet (0,72 % zu 6,25 %).

Für den Fahrer ist das Risiko, unangegurtet oder angegurtet getötet oder schwer verletzt zu werden, in etwa gleich.

## Verletzungssituation

### Kontakt der Körperteile

Bestimmte Strukturteile werden öfter getroffen als andere. Bei einem großen Teil der Unfälle kommt es zu keinen Kontakten des Insassen mit Innenraum- bzw. Strukturteilen. Außerdem sind Kontakte mit undefinierten Innenraumteilen sehr häufig.

Der Kopf trifft am häufigsten das Lenkrad (3,12 %), gefolgt von der Windschutzscheibe (3,0 %). Zu beachten bleibt, dass doppelt so häufig (6,24 %) ein undefinierter Kontakt des Kopfes vorliegt.

Der Hals des Insassen hat sehr häufig Kontakt zu Innenraumteilen (20,91 %), allerdings sind die Kontakte in der Datenbasis nicht näher definiert. Mit 677 Fällen ist der Kontakt Hals – Sonstiges der am häufigsten auftretende Kontakt überhaupt.

Dem Gurtband sind 10,8 % aller Verletzungen des Thorax zu zurechnen.

Die oberen Extremitäten haben zu fast gleichen Teilen Kontakt mit der Seitenstruktur (2,29 %) und dem Lenkrad (2,13 %). Außerdem findet der Kontakt mit undefinierten Innenraumteilen in etwa der gleichen Größenordnung statt (3,71 %).

Bei den unteren Extremitäten dominiert der Beinanprall an die Armaturentafel (6,43 %).

Absolut betrachtet dominiert der Kontakt des Halses gegen sonstige Teile mit 677 Fällen, gefolgt von 350 Fällen Gurt-Thorax-Kontakt. Der Kopfanprall gegen sonstige Teile ist mit 202 Fällen der Dritthäufigste.

### Verletzungshäufigkeit nach Sitzplatz

#### Fahrer

Bei der Betrachtung der Häufigkeit der Verletzungen der einzelnen Körperregionen (AIS 1–6) für den Fahrer (Bild 2.50) ergibt sich folgende Reihenfolge:

1. Hals mit 43,5 %,
2. Kopf mit 33,5 %,
3. Thorax mit 31,3 %,
4. untere Extremitäten mit 24,8 %,
5. obere Extremitäten mit 21,3 %,
6. Abdomen mit 6,3 %,
7. Becken mit 5,4 %.

	Kopf %	Hals %	Thorax %	Arme %	Abdomen %	Becken %	Beine %
Armaturentafel	1,51	0,12	0,37	1,70	0,03	0,09	6,43
Frontscheibe	3,00	0,12	0,09	1,36	0,00	0,00	0,09
Innenausstattung	1,92	1,17	1,42	0,40	0,46	0,28	1,11
Lenkrad	3,12	0,06	1,82	2,13	0,43	0,15	0,37
Gurtband	0,12	0,56	10,81	0,12	1,02	0,96	0,06
Seitenstruktur	1,39	0,09	1,54	2,29	0,34	0,65	0,68
Seitenscheibe	2,07	0,09	0,22	0,93	0,00	0,03	0,06
Dach	1,24	0,19	0,22	0,15	0,00	0,00	0,03
Straße	0,15	0,03	0,22	0,15	0,03	0,03	0,06
Fußraum vorn	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	1,70
Innenraum hinten	0,00	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00
außerhalb Fzg.	0,37	0,03	0,28	0,31	0,12	0,09	0,22
überrollt werden	0,03	0,03	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00
sonst.	6,24	20,91	3,74	3,71	1,54	0,74	2,93
kein Anprall	78,83	76,58	79,25	86,63	96,02	96,91	86,25

Tab. 2.7: Kontakthäufigkeit einzelner Körperteile mit dem Fahrzeuginnenraum

### Beifahrer

Bei der Betrachtung der Häufigkeit der Verletzungen der einzelnen Körperregionen (AIS 1–6) für den Beifahrer (Bild 2.51) ergibt sich folgende Reihenfolge:

1. Kopf mit 33,5 %,
2. Hals mit 44,6 %,
3. Thorax mit 34 %,
4. untere Extremitäten mit 22,7 %,
5. obere Extremitäten mit 17 %,
6. Becken mit 5,8 %,
7. Abdomen mit 4,9 %.

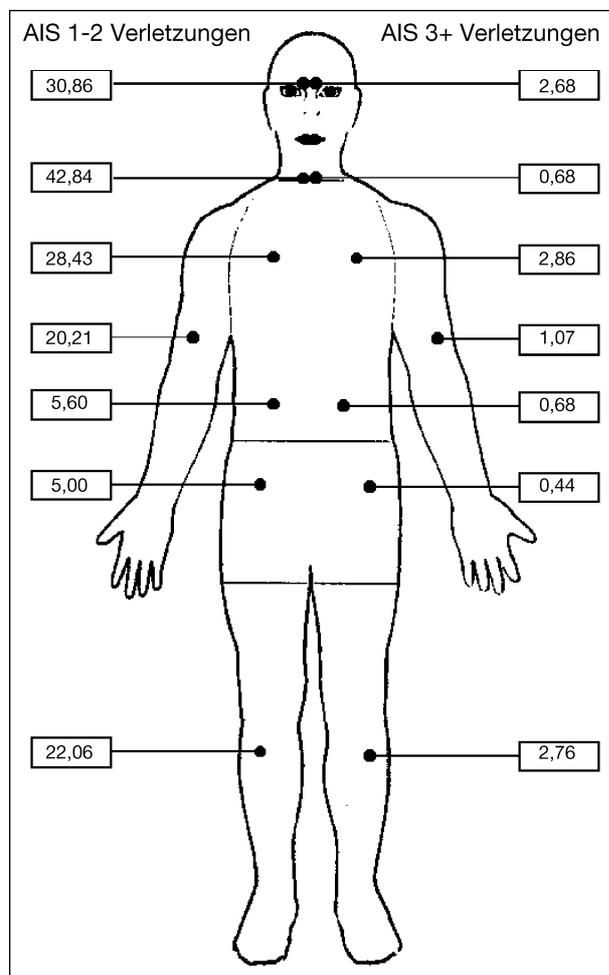
### Rücksitz

Bei der Betrachtung der Häufigkeit der Verletzungen der einzelnen Körperregionen (AIS 1–6) für die

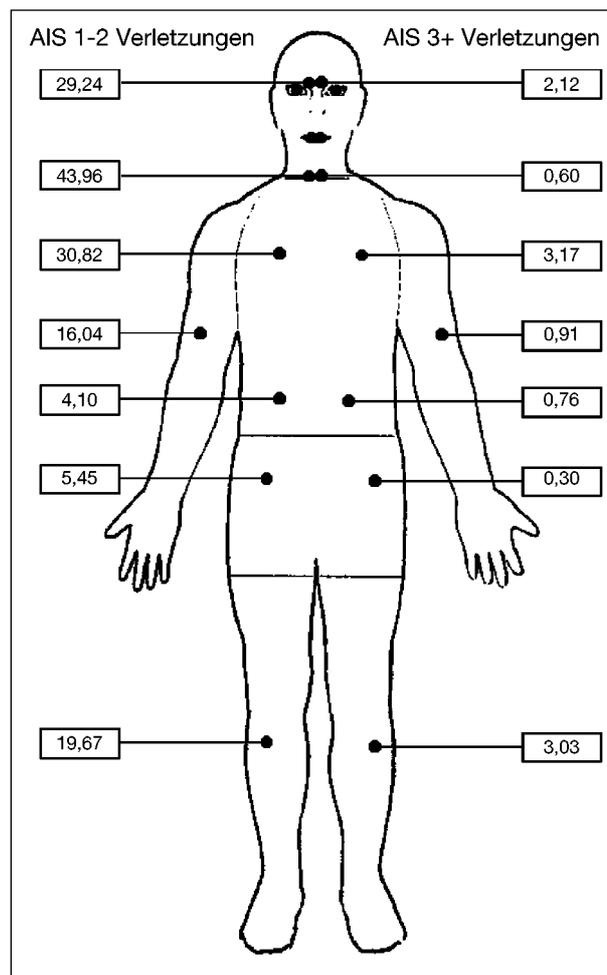
Rücksitzinsassen (Bild 2.52) ergibt sich folgende Reihenfolge:

1. Kopf mit 37,3 %,
2. Hals mit 36,1 %,
3. Thorax mit 27,1 %,
4. untere Extremitäten mit 23,1 %,
5. obere Extremitäten mit 16,6 %,
6. Abdomen mit 6,3 %,
7. Becken mit 6 %.

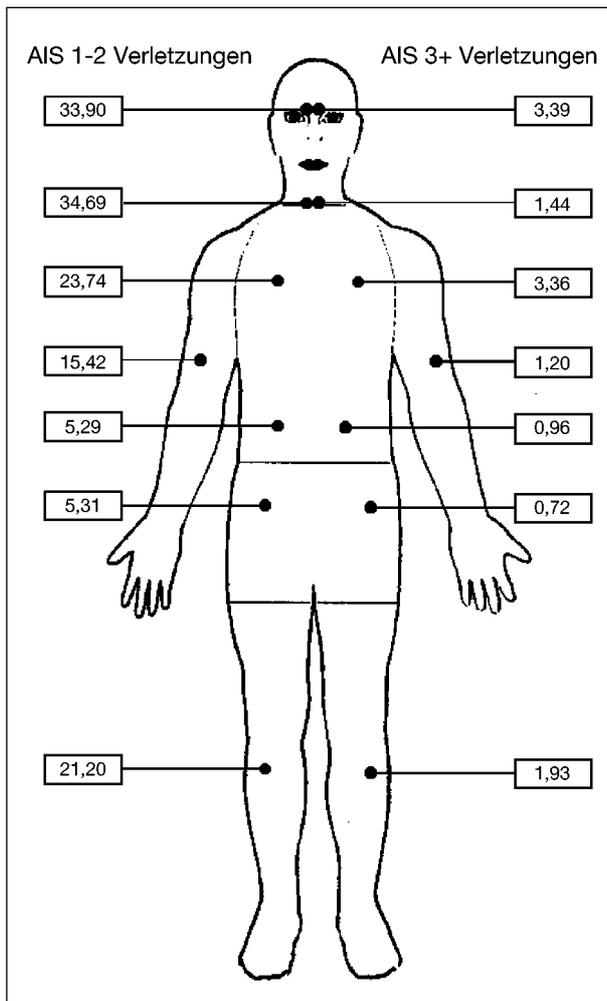
Auffällig ist, über alle Sitzplätze hinweg, die insgesamt schlechtere Situation für Hals, Kopf und Thorax bezüglich der Verletzungshäufigkeit. Deutlich wird auch die mit jeweils über 20 % hohe Verletzungshäufigkeit der unteren Extremitäten. Da für Fahrer und Beifahrer ähnliche Verletzungshäufigkeiten vorliegen, kann hier nicht direkt auf einen negativen Einfluss der Pedalarie geschlossen werden.



**Bild 2.50:** Verletzungshäufigkeit der einzelnen Körperregionen des Fahrers



**Bild 2.51:** Verletzungshäufigkeit der einzelnen Körperregionen des Beifahrers



**Bild 2.52:** Verletzungshäufigkeit der einzelnen Körperregionen der Rücksitzinsassen

Vergleich der Verletzungen der Körperteile hinsichtlich Sitzplatz und Verletzungsschwere

#### Kopfverletzungen

##### Fahrer

Leichte Kopfverletzungen haben einen Anteil von 30,9 % an allen Kopfverletzungen des Fahrers. AIS 3+ Verletzungen sind mit 2,7 % deutlich weniger häufig.

##### Beifahrer

Die Kopfverletzungen für leichte und AIS 3+ Verletzungen (AIS 1–2 = 29,2 %, AIS 3+ = 2,1 %) liegen in etwa auf gleichem Niveau mit denen des Fahrers.

##### Rücksitzinsassen

Ein etwas erhöhtes Niveau weisen die leichten und AIS 3+ Verletzungen (AIS 1–2 = 33,9 %, AIS 3+ = 3,39 %) für die Rücksitzinsassen auf.

#### Halsverletzungen

##### Fahrer

Leichte Halsverletzungen haben einen Anteil von 42,8 % an allen Halsverletzungen des Fahrers. AIS 3+ Verletzungen treten mit 0,7 % deutlich in den Hintergrund.

##### Beifahrer

Die Halsverletzungen für leichte und AIS 3+- Verletzungen (AIS 1–2 = 44 %, AIS 3+ = 0,6 %) liegen in etwa auf gleichem Niveau mit denen des Fahrers.

##### Rücksitzinsassen

Hier ist festzustellen, dass das Risiko für leichte Halsverletzungen auf den Rücksitzen im Vergleich zu den vorderen Sitzplätzen mit 34,7 % deutlich geringer ist. Dafür ist die Wahrscheinlichkeit für AIS 3+ Verletzungen am Hals mit 1,44 % mehr als doppelt so hoch wie für Fahrer und Beifahrer.

#### Thoraxverletzungen

##### Fahrer

Leichte Thoraxverletzungen haben einen Anteil von 28,4 % an allen Thoraxverletzungen des Fahrers. AIS 3+ Verletzungen sind mit 2,7 % deutlich weniger häufig.

##### Beifahrer

Die Thoraxverletzungen für leichte und AIS 3+ Verletzungen (AIS 1–2 = 30,8 %, AIS 3+ = 3,2 %) liegen leicht über denen des Fahrers.

##### Rücksitzinsassen

Mit 23,7 % Anteil an allen Thoraxverletzungen liegen die leichten Verletzungen deutlich unterhalb der von Fahrer und Beifahrer. AIS 3+ Verletzungen dagegen liegen mit 3,4 % auf etwa demselben Niveau wie bei Fahrer und Beifahrer.

#### Untere Extremitäten

##### Fahrer

Leichte Verletzungen der unteren Extremitäten haben einen Anteil von 22 % an allen Beinverletzungen des Fahrers. AIS 3+ Verletzungen sind mit 2,8 % deutlich weniger häufig.

##### Beifahrer

Die Beinverletzungen für leichte und AIS 3+ Verletzungen (AIS 1–2 = 19,7 %, AIS 3+ = 3 %) liegen im

Bereich des Fahrers. Hier ist keine verringerte Gefahr aufgrund fehlender Pedalarie im Vergleich zum Fahrer festzustellen.

#### Rücksitzinsassen

Die Wahrscheinlichkeit für leichte Beinverletzungen liegt auf dem Niveau der vorderen Sitzplätze (AIS 1–2 = 21,2 %). Allerdings werden die Beine auf den Rücksitzen seltener so schwer verletzt wie vorn (AIS 3+ = 1,93 %).

#### Obere Extremitäten

##### Fahrer

Leichte Verletzungen der Arme haben einen Anteil von 20,2 % an allen Verletzungen der oberen Extremitäten des Fahrers. AIS 3+ Verletzungen sind mit 1,1 % deutlich weniger häufig.

##### Beifahrer

Die Armverletzungen für leichte Verletzungen liegen unter denen des Fahrers (AIS 1–2 = 16 %). Schwere Verletzungen liegen mit 0,9 % leicht unterhalb der des Fahrers.

##### Rücksitzinsassen

Auch auf den Rücksitzen werden die Arme deutlich seltener leicht verletzt als auf dem Fahrerplatz (AIS 1–2 = 15,4 %). Sie liegen auf dem Niveau des Beifahrers. Hier ist der Einfluss des fehlenden Lenkrades für Rücksitzinsasse und Beifahrer sichtbar. Dagegen liegen die schweren Verletzungen wieder im Bereich derer für Fahrer und Beifahrer (AIS 3+ = 1,2 %).

#### Abdomen

##### Fahrer

Leichte Verletzungen des Abdomens haben einen Anteil von 5,6 % an allen Verletzungen des Abdominalbereichs des Fahrers. AIS 3+ Verletzungen sind mit 0,7 % deutlich weniger häufig.

##### Beifahrer

Die leichten Abdominalverletzungen sind auf dem Beifahrerplatz mit 4,1 % weniger häufig als auf dem Fahrerplatz. AIS3+ Verletzungen sind mit 0,8 % deutlich weniger häufig, allerdings auf dem Niveau derer des Fahrers.

##### Rücksitzinsassen

Leichte Verletzungen des Abdomens haben einen Anteil von 5,3 %. Sie liegen damit oberhalb derer

des Beifahrers, aber auf gleichem Niveau mit denen des Fahrers. AIS 3+ Verletzungen sind mit 1 % deutlich weniger häufig, aber leicht über dem Niveau für Fahrer und Beifahrer.

#### Becken

##### Fahrer

Leichte Verletzungen des Beckens haben einen Anteil von 5 % an allen Verletzungen des Beckens des Fahrers. AIS 3+ Verletzungen sind mit 0,4 % deutlich weniger häufig.

##### Beifahrer

Die Beckenverletzungen für leichte und AIS3+-Verletzungen (AIS 1–2 = 5,5 %, AIS 3+ = 0,4 %) liegen in etwa auf gleichem Niveau mit denen des Fahrers.

##### Rücksitzinsassen

Die Beckenverletzungen für leichte Verletzungen (AIS 1–2 = 5,3 %) liegen in etwa auf gleichem Niveau mit denen des Fahrers und Beifahrers. Allerdings treten AIS 3+ Verletzungen in etwa doppelt so häufig auf wie bei Fahrer und Beifahrer (AIS 3+ = 0,7 %).

Betrachtet man speziell die AIS 3+ Verletzungen, so ist festzustellen, dass die größte Wahrscheinlichkeit für solche Verletzungen sitzplatzübergreifend am Kopf und am Thorax besteht. Über alle Körperteile und alle Sitzplätze hinweg liegt am Becken das geringste Risiko für schwere Verletzungen vor.

Sitzplatzübergreifend ist eine deutliche Dominanz bei leichten Halsverletzungen (AIS 1) festzustellen. Sie liegen beim Fahrer bei 41,9 %, beim Beifahrer bei 42,3 % und bei den Rücksitzinsassen bei 34,7 % aller Halsverletzungen. Bei diesem hohen Anteil an Halsverletzungen im AIS 1 Bereich rückt speziell das HWS-Syndrom in den Mittelpunkt. Die konsequentere Einführung aktiver Kopfstützen kann dieses Problem minimieren helfen.

#### Ausstattungsquote

Die in unserem Datenbestand geringe Ausrüstungsquote mit Gurtstraffern, Gurtkraftbegrenzern und Airbags lässt vermuten, dass die konsequente Einführung dieser Systeme in neuen Fahrzeugen die Verletzungssituation vor allem des Kopfes und des Thorax noch deutlich verbessert. Einzig der Frontairbag ist in 36,67 % aller Fahrzeuge des Datenmaterials verbaut.

	Gurt		Window-airbag	Straffer	Kraftbegrenzer
	Front-airbag	Side-airbag			
Fahrer	3,21 %	1,18 %	36,67 %	1,37 %	0,9 %
Beifahrer	1,13 %	0,19 %	9,22 %	0,38 %	0,33 %
Rücksitz	0,05 %	0,00 %	-	0,00 %	0,00 %

**Tab. 2.8:** Ausstattungsquote der Fahrzeuge in der Datenbasis bezogen auf alle Fahrzeuge (n = 2.116; ab Baujahr 1990)

### 3 Rückhaltesysteme

#### 3.1 RHS – Stand der Technik

Mit den heutigen Fahrzeugen wird bereits ein sehr hoher Sicherheitsstandard erreicht. Dies gilt nicht nur für Fahrzeuge der Oberklasse oder der oberen Mittelklasse. Klassenübergreifend werden Fahrzeuge mit dem heute umsetzbaren Know-how ausgestattet. Dies ist letztendlich Ergebnis der Entwicklungsanstrengungen seitens der Automobilhersteller und Behörden in den zurückliegenden 10 – 15 Jahren. In dieser Zeit wurde die Sicherheit im Straßenverkehr vor allem in das Bewusstsein der Öffentlichkeit gerückt. An dieser Stelle wird der Stand der Technik hinsichtlich der Sicherheitsausstattung heutiger Fahrzeuge dargestellt. Unter dem Stand der Technik wird hier die Technik verstanden, die in heutigen Serienfahrzeugen käuflich zu erwerben ist.

##### Gurtsysteme

In fast allen heute erhältlichen Fahrzeugen werden die Frontinsassen mit höhenverstellbaren Dreipunktgurten inklusive Gurtstraffer und Gurtkraftbegrenzer gesichert. Dabei handelt es sich üblicherweise um pyrotechnische Gurtstraffer, die elektrisch gezündet werden. Damit wird gewährleistet, dass die Insassen so früh wie möglich an der Fahrzeugverzögerung teilnehmen, eventuelle Gurtlosen beseitigt und zu hohe Verzögerungen am Insassen vermieden werden. Vereinzelt findet man auch eine Gurtrageerkennung, die im Crashfall die Auslösung des Gurtstraffers und Gurtkraftbegrenzers unterdrückt oder die bei angelegtem Gurt die Auslöseschwelle der Airbags in ihrer ersten Stufe erhöht (BMW). Es lassen sich auch Gurtautomaten

mit einer zweistufigen Gurtkraftbegrenzung in Fahrzeugen finden [SCHICK, 2001; SCHÖNEBURG, 2002].

Für die hinteren Passagiere stehen im Allgemeinen zwei oder auch drei Dreipunktgurte zur Verfügung. Diese sind allerdings nur in seltenen Fällen höhenverstellbar. Vereinzelt werden auch Gurtkraftbegrenzer auf den hinteren Sitzen angeboten.

##### Frontairbagsysteme

Alle heute erhältlichen Fahrzeuge sind mit Fahrer und Beifahrerairbags ausgerüstet. Dabei variieren die Volumina der Airbags. Aufgrund der unterschiedlichen Gesetzeslage in den USA und auf dem europäischen Markt weisen die US-Airbags ein erheblich größeres Volumen auf. Diese so genannten Full-size-Airbags besitzen auf der Fahrerseite ein Volumen von 65 – 80 Liter und auf der Beifahrerseite ein Volumen von 150 – 160 Liter. Dagegen variiert die Größe der Airbags auf dem europäischen Markt (Euro-size-Airbag) herstellerabhängig zwischen 25 – 35 Liter fahrerseitig und 60 Liter beifahrerseitig. Der Entwicklungstrend geht hin zu Airbagvolumina von 45 – 60 Liter auf der Fahrerseite und 80 – 120 Liter auf der Beifahrerseite. Hierbei handelt es sich um Mid-size-Airbags. Zunehmend werden Hybridgasgeneratoren<sup>4</sup> zur Gaserzeugung für die Airbagfüllung verwendet. Weit verbreitet sind auch die azidfreien Feststoffgasgeneratoren<sup>5</sup>. Beiden ist gemein, dass sie die Umwelt so gering wie möglich mit schädlichen Verbrennungsrückständen belasten. In einigen Fahrzeugen kommen bereits zweistufige Airbagsysteme zum Einsatz. Dabei werden die beiden Airbagstufen abhängig von der Unfallschwere gezündet. So werden bei BMW die Airbags in der ersten Stufe mit nur 70 % des Maximaldrucks aufgeblasen.

Das Rückhaltesystem des neuen 7er BMW beinhaltet neben den zweistufigen Frontairbags den weltweit ersten Knieairbag [SCHICK, 2001]. Dieser wird ausschließlich in der US-Version für Fahrer und Beifahrer angeboten. Grund hierfür ist die amerikanische Gesetzgebung, bei der auch der unangegurtete Insasse berücksichtigt werden muss. Der Knieairbag ist ein einstufiger Airbag mit einem Volumen von ca. 16 l.

##### Seitenairbagsysteme

Zumindest auf den vorderen Sitzplätzen gehören Seitenairbags zum Serienumfang in fast allen Fahr-

<sup>4</sup> Hybridgasgenerator – mittels kleiner Treibladung gezündetes und erwärmtes Druckgas zur Füllung des Airbags.

<sup>5</sup> Azidfreier Feststoffgenerator – Generator, dessen Treibmittel aus einer azidfreien (Nitrocellulose) Treibmischung besteht.

zeugen. In höherpreisigen Fahrzeugkategorien werden Airbagsysteme auch für die äußeren Fondinsassen angeboten. Es handelt sich meistens um Systeme, die zum Schutz des Beckens, des Abdominalbereichs und des Thorax-Bereichs ausgelegt werden. Verschiedene Hersteller verfolgen unterschiedliche Strategien bei der Wahl des Einbauortes der Airbagsysteme. So gibt es Systeme, die in der Tür untergebracht werden (BMW), und andere, die in die Sitzlehne integriert sind (Audi, VW, Ford). Die Einbauposition im Sitz gewährleistet in jeder Sitzstellung einen optimalen Schutz durch das Airbagsystem. Zusätzlich zu diesen seitlichen, den Oberkörper schützenden Airbags werden klassenübergreifend Airbagsysteme zum Kopfschutz angeboten. Diese reichen von der Auslegung als Vorhang (Audi, Ford, BMW, Mercedes, VW) bis hin zu in den Sitz integrierten kombinierten Kopf-Thorax-Airbagsystemen. Letztere Lösung wird vor allem in Cabrios oder Fahrzeugen mit klappbarem Stahldach bevorzugt angewandt. Die Airbags zum Schutz des seitlichen Oberkörpers haben ein Volumen von 12 l bis 16 l. Auch bei den Seitenairbagsystemen werden Hybridgasgeneratoren oder azidfreie Feststoffgasgeneratoren verwendet.

#### Sitzbelegungserkennung

Um die Auslösung der Airbagsysteme bei Nichtbelegung eines Sitzplatzes oder bei Vorhandensein eines Kindersitzes zu unterdrücken, werden zunehmend Belegungserkennungen verwendet. In einer Untersuchung konnte festgestellt werden, dass in 42 % der Fälle der Beifahrerplatz nicht belegt war und die Auslösung des Beifahrerairbags eine Erhöhung der Reparaturkosten von durchschnittlich 3.000 DM zur Folge hatte [LANGWIEDER, 1997]. Das zeigt deutlich den Nutzen solcher Systeme zur Sitzbelegungserkennung. Diese Systeme bestehen aus druckempfindlichen Matten, die in die Sitzfläche integriert sind. So ist es möglich, die Besetzung oder Nicht-Besetzung eines Sitzplatzes zu detektieren und die Airbagauslösung gegebenenfalls zu unterdrücken. Üblicherweise wird diese Belegungserkennung auf dem Beifahrerplatz angewandt (Opel, Ford, Mercedes) und unterdrückt die Auslösung von Front- und Seitenairbag. Darüber hinaus wird von Mercedes-Benz ein System zur Gewichtsklassifizierung in die Sitzfläche integriert. Diese ermöglicht in Kombination mit einem zweistufigen Airbag die angepasste Auslösung des Beifahrerairbags in Abhängigkeit vom Beifahrergewicht.

Des Weiteren ist es auch möglich, die Aktivierung des Gurtstraffers und Gurtkraftbegrenzers bei Nichtbelegung zu verhindern. Bei BMW wird auf dem Fahrer- und Beifahrersitz sowie links und rechts in den Fondsitzen eine Sitzbelegungserkennungsmatte integriert [SCHICK, 2001]. Drucksensoren erkennen über eine Auswerteelektronik, ob der Sitz belastet ist oder nicht. Ab einem Gewicht von 12 kg wird der Sitz als belegt erkannt. Die Information der Sitzbelegung wird für folgende Aktuatoren benötigt:

- Airbagauslöseschwellen,
- Auslösung Gurtstrammer,
- Auslösung aktive Kopfstütze,
- Ausfahren der Kopfstützen hinten.

Bei dieser technischen Lösung zur Belegungserkennung des Sitzes ist es auch möglich, einen Kindersitz, der allerdings mit einem Transponder ausgestattet sein muss, zu erkennen und die Airbagauslösung zu verhindern. Diese Kindersitze sind damit meist an Fahrzeughersteller gebunden und nicht flexibel in verschiedenen Fahrzeugtypen einsetzbar.

#### Sitze/Kopfstützen

Den Sitzkonstruktionen kommt im Verbund der Rückhaltesysteme eine entscheidende Rolle zu. Sie müssen den Insassen in Position halten und selbst so stabil sein, dass sie einen Verbund mit den anderen konstruktiven Maßnahmen bilden. Heutige Sitze weisen eine stark verbesserte Stabilität auf. Um ein Untertauchen bzw. Abgleiten des Insassen vom Sitz bei einer Kollision zu verhindern (Submarining-Effekt), werden in vielen Fahrzeugen Sitze mit einer Submarining-Rampe in der Sitzfläche verbaut. Diese verhindert das Abgleiten des Insassen vom Sitz und die damit deutlich schlechtere Rückhaltewirkung durch Gurt und Airbag. Mittlerweile sind auch im Fond auf allen drei Sitzplätzen Kopfstützen erhältlich. Für die vorderen Sitzplätze werden von verschiedenen Herstellern aktive Kopfstützen angeboten (Opel, Saab, Ford, BMW). Hierbei handelt es sich um rein mechanische Systeme, die über einen Hebelmechanismus bei einer Rückbewegung des Insassen die Kopfstütze nach vorn bewegen. So wird im Crashfall der Abstand zwischen Kopfstütze und Kopf verkleinert. Damit wird die Gefahr von Halswirbelerkrankungen vor allem bei Heckkollisionen verringert.

BMW bietet eine aktive Kopfstütze an, bei der ein Gasvolumenstrom aus einem Kleinstgasgenerator über einen mechanischen Verstellmechanismus in einer Kulissenführung die Halteplatte der Kopfstütze nach vorn drückt [SCHICK, 2001].

Pedalarie/Lenksäule

Als Reaktion auf die Ergebnisse der Unfallforschung wird mittlerweile auch den unteren Extremitäten mehr Beachtung geschenkt. Um schwere Verletzungen der Unterschenkel und Füße zu verhindern, wird von einigen Fahrzeugherstellern die Pedalarie wegtauchend oder ausklinkend ausgeführt (z. B. Ford, Opel). Dabei wird die Pedalarie von Intrusionen der Spritzwand entkoppelt.

Fast alle Hersteller setzen heutzutage außerdem Sicherheitslenksäulen ein, die unter anderem auch Deformationselemente besitzen. Diese Lenksäulen sind in der Lage, zusätzlich Energie zu absorbieren, und entkoppeln über Gelenke etc. die Lenkradbewegung von möglichen Spritzwanddeformationen. Somit wird die Lenksäule besser in Position gehalten, um den Schutz durch den Airbag zu maximieren.

Kinderrückhaltesysteme

In fast allen Fahrzeugen deutscher Hersteller werden Befestigungsmöglichkeiten für Kindersitze nach dem ISOFIX-Standard angeboten (z. B. VW, Opel, Ford, Audi, Mercedes). Dieser ISOFIX-Standard ermöglicht den Kindersitzen eine optimale Einleitung von Kräften in entsprechende Regionen der Sitzbank. Des Weiteren können bei diesen Systemen Fehlbedienungen durch den einfachen und eindeutigen Einbau minimiert werden. Die Befestigungspunkte für die Kindersitze befinden sich je nach Hersteller und Fahrzeugtyp auf dem Beifahrerplatz und/oder den äußeren hinteren Sitzplätzen. Einige Fahrzeughersteller bieten darüber hinaus oder auch ausschließlich sitzintegrierte Kindersitze an. Da Kindersitze an das jeweilige Alter des Kindes angepasst werden müssen, besteht bei den sitzintegrierten Lösungen das Problem, dass diese Sitze nur für einen Altersbereich optimal ausgelegt werden können oder aber nur einen Kompromiss aus den verschiedenen Altersvarianten der Sitze bieten.

[CLAAR, 2000], [NÜCHTER, 2000], [DIETRICH, 2000], [BOCKELMANN, 2000], [HACKENBERG,

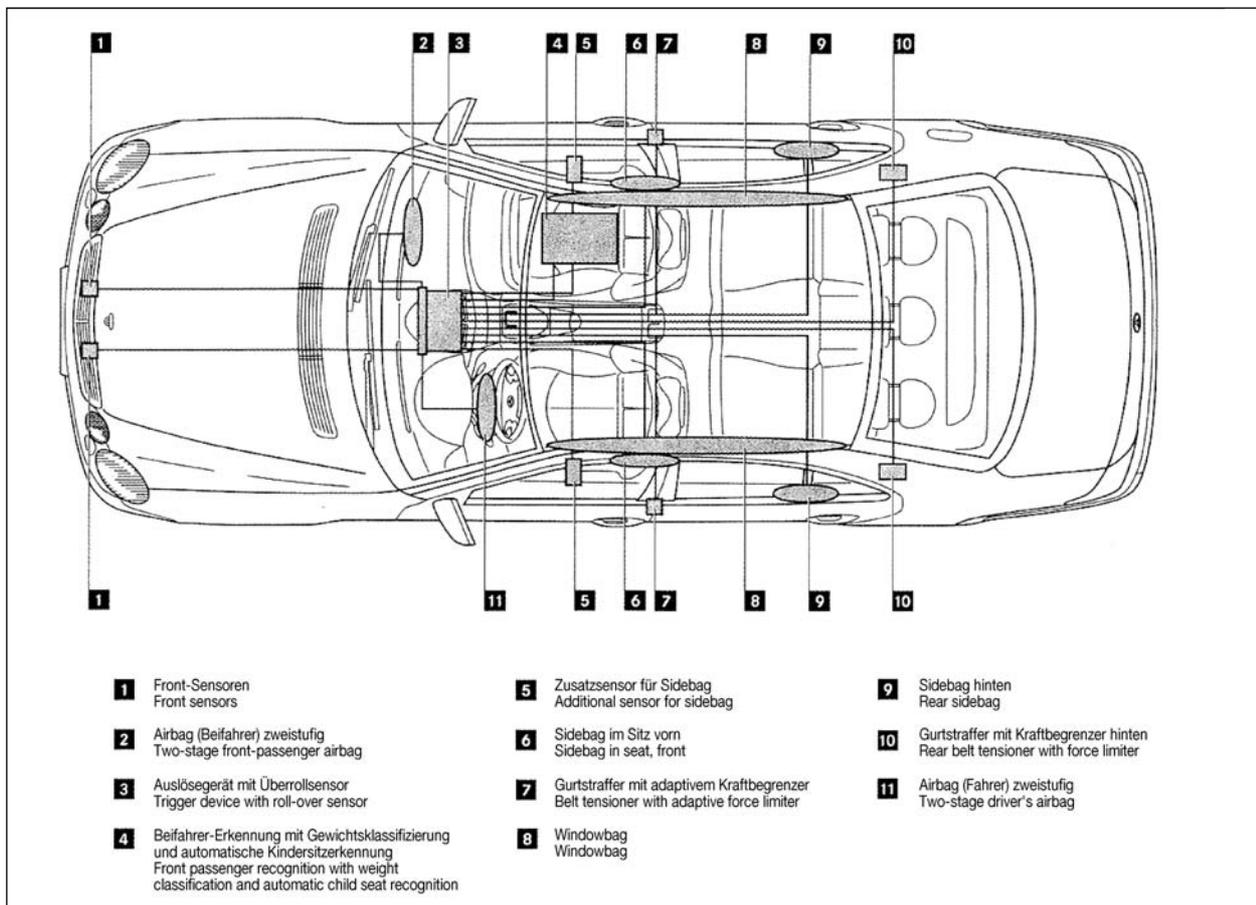


Bild 3.1: Intelligente Sensorik und Rückhaltesysteme bei der Mercedes E-Klasse [SCHÖNEBURG, 2002]

1997], [JUNG, 1997], [MULTHAUPT, 2001], [ORIZARIS, 1998], [FAUSEL, 1997], [SWEDA, 2000], [PETRI, 1997], [GIEBLER, 1999], [THEINERT, 2000], [PÜTTER, 1998],[SCHÖNEBURG, 2002].

Bild 3.1 fasst den Stand der Technik auf dem Gebiet der Rückhaltesysteme am Beispiel der aktuellen E-Klasse von Mercedes zusammen.

### 3.1.1 Systematisierung der Funktionsweise von RHS

Ziele des Insassenschutzes sind:

- Sicherstellung des Überlebensraums, um die Insassenbelastungen möglichst gering zu halten.
- Vermeidung des Anpralls des Insassen an harte Teile, das bedeutet auch Vermeidung von Intrusionen.
- Verzögerung des Insassen auf einem noch erträglichen, Verletzungen vermeidenden Kraftniveau.
- Das Herausschleudern von Insassen aus dem Fahrzeug zu verhindern.
- Sicherstellung der Zugänglichkeit für die Rettung.

Um diese Ziele zu erreichen, sind entsprechende Deformationszonen sowie eine steife Fahrgastzelle notwendig. Mit diesen Maßnahmen kann ein möglichst langer Verzögerungsweg für den Insassen zur Verfügung gestellt werden. Aufprallfeste Türen und Schlösser sollen vor allem das Eindringen der Fahrzeugstruktur beim Seitenaufprall möglichst gering halten. Ein Lenksystem, das nicht in den Innenraum eindringt und beim Aufprall definiert nachgeben kann, ist zur Erhaltung des Insassenverlagerungsweges nötig. Eine Polsterung des Innenraumes soll einen Anprall an harte Strukturteile verhindern. Ein Gurtsystem mit Vorspannung und Kraftbegrenzung garantiert ein frühes Ansprechen des RHS und somit einen maximalen Verzö-

gerungsweg. Die Verwendung des 3-Punkt-Gurtes bietet dabei die Möglichkeit, den Insassen an hochbelastbaren Körperregionen (Becken, Brust) abzufangen. Airbags dagegen haben die Aufgabe, den Insassen großflächig abzufangen. Wichtig ist ebenfalls, ungünstige Bewegungsabläufe des Insassen, wie sie beim Heckaufprall zum HWS-Syndrom führen, durch geeignete Sitze und Köpfstützen zu vermeiden [APPEL, 1998].

### Sensorik

Die gesamte Sicherheitselektronik besteht aus den folgenden Komponenten:

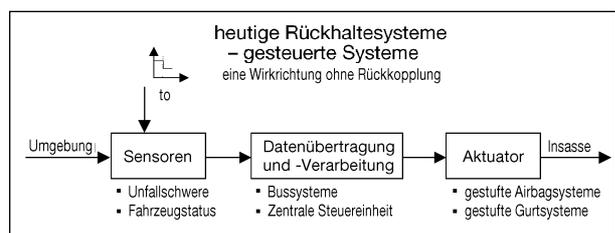
- Sensoren (Beschleunigungssensoren),
- Signalverstärkung und -verarbeitung,
- Zündstufen,
- Energiereserve und Spannungswandler.

Die Entwicklung der Sensorik für die Auslösung der Rückhaltesysteme im Fahrzeug lässt sich bis heute in drei Schritte einteilen:

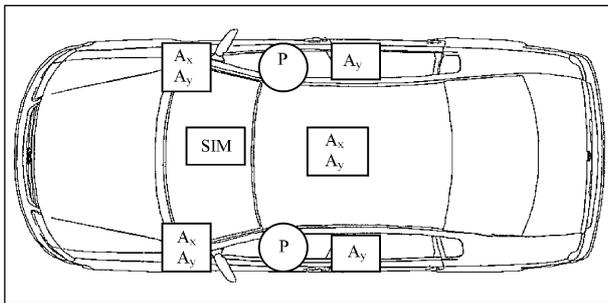
In der ersten Generation waren meistens zwei, teilweise auch mehr, Sensoren vorhanden, die aufgrund einer Beschleunigungsmessung an der Karosserie zwischen Auslösen und Nichtauslösen des RHS entschieden. Dem Steuergerät (ECU) kam nur die Aufgabe der Systemdiagnose und der Energieversorgung der Airbagzündung zu.

Die zweite Generation wird als single-point-sensing-systems bezeichnet. In Systemen dieser Generation messen die Sensoren nur die Verzögerung, die Auswertung und Entscheidung wurden in das Steuergerät verlagert. Die Verwendung zusätzlicher Sensoren und Aktuatoren erhöhte die Flexibilität und Effektivität des RHS.

Im nächsten Entwicklungsschritt, der heute üblichen dritten Generation, wurden die Steuergeräte modularisiert, um eine Zerlegung in Subsysteme zu ermöglichen. Die Zerlegung in einzelne Systeme hat neben der Kostenersparnis verschiedene weitere Vorteile. So werden durch zusätzliche Sensoren komplexere Entscheidungen möglich, die z. B. das Problem der Fehlauflösungen von Airbags besser kontrollierbar machen. Außerdem kann durch die Standardisierung die Wiederverwendbarkeit einzelner Teile gewährleistet werden. Dies hat kürzere Entwicklungszeiten zur Folge, da unter Umständen nur bestimmte Module weiterentwickelt werden müssen, während andere Teile un-



**Bild 3.2:** Systematisierung der Funktionsweise heutiger Rückhaltesysteme



**Bild 3.3:** Erfassungsstruktur durch Sensorik im BMW 7er [SCHICK, 2001]

verändert weiterverwendet werden können. Weitere Vorteile sind die Herstellung in größeren Stückzahlen, größere Gestaltungsfreiheit beim Design sowie die Reduzierung der Komplexität der Steuereinheiten und der Anschlüsse.

Ziel ist hier die Entwicklung eines universellen Auswertalgorithmus, welcher durch Parametervariation an die entsprechende Fahrzeugplattform angepasst wird. Die Software arbeitet mit Hochsprachen zur Signalverarbeitung [VOGT, 1996].

Bei BMW werden für die Sensierung von Unfällen zwei verschiedene Sensortypen verwandt. Es kommen Beschleunigungssensoren in der A- und B-Säule und auf dem Mittelunnel sowie jeweils ein Drucksensor in der Fahrer- und Beifahrertür zum Einsatz. Bild 3.3 verdeutlicht dies [SCHICK, 2001]. Damit stellt dieses Fahrzeugmodell hinsichtlich der Sensorik und Datenübertragung ein Novum in der heutigen Fahrzeugtechnik dar.

Erstmals wird in einem Kraftfahrzeug auch ein Überschlagssensor verbaut, der als elektronischer Winkelratensensor ausgeführt ist [SCHÖNEBURG, 2002]. Dieser unterscheidet sich grundlegend von den Sensoren, die in heutigen Cabrios zum Einsatz kommen und hier die Schutzbügel aktivieren. Die dafür noch üblichen Sensoren funktionieren nach dem Prinzip der Wasserwaage. Der elektronische Winkelratensensor ist in das zentrale Steuergerät integriert. Nach der Sensierung eines Überschlags werden die Gurtstraffer und Windowbags gezündet. Diese Maßnahmen halten den Insassen im Sitz und verhindern weitgehend das Eindringen von Gegenständen in das Fahrzeug.

#### Sensorprinzipien

Drei prinzipielle Aufbauten von Beschleunigungssensoren wurden und werden für die Sensierung der Fahrzeugverzögerung verwendet:

#### Mechanischer Sensor

Er arbeitet nach dem Feder-Masse-Prinzip, wobei eine Kugel direkt auf einen Schlagbolzen drückt und den Zünder aktiviert. Diese erste Form der Sensierung ist sehr billig, einfach im Aufbau, ist allerdings nicht diagnosefähig und es bedurfte eines Sensors pro Airbag.

#### Elektromechanischer Sensor

Dieser Sensor arbeitet auch nach dem Feder-Masse-Prinzip. Eine träge Masse überwindet eine zuvor festgelegte Federkraft oder auch den Gegenstand eines eingeschlossenen Gasvolumens und schließt damit einen elektrischen Kontakt, dessen Signal an das Steuergerät gesendet wird. Dieses System hat den Vorteil der Diagnosefähigkeit.

#### Elektronischer Sensor

Hier baut ein piezoelektrischer Biegebalken bei Krafteinwirkung durch eine Beschleunigung ein Potenzial auf und sendet dann ein Signal an das Steuergerät. Zu den Vorzügen dieses Prinzips zählen die Schnelligkeit der Sensierung, die Kompaktheit und der günstige Preis.

Hierbei werden die Signale der Sensoren verstärkt, gefiltert, digitalisiert und dann mit den festgelegten Auslöseschwellen verglichen. Bei neuen Systemen wird der Beschleunigungsverlauf registriert und über einen Algorithmus integriert, um dann mit gespeicherten Verläufen verglichen zu werden. Dies ermöglicht, Unfallart und -schwere zu diagnostizieren, sodass dann vom Steuergerät geeignete Maßnahmen ergriffen werden können. Danach aktiviert das Steuergerät die Zündkreise.

#### Datenübertragung

Der zunehmende Einsatz elektronischer Systeme im Kraftfahrzeug und der damit stark steigende Datenverkehr erfordert leistungsfähige Übertragungstechniken. Auch die Sicherheitstechnik bedarf anderer Übertragungstechniken als der herkömmlichen elektrischen Verbindung. Hier werden schon seit längerem Bussysteme eingesetzt. In der Automobilindustrie haben sich Bussysteme erst vor relativ kurzer Zeit durchgesetzt. Vor allem die Verbreitung von CAN trug dazu bei. Für die Anwendung in der Fahrzeugsicherheit ist die Echtzeitfähigkeit eine zwingende Voraussetzung.

So setzt BMW für die Ansteuerung von Airbags und Sicherheitsgurten den Datenbusstandard „Byteflight“ ein [GORONZY, 2002]. Die sich abzeichnende Einführung von „X-by-Wire“-Systemen wird die Bedeutung der Systemintegration weiter erhöhen und zusätzlich neue Anforderungen an die Fehlertoleranz der Systeme stellen.

In heutigen Fahrzeugen finden sich verschiedene Datenbussysteme, die entsprechend ihrer Eigenschaften für spezielle Anwendungen im Fahrzeug geeignet sind.

Datenbusstandards:

- Byteflight: Datenbusstandard mit Kunststofffaserkabel als optisches Übertragungsmedium; Single-Master-Prinzip.
- CAN: Controller Area Network; Datenübertragung per Kupferleitung; flexibel durch asynchrone Datenübertragung; ereignisgesteuert; Anwendung im Bereich Antriebs- und Fahrwerksmanagement mit 500 kbit/s; Anwendung im Bereich Karosserie- und Komfortfunktionen mit 1 Mbit/s.
- TTP: Time-Triggered Protocol; integriertes Kommunikationsprotokoll für fehlertolerante Systeme unter Echtzeit-Bedingungen; zeitgesteuerte Architektur; 2 Mbit/s.
- MOST: Media Oriented Systems Transport; Datenbusstandard; Datenbusstandard mit optischem Übertragungsmedium; Anwendung im Bereich Informations-, Kommunikations- und Audiosysteme mit 22,5 Mbit/s; überträgt digitale Bild- und Tonsignale.
- LIN: Local Interconnect Network; Datenbusstandard mit Kupferleitung; leistungsschwächeres und kostengünstigeres Subsystem als Ergänzung zu CAN.

Zeit- und Ereignissteuerung sind fundamental unterschiedliche Prinzipien für die Konstruktion von Echtzeit-Systemen, wie sie in der Fahrzeug-Sicherheitstechnik Anwendung finden. In einer ereignisgesteuerten Architektur wie CAN werden alle Aktivitäten durch Ereignisse, wie signifikante Zustandsänderungen, ausgelöst. In zeitgesteuerten Architekturen wie TTP hingegen löst das Erreichen eines bestimmten Punktes im Zeitablauf die Aktivitäten aus [POLEDNA, 1999].

Das von BMW eingesetzte Byteflight-Bussystem zeichnet sich durch eine hohe Übertragungsrate

von bis zu 10 Mbit/s aus. Dabei werden die Signale als Lichtimpulse durch Kunststoffleiter übertragen. Gerade wegen der hohen Übertragungsraten und der Echtzeitfähigkeit wird dieser Standard bei BMW für die Ansteuerung der Sicherheitstechnik verwendet. Außerdem vereint Byteflight die Vorteile des TTP- und des CAN-Busses. Das bedeutet, dass dieses System wichtigen Nachrichten eine fest synchronisierte Sendezeit garantiert und die restliche Bandbreite für asynchrone Datentelegramme nutzt. Das System ist so flexibel, dass es situationsabhängig entweder nur synchron oder asynchron überträgt. Somit können Informationen von noch mehr Sensoren ausgewertet werden. Es können so zum Beispiel Daten zu Querschleunigung, Geschwindigkeitsänderung, Gierraten oder Lenkwinkel mit in die Auslösestrategie des Airbags einbezogen werden.

Da in heutigen Fahrzeugen verschiedene Busstandards für die einzelnen Fahrzeugfunktionen angewandt werden, besitzt das Byteflight-System ein Gateway, das eine Kommunikation mit den anderen Datenbusnetzen ermöglicht. Byteflight ist als Sternnetz ausgelegt. So wird sichergestellt, dass es bei Ausfall von Teilkomponenten noch funktionstüchtig bleibt. Die Nachrichten der einzelnen Netzteilnehmer werden über einen Sternkoppler koordiniert. Der Rechner und die Netzteilnehmer arbeiten elektronisch, obwohl die Datenübertragung per Lichtwellenleiter erfolgt. Ein Transceiver wandelt die Lichtimpulse in elektronische Signale und umgekehrt.

Zukünftige Entwicklungen müssen noch höhere Datenmengen noch sicherer übertragen können. So wird an einem System namens „FlexRay“ gearbeitet. Dieses System soll zukünftige „X-by-Wire“-Systeme, Motor-, Fahrwerks- und Sicherheitsfunktionen miteinander vernetzen. Dazu werden die Daten optisch oder elektronisch übertragen.

Ein weiterer zukünftiger Datenbusstandard wird der TT-CAN-Bus sein. Er ist eine Kombination aus TTP und CAN und soll die Betriebssicherheit und Flexibilität des CAN-Systems mit der Zeitsteuerung des TTP-Datenbusses verbinden.

Von den Automobilherstellern wird angestrebt, ab etwa 2010 nur noch etwa zwei bis drei Datenbussysteme einzusetzen, die dann über Gateways miteinander kommunizieren. Am Beispiel der neuen Mercedes C-Klasse wird dies deutlich. Hier kommunizieren drei Bussysteme über Gateways miteinander. Hierbei steuern die einzelnen Bussysteme

me verschiedene Funktionen im Fahrzeug. Für die Datenübertragung der Funktionen des Innenraums ist ein CAN-Bus verantwortlich. Für den Antrieb und das Fahrwerk wird ein weiterer CAN-Bus eingesetzt. In diesem sind auch die Steuergeräte für die Airbags und das Notrufsystem Teleaid integriert. Für die Audio-, Kommunikation- und Navigationsfunktion wird ein D2B-Bus zur Datenübertragung eingesetzt. Dieser „Domestic Digital Bus“ ist ein optischer Datenbusstandard, bei dem Lichtimpulse über Lichtwellenleiter aus Kunststoff übertragen werden. Dies ermöglicht eine Übertragungsrates von bis zu 5,6 Mbit/s [CLAAR, 2000].

#### Aktuatoren

Heutige Gasgeneratoren für Airbagsysteme, sofern es sich um Feststoffgeneratoren handelt, arbeiten nach [EBELING 1996] auf  $\text{NaN}_3$ - (Natriumazid) oder NC- (Nitrocellulose) Basis. Der Gasgeneratorsatz besteht aus Brennstoff, Oxidator, Katalysator und einem Additiv zur Reaktionslenkung.

Dabei gibt es jedoch systemspezifische Probleme, die bei der Entwicklung neuer Gasgeneratoren beachtet werden müssen:

Probleme des Gasgenerators auf  $\text{NaN}_3$ -Basis (azidhaltig):

- Toxizität,
- Gefahrenpotenzial bei der Herstellung und dem Betrieb,
- Gefahr der Bildung von Schwermetallaziden (Initialsprengstoff),
- Bildung von  $\text{NH}_3$  in Verbindung mit Säuren.

Probleme des Gasgenerators auf NC-Basis (azidfrei):

- mangelnde thermische und chemische Langzeitstabilität,
- hohe Schadgasanteile, vor allem  $\text{CO}$ .

Ein Problem für beide Generatorkonzepte besteht in dem nicht vorhandenen Recyclingkonzept.

Für die Entwicklung neuer Gasgeneratoren ist besonders auf eine angepasste Verbrennungstemperatur zu achten sowie darauf, dass der Schadstoffausstoß unterhalb zulässiger Grenzwerte liegt. Ein angepasstes Anzünd- und Verbrennungsverhalten, ausreichende Sicherheitseigenschaften, Ungiftigkeit und ausreichende chemische und thermische

Stabilität sind auch für künftige Generatoren zu beachtende Eigenschaften. Großtechnische Verarbeitbarkeit, niedrige Kosten, die Verfügbarkeit der Ausgangsmaterialien und die Recyclingfähigkeit sind ebenfalls für die Einführung neuer Systeme in die Serie erforderlich.

In Hybridgeneratoren wird die Treibladung zum Aktivieren und Erhitzen des Druckgases benötigt. Hier stellen sich ähnliche Forderungen, die vor allem wegen der kleineren pyrotechnischen Ladung leichter zu erfüllen sind. Ein Erhitzen des Druckgases ist nötig, da sich das Gas beim Ausströmen aus der Druckgasflasche stark abkühlt und somit nicht genügend Volumen zur Befüllung des Airbags zur Verfügung stellt.

Bei der Suche nach neuen Brennstoffkonzepten konzentriert sich die Suche auf stickstofffreie organische Verbindungen.

### 3.1.2 Das Gurtsystem

#### Wirkprinzip

Der Sicherheitsgurt dient dazu, den Insassen möglichst früh an der Fahrzeugverzögerung teilnehmen zu lassen und die Kräfte in belastbare Bereiche des Körpers (Becken, Brustkorb) einzuleiten. Dies ist zur optimalen Ausnutzung des Vorverlagerungsweges und somit zum sanften Abfangen des Insassen notwendig. Des Weiteren ist es möglich, das auf den Insassen wirkende Kraftniveau gering zu halten. Zur Optimierung des Gurtsystems werden heute Gurtstraffer verwendet, welche die Aufgabe haben, die Gurtlose zu reduzieren. Das führt zu einer noch früheren Teilnahme des Insassen an der Fahrzeugverzögerung. Zur Begrenzung des auf den Insassen wirkenden Kraftniveaus werden zusätzlich Gurtkraftbegrenzer verwendet, die bei Erreichen einer definierten Kraft Gurtband freigeben. Diese Gurtkraftbegrenzer werden bereits zweistufig angeboten. Um einen Kopfanprall am Lenkrad zu verhindern, ist selbst bei geringer Unfallschwere schon ein Airbag erforderlich.

Ohne Airbag sinkt zwar das Verletzungsrisiko nach [GROSSER, 1997] schon sehr stark, trotzdem können Kopf- und Gesichtsverletzungen durch den Lenkradkontakt auftreten sowie das HWS-Syndrom durch zu starke Kopffrotation nach vorn. Durch den Gurt können Rippenbrüche und Brustbeinverletzungen entstehen, welche durch einen Airbag insbesondere in Kombination mit Gurtstraffer und Gurtkraftbegrenzer das Verletzungsrisiko

für die oben genannten Bereiche erheblich reduziert.

### 3.1.2.1 Wirkungsweise

Ziel des Gurtsystems ist es, den Insassen so früh wie möglich an der Fahrzeugverzögerung teilnehmen zu lassen, um einen Strukturkontakt zu verhindern oder wenigstens die Anprallgeschwindigkeit zu reduzieren.

#### Sensoren

Als Sensoren finden mechanische Bauteile Anwendung, bei denen die Trägheit der Sensormasse überwunden werden muss. Zunehmend werden jedoch die Beschleunigungssensoren des Airbagsystems zur Auslösung mitbenutzt, die heute elektronisch arbeiten.

#### Aktuatoren

Heute werden üblicherweise 3-Punkt-Automatikgurte verwendet. Das Gurtband ist auf der Spule des Retraktors aufgewickelt, welcher die Aufgabe hat, dem Insassen im normalen Fahrbetrieb größtmögliche Bewegungsfreiheit zu gewährleisten. Bei einem Unfall muss die Gurtspule jedoch gesperrt werden. Unter Belastung wird zusätzliches Gurtband frei, da sich der aufgespulte Teil des Gurtes enger an die Spule legt. Dieser Effekt wird als Filmspuleneffekt bezeichnet und durch über der Spule angebrachte Gurtklemmer verhindert.

Um die Gurtlose zu beseitigen, wird ein Gurtstraffer benötigt, da außer dem Filmspuleneffekt noch die Nachgiebigkeit der Insassenkleidung und das systembedingte Spiel neutralisiert werden müssen. Unterteilt werden Gurtstraffer nach ihrem Einbauport, der Speicherung der Straffenergie und der Sensorik und Auslösung.

Als Einbauorte für den Gurtstraffer bieten sich der Retraktor und das Gurtschloss an. Der Gurtstraffer am Gurtschloss kann gleichzeitig Brust- und Beckengurt ohne zusätzliche Umlenkung spannen, allerdings ist eine höhere Kraft erforderlich. Bei der Gurtstraffung am Retraktor kann kein Gurtklemmer verwendet werden und es muss ein größerer Straffweg zurückgelegt werden.

Zur Speicherung der Straffenergie werden entweder eine vorgespannte Feder oder in zunehmendem Maß pyrotechnische Treibladungen verwendet.

Zur Reduzierung der Belastungsspitzen werden Gurtkraftbegrenzer benutzt, die bei einer definierten Gurtkraft Gurtband freigeben, damit sich die auf den Insassen wirkenden Kräfte nicht weiter erhöhen.

Das Gurtband selbst besteht aus unelastisch dehnbaren Kunstfasern und muss eine Breite von mindestens 47 mm aufweisen (ECE R16). Die Auslegung der Gurtbanddehnung erfolgt bei der Abstimmung der RHS. Typische Werte liegen zwischen 6 und 20 % [NITSCHKE, 2002].

### 3.1.3 Das Frontairbagsystem

#### Wirkprinzip

Aus den Daten der BMW-Unfallforschung lässt sich eine erhebliche Reduzierung der Verletzungen durch die Insassenschutzsysteme Gurt und Airbag zeigen [MESSNER, 1997]. Der Airbag ist durch das großflächige Auftreffen des Insassen in der Lage, diesen dann schonend an das Niveau der Fahrzeuggeschwindigkeit anzupassen.

Bis zu einer Unfallschwere von  $EES^6 = 20$  km/h bleiben 80 % der angegurteten Insassen im Fahrzeug ohne Airbag unverletzt.

Durch hohe Kräfte im Gurt treten jedoch Thoraxverletzungen auf, zudem kann der Kopf auf das Lenkrad oder die Armaturentafel aufschlagen. Ab einer Unfallschwere von  $EES \geq 40$  km/h treten auch hier tödliche Verletzungen auf. Ist zum Gurt zusätzlich ein Airbag installiert, können bei Frontalkollisionen bis  $EES = 60$  km/h tödliche Verletzungen vermieden werden. Eine Reduzierung der gurtinduzierten Verletzungen ist dann ebenfalls festzustellen.

Im unteren EES-Bereich ( $\leq 20$  km/h) treten bei Airbagauslösung Verletzungen an Körperstellen auf, die sich im Entfaltungsbereich des Airbags befinden. Es bleiben bei diesen leichten Kollisionen nur 20 % der Insassen unverletzt.

Das Problem der airbaginduzierten Verletzungen ist bereits in Kapitel 2.2.1 behandelt. Die möglichen Gefährdungen durch den Airbag können in systembedingte Gefährdung durch den Airbag und häufig

<sup>6</sup> EES – Equivalent Energy Speed beschreibt die Aufprallgeschwindigkeit auf ein beliebiges festes Hindernis, bei der die gleiche Verformungsarbeit wie beim realen Unfall umgesetzt wird [APPEL, 1994].

ger auftretende nutzerbedingte Fehler unterschieden werden [LENZ, 1997].

Systembedingte Gefährdung:

- „aggressiver“ Airbag mit großem Volumen,
- „front-mounted“ Airbag, der sich direkt zum Insassen hin aufbläht statt von oben oder unten,
- zu späte Auslösung.

Nutzerbedingte Fehler:

- Fahren ohne angelegten Sicherheitsgurt,
- Sitz zu weit vorn und damit zu dicht am Lenkrad und der Armaturentafel,
- voorgelehnte „Schlafhaltung“ oder eine andere von den Entwurfsbedingungen abweichende Haltung des Beifahrers (out of position),
- ungesichertes Sitzen von Kindern vorn auf dem Beifahrersitz,
- rückwärtsgerichtete Kindersitze vorn auf dem Beifahrersitz.

Das Airbagsystem kann sein volles Potenzial nur in einem abgestimmten System zusammen mit dem Gurt ausschöpfen. Theoretisch stehen zwei Sicherungssysteme zur Insassenrückhaltung zur Verfügung. Hierbei handelt es sich um den Airbag und die Kombination aus Airbag und Sicherheitsgurt. Für Europa ist das System Airbag ohne Gurt nicht interessant, da die Gurtbenutzung gesetzlich vorgeschrieben ist und damit vorausgesetzt werden kann.

Der optimale Schutz erfordert aber nicht zwangsläufig die Auslösung aller Sicherheitssysteme. Bis zu einer Unfallschwere von  $\Delta v^7 \leq 20 \text{ km/h}$  ist der Sicherheitsgurt völlig ausreichend. Die auftretenden Gurtkräfte stellen in diesem Bereich keine Gefahr für den Insassen dar. Die Aktivierung des Airbags in diesem Bereich kann dagegen zu Verletzungen führen. Ebenso sprechen erhebliche Reparaturkosten gegen eine Aktivierung des Airbags. Zum anderen wäre der Airbag bei einer möglichen Sekundärkollision schon verbraucht und hätte keine Schutzwirkung mehr.

Ab  $\Delta v = 50\text{--}60 \text{ km/h}$  hat der Gurt keine ausreichende Schutzwirkung mehr für den Insassen. Die

Vorverlagerung wird so groß, dass ein Anprall des Kopfes gegen Lenkrad oder Fahrzeugstruktur nicht mehr verhindert werden kann. Die Belastungen durch den Gurt erreichen ein kritisches Niveau. Ein Airbag wird unbedingt notwendig. Der  $\Delta v$ -Grenzwert ist abhängig von der Fahrzeuggröße und der Fahrzeugkonstruktion sowie dem Alter und der Größe des Insassen.

Die zusätzliche Aktivierung des Airbags ab einem  $\Delta v > 20 \text{ km/h}$  erhöht den Schutz von Kopf und Halswirbelsäule, da der Vorverlagerungsweg begrenzt und der Kopf vom Airbag großflächig abgefangen wird. Eine entsprechende Abstimmung der Systeme kann die Belastungen durch den Gurt reduzieren, da der Oberkörper in den Airbag eintaucht. Bei größerer Unfallschwere ist eine Abstimmung beider Systeme notwendig, mit der die sich überlagernden Kräfte von Gurt und Airbag unterhalb des kritischen Bereiches gehalten werden. Hierzu ist der Einsatz von Gurtkraftbegrenzern notwendig [LÖHLE, 1996].

Die komplexe Abstimmung der Systeme hin zu einem bestmöglichen Insassenschutz bedarf der rechnerischen Simulation. Dieser Bedarf an rechnerischen Simulationstools wird sich noch erheblich verstärken.

### 3.1.3.1 Wirkungsweise

Sensoren

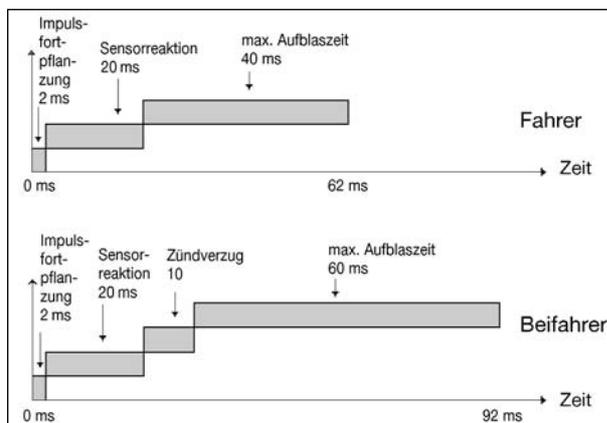
Sensoren haben die Aufgabe den Unfall und die Unfallschwere zu erkennen. Hierzu ist ein geeignetes Maß zu finden, das von den Sensoren ermittelt werden kann. Als geeigneter Parameter gilt hier die Verzögerung der Fahrgastzelle bzw. des Fahrzeugs.

Als Sensoren werden Beschleunigungsaufnehmer verwendet, die in der Lage sein müssen, den Unfall und dessen Schwere schnell und präzise zu erkennen. Weitere erforderliche Eigenschaften sind:

- selbsttätige Systemkontrolle und Diagnose,
- Gewährleistung der Funktion bei Ausfall des Bordnetzes,
- Funktionsnachweis für die Produkthaftung.

In der ersten Generation wurden Sensor-Auslöseinheiten zentral im Fahrgastraum auf dem Mittel-tunnel untergebracht. Dabei wurden analoge Beschleunigungsaufnehmer verwendet, deren Signal im Steuergerät mit einer festgelegten Auslöse-

<sup>7</sup>  $\Delta v$  – Geschwindigkeitsänderung eines Fahrzeugs als Maß für die Insassenbelastung [APPEL, 1994].



**Bild 3.4:** Zeitlicher Ablauf der Airbag-Auslösung für Fahrer und Beifahrer [KRAMER, 1998]

schwelle verglichen und daraus die Auslöseschwellenentscheidung gefällt wurde.

In der zweiten Generation werden piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer verwendet, deren Signale digitalisiert und dann verarbeitet werden. Hier wird das Signal nicht mehr mit einer festen Auslöseschwelle sondern mit einer Kennlinie verglichen. Die Auslöseschwelle ist somit nicht mehr an feste Werte gebunden, die Parameter werden kontinuierlich berechnet, wodurch nicht nur der Aufprall als solcher, sondern auch seine Schwere erkannt wird.

Neuere Anwendungen verwenden zusätzliche Parameter zur situationsangepassten Auslösung, wobei die erfasste Unfallschwere zu unterschiedlich schnellen oder starken Reaktionen führt.

In Bild 3.4 wird beispielhaft der zeitliche Ablauf der Airbag-Auslösung für den Fahrer und den Beifahrer dargestellt. Nach etwa 120 ms ist die Relativgeschwindigkeit der Fahrzeuginsassen zur Karosserie abgebaut, und die Luftsäcke fallen in sich zusammen.

#### Aktuatoren

Grundsätzlich werden Generatoren nach ihrer Bauform in Scheiben oder Rohrform je nach Einbauort und nach ihrer Gaserzeugung in Feststoff- und Hybridgasgeneratoren unterschieden.

Der Feststoffgenerator besteht aus einer Anzündeinheit, welche die Aufgabe hat, im Bedarfsfall das in der Brennkammer des Generators vorhandene Treibmittel zu zünden. Das Treibmittel, welches in Tablettenform, so genannten Pellets, im Generator enthalten ist, besteht entweder aus einer azidhaltigen ( $\text{NaN}_3$ ) oder azidfreien (Nitrocellulose) Reaktionsmischung. Diese erzeugt bei der Verbrennung

das Gas, das über einen Filter in den Luftsack geleitet wird. Der Filter hat die Aufgabe, feste Verbrennungsrückstände wie Schlacke zurückzuhalten, damit diese nicht den Airbag beschädigen können. Eine Kühlung des sehr heißen Gases erfolgt durch den Filter ebenfalls.

Im Hybridgasgenerator werden eine kleine Treibladung und Druckgas zur Airbagfüllung verwendet. Die Treibladung hat im Hybridgasgenerator die Aufgabe, die Gasflasche zu öffnen und das ausströmende Gas anzuwärmen. Dieses Anwärmen ist nötig, da sich das unter Druck stehende Gas beim Austritt so stark abkühlt, dass das entstehende Volumen nicht zur Airbagfüllung ausreichen würde.

Zu den Vorteilen des Hybridgasgenerators zählt unter anderem die geringe Hitzeentwicklung, die das Verwenden thermischer Abschirmungen überflüssig macht. Es wird außerdem weniger Festtreibstoff verwendet, was geringere Umweltbelastungen zur Folge hat. Die Möglichkeit, dünnere Luftsackgewebe zu verwenden, sowie eine einfachere Konstruktion der Generatoren führen zu einer Gewichtsreduzierung trotz Druckflasche.

Für den Luftsack werden Kunstfaser-Gewebe verwendet, die je nach Treibladung des Generators beschichtet (Silikon) werden oder auch nicht.

Seit Beginn der Entwicklung hat sich die flächenbezogene Masse der Gewebe halbiert, was zu einer Reduktion des Gesamtgewichtes wie auch des Packvolumens führt. Das wiederum ermöglicht optimale Einbaulagen unter noch schärferen Package-Anforderungen.

Um die Entfaltung des Luftsacks zu steuern, werden Fangbänder oder Reißnähte vorgesehen. Die Dämpfungseigenschaften werden durch die wieder abströmende Gasmenge reguliert. Hierzu werden Ablassöffnungen vorgesehen oder das Airbaggewebe entsprechend gasdurchlässig ausgelegt. Grundsätzlich unterscheidet man bei der Luftsackfaltung die Raff-Faltung und die Leporello-Faltung. Sie unterscheiden sich grundsätzlich in der Lage der Faltungen zum Generator.

Die Abdeckung des Airbagmoduls muss in erster Linie ein definiertes Aufreißverhalten und ein geringes Gewicht haben, um dem Airbag die Entfaltung zu ermöglichen. Es wurden beträchtliche Fortschritte bei der Unterbringung der Airbags im Lenkrad bzw. in der Armaturentafel erreicht, sodass inzwischen gut wirkende, wenig aggressive Systeme zur Verfügung stehen.

### 3.1.4 Das Seitenairbagsystem

#### Wirkprinzip

Durch den mittlerweile guten Insassenschutz bei Frontalunfällen rücken Seitenunfälle wegen der hohen Verletzungsfolgeschwere zunehmend ins Blickfeld der Sicherheitsentwicklung. Das erhöhte Risiko für den Insassen wird hierbei vor allem von dem Geschwindigkeitsunterschied zwischen dem Insassen und der eindringenden Struktur bestimmt. So dienen primäre Schutzmaßnahmen wie die Verstärkung der Seitenstruktur und die Polsterung der Innenraumteile zur Verringerung der Intrusionsgeschwindigkeit und -tiefe eindringender Strukturen. Erste Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit beim Seitenaufprall waren die Verstärkung der Seitenstruktur. Hierzu wurden Bodengruppe, Querträger, Schweller sowie die Türschlösser verstärkt und Streben in die Türen integriert. Der radikalere Ansatz des Uni-Car<sup>8</sup>, fahrzeugfeste Frontsitze und einen massiven Querträger in Höhe der B-Säulen einzusetzen, hat sich wegen der Package-Nachteile nicht durchgesetzt [UNI-CAR, 1983]. Um einen Anprall des Insassen an der Fahrzeugstruktur oder dem Kollisionskontrahenten zu vermeiden und ungünstige Insassenbewegungen zu reduzieren, ist der Schutz von Kopf und Thorax durch Seitenairbags nötig. Diese verhindern den direkten Kontakt mit der Struktur und begrenzen die Kopfbewegung. Das größte Problem in der Entwicklung der Seitenairbags stellt die im Vergleich zum Frontalaufprall sehr kurze Zeitspanne zur Sensierung sowie zur Entfaltung der Airbags dar. Die Airbags der ersten Generation schützten vor allem Brust und Becken vor einem Kontakt mit der Seitenstruktur. Der Einbau erfolgt je nach Hersteller in der Sitzlehne oder der Türverkleidung. Um den Kopf zu schützen, werden heute zusätzliche Airbags verwendet [MESSNER, 1997, MÜLLER, 2000].

#### 3.1.4.1 Wirkungsweise

##### Sensoren

Heutige Seitenaufprallschutzsysteme nutzen Sensoren, die auf der Messung der Beschleunigung und des Luftdrucks beruhen [ZANDER, 2001]. Diese sind entweder

- auf dem Fahrzeugtunnel angebracht, um Beschleunigungen in Querrichtung zu messen,
- auf den Sitzquerträgern oder in der B-Säule angebracht, um Beschleunigungen zu messen (externally mounted),
- in den Vordertüren montiert, um die Luftdruckänderungen infolge der Deformation zu messen,
- im hinteren Unterboden oder der C-Säule angebracht, um Beschleunigungen zu messen (externally mounted).

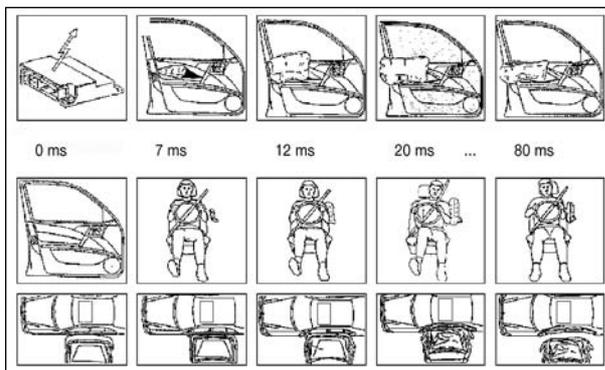
Die Sensoren messen mechanische Werte und führen dann eine Vorverarbeitung für den Auslösealgorithmus durch. Für die Auslösung des Airbags existieren dabei verschiedene Konzepte:

- a) Jeder Sensor beinhaltet einen Mikrokontroller, der den Auslösealgorithmus berechnet. Die Auslöseentscheidung wird an eine zentrale Kontrolleinheit übergeben, die dann nach einer Plausibilitätsprüfung das Rückhaltesystem auslöst.
- b) Aufgebaut wie a) und zusätzlich mit einem Sensor in der Kontrolleinheit ausgestattet, der die Auslöseentscheidung der externen Sensoren bestätigen muss (Sicherheitsfunktion).
- c) Jeder Sensor übergibt seine gemessenen Daten an eine zentrale Kontrolleinheit, die einen Hochleistungsmikrokontroller beinhaltet. Diese berechnet den Auslösealgorithmus unter Berücksichtigung der externen Sensoren.

Dabei wird in den Konzepten b) und c) eine Sicherheitsfunktion verwandt, um ungewollte Airbagauslösungen zu verhindern. Diese können durch elektrische Fehler der externen Sensoren oder lokale Stöße auf die Sensoren ohne eine Beschleunigung der Insassen hervorgerufen werden.

Diese Sicherheitsfunktion wird nicht zum Setzen der Auslöseschwelle für die Seitenairbags benutzt. Ihre Schwelle liegt weit unter der eines externen Sensors, würde also schon bei geringen Zusammenstößen überschritten werden. Die Auslöseschwelle für die „Feuer“- oder „Nicht-Feuer“-Entscheidung wird durch die Signale der externen Sensoren innerhalb des Auslösealgorithmus festgelegt. Die Auslöseschwellen für die Seitenschutzsysteme werden durch die Anforderungen in den gesetzlichen Testverfahren und den Konsumenten-Tests bestimmt. So sind für Europa die ECE R95

<sup>8</sup> Uni-Car – Forschungs-Personenwagen, der von vier wissenschaftlichen Instituten der Fahrzeugtechnik im Auftrag des Bundesministers für Forschung und Technologie von 1979 bis 1982 konstruiert und erprobt wurde.



**Bild 3.5:** Zeitlicher Ablauf der Airbag-Entfaltung, der Relation zwischen Airbag und Insassen sowie der Fahrzeugbewegung bei Seitenkollisionen [KRAMER, 1998]

und EuroNCAP, für die USA die FMVSS 214, SINCAP und IIHS und für Japan das Japan NCAP und TRIAS bestimmend für die Auslegung der Auslösebedingungen.

Die Leistungsfähigkeit der verwendeten Sensoren unterscheidet sich deutlich und muss dem Einbauort und Zweck entsprechen.

Beschleunigungssensoren finden als Front- und Seitensensoren in Fahrzeugen die häufigste Anwendung. Sie sind sehr klein und können deshalb problemlos an den verschiedensten Stellen im Fahrzeug untergebracht werden. Sie können unabhängig vom Anstoßort eines Hindernisses die Beschleunigung in Fahrzeugquerrichtung ermitteln, sodass nur ein Sensor, z. B. befestigt am Sitzquerträger, notwendig ist, um einen Pfahl- oder Barrierenkontakt zu sensieren. Probleme bei der rechtzeitigen Auslösung können dann auftreten, wenn kein ausreichend großes Beschleunigungssignal den Sensor erreicht. Dies kann der Fall sein, wenn

- das Hindernis weiche Strukturen trifft, die nicht zu einer ausreichenden Fahrzeugbeschleunigung führen,
- der Anstoßort nicht steif verbunden mit der Sensorposition ist,
- große Entfernungen zwischen Anstoß- und Sensorposition bestehen.

Drucksensoren werden momentan von mindestens zwei Fahrzeugherstellern benutzt. Diese Sensoren werden in der Tür angebracht und messen während einer Deformation der Tür die Druckveränderung in der Tür. Im Falle eines Pfahl- oder Barrierenaufpralls steigt der Luftdruck in der Tür mit bis zu 200 mbar/ms an. Im Vergleich zu den Beschleunigungssensoren erreichen diese Drucksensoren

kürzere Auslösezeiten. Das Risiko einer Fehlauslösung bei Unterboden- oder Fahrwerkstößen besteht nicht. Allerdings kann ihr Einbauort nur an Stellen mit einem geschlossenen Luftvolumen gelegt werden (Türen). Das bedeutet, dass Anstöße außerhalb dieses Bereichs, z. B. vordere und hintere Fahrzeugseite, nicht sensiert werden können.

Durch die Komplexität der Anforderungen besteht durchaus die Gefahr, Fehler bei der Entwicklung und Produktion zu machen. Vor diesem Hintergrund scheinen in-use-tests mit ungewöhnlichen Konfigurationen und eine Analyse spezieller Unfälle als notwendig. Auch eine Hardware-in-the-loop-Prüfung von Auslöselogiken für ein breites Spektrum von Lastfällen erscheint sinnvoll.

#### Aktuatoren

Der Aufbau des Seitenairbagsystems entspricht dem des Frontairbagsystems (vgl. Kapitel 3.1.3.1). Die Systembestandteile müssen allerdings auf die Besonderheiten des Seitenaufpralls angepasst werden. Aufgrund des im Vergleich zur Vorverlagerung bei Frontalkollisionen kürzeren Abstandes zwischen Insassen und Türverkleidung muss die Auslösung des Seitenairbags erheblich schneller reagieren. Die Zündung des Generators erfolgt schon nach etwa 5 ms, seine Wirksamkeit entfaltet er nach etwa 12–18 ms nach dem seitlichen Anstoß. Da es zu einer Pendelbewegung des Insassen infolge des seitlichen Anstoßes kommt, muss der Seitenairbag längere Standzeiten als der Frontairbag aufweisen, um ein Anschlagen des Insassen bei schon erschlafte Luftsack an die Seitenstruktur zu verhindern.

#### 3.1.4.2 Der Curtain- oder Windowairbag

In vielen Fahrzeugen werden heutzutage Airbags zum Schutz des Kopfes in Form eines Vorhangs oder eines Zylinders an der Fahrzeugseite angeboten. Diese Airbags stellen eine wesentliche Ergänzung der Seitenrückhaltesysteme dar. Sie bestehen, wie jedes andere Airbagsystem, aus dem Gasgenerator, dem Luftsack und Befestigungselementen, mit denen das System an die entsprechenden Teile des Dachrahmens montiert wird.

Thoraxverletzungen treten bei Seitenkollisionen häufiger auf als Kopfverletzungen, allerdings sind die Kopfverletzungen in 50 % der Fälle tödlich [ORIZARIS, 1998]. Diese Curtain- oder Window-

bags schützen den Kopf der Insassen gegen den Kontakt mit der Fahrzeugstruktur bzw. mit eindringenden Objekten und verhindern das Herausschleudern bei einem möglichen Überschlag. Der Airbagvorhang schützt sowohl die Front- als auch die Fondinsassen. Des Weiteren ist solch ein Airbagvorhang als zusätzliche Polsterung zur Erfüllung des FMVSS-201-Standards in den USA zu zählen. Für die durch einen Airbag abgedeckten Bereiche ist laut FMVSS 201 nur eine Auftreffgeschwindigkeit der freifliegenden Kopfform von 19 km/h statt der üblichen 24 km/h vorgesehen.

### Sensoren

Der Vorhangairbag wird gemeinsam mit den anderen Seitenairbags von derselben elektronischen Auslöseeinheit aktiviert, die auch die Frontairbags auslöst. Diese misst Längs- und Quereschleunigungen und wird durch Sensoren in der Fahrzeugseite unterstützt. Bei einem Fahrzeugüberschlag, der erstmalig von Mercedes direkt sensiert wird, kommt es auch zu einer Auslösung des Vorhangairbags, um das Herausschleudern der Insassen zu vermeiden. Außerdem werden die Gurtstraffer aktiviert, um die Insassen besser in Position zu halten.

### Aktuatoren

Das eben vorgestellte Prinzip wird nun von den Herstellern in mehreren Formen in den Fahrzeugen umgesetzt. So besteht dieser Airbag bei BMW aus einem Gewebes Schlauch, der sich von der A-Säule bis zur C-Säule erstreckt. Das System ist im Dachrahmen untergebracht. Um diesen Schlauch ist ein Segel gespannt. Sein Volumen beträgt ca. 24 l. Bei einer Auslösung wird das Segel durch den sich füllenden Gewebes Schlauch nach unten gespannt. Das System erstreckt sich über die gesamte Fahrzeugseite und schützt damit den Kopfbereich vorn und hinten [SCHICK, 2001].

Bei Mercedes erstreckt sich der Luftsack auch von der A- bis zur C-Säule, besteht hier allerdings aus neun vertikalen Kammern. Der Airbag hat ein Volumen von 12 l und wird durch einen Hybridgasgenerator befüllt.

### 3.1.5 Kinderrückhaltesysteme

Es gibt deutliche Unterschiede in der Schutzwirkung unterschiedlicher Kinderrückhaltesysteme. Kinder, die nur mit einem normalen Gurt geschützt

sind, werden häufiger und schwerer verletzt als mit einem kindgerechten System geschützte Kinder. Dies wird in Tabelle 3.1 für Kinder bis 12 Jahre dargestellt.

Die Schutzwirkung der unterschiedlichen Systeme differiert sehr stark und ist auch von einer sehr hohen Fehlbedienungsquote (63 %) beeinflusst. In 33 % aller untersuchten Fälle lässt sich sogar eine schwerwiegende Fehlbedienung finden. Hier werden die Vorteile beim Einsatz des ISOFIX-Systems deutlich. Die Fehlbedienungsquote sank in einem Test für dieses System auf 4 %. Nach Angaben der Versuchspersonen war das ISOFIX-System leichter zu installieren, lediglich das Gewicht übersteigt das eines herkömmlichen Kindersitzes [LANGWIEDER, 1997]. In vielen Fahrzeugen werden inzwischen auf den hinteren äußeren Sitzplätzen ISOFIX-Befestigungsmöglichkeiten angeboten. Großer Nachteil beim Vergleich der Schutzwirkung von verschiedenen Rückhaltesystemen für Kinder ist das Fehlen

	Kind of restraint system					
	CRS		3-point belt		Lap belt	
	No.	%	No.	%	No.	%
MAIS 0	83	41.5	10	8.4	11	23.4
MAIS 1	95	47.5	77	64.7	25	53.2
MAIS 2	17	8.5	24	20.2	8	17.0
MAIS 3	-	-	3	2.5	-	-
MAIS 4/5	2	1.0	5	4.2	2	4.3
MAIS 6	3	1.5	-	-	1	2.1
Total	200	100.0	119	100.0	41	100.0
MAIS 2+	22	11.0	32	26.9	11	23.4

Tab. 3.1: Verletzungen bei unterschiedlichen Kinder-Rückhaltesystemen für Kinder bis 12 Jahre [LANGWIEDER, 1997]

Type of CRS	Total	of which, with misuse	
	No.	No.	%
ECE group 0 Rearward facing system	18	10	55.6
ECE group I 4-point system	63	57	90.5
5-point system	62	41	66.1
Seat with impact shield	13	12*	92.3
ECE group I/II 3-point system	24	6	25.0
ECE group II Impact shield only	5	1	-
ECE group II/III Booster cushion	107	56	52.3
Total	292	183	62.7

Tab. 3.2: Anzahl der Fehlbedienungen bei verschiedenen Rückhaltesystemen für Kinder [LANGWIEDER, 1997]

eines geeigneten Testverfahrens, vor allem für den Seitenaufprall. Die gegenwärtige europäische Regelung zur Prüfung und Zulassung von Kinderschutzsystemen (ECE R44-03) für Pkw beinhaltet dynamische Tests zur Frontal- und Heckaufprallsimulation. Der Seitenaufprall ist bisher nicht berücksichtigt, obwohl die Verletzungsschwere und die Verletzungsfolgekosten groß sind. Verletzungen des Kopfes und des Halsbereiches sind sehr häufig und schwer [NETT, 2001].

### 3.1.6 Potenziale existierender RHS

Aus Untersuchungen des GDV wird deutlich, dass bei gleichem Beschädigungsgrad das Risiko, schwere Verletzungen zu erleiden, erheblich geringer ist, wenn das Fahrzeug mit einem Airbag ausgestattet ist. Schon der Gurt allein bringt bei schweren Unfällen eine Reduzierung der schwer Verletzten und Getöteten um ca. 75 % gegenüber dem ungeschützten Insassen [LANGWIEDER, 1997].

Airbag und Gurt zusammen verringern die Wahrscheinlichkeit tödlicher Verletzungen um über 40 % gegenüber einem „Nur-Gurt“-Rückhaltesystem bei einer Unfallschwere von EES 35–60 km/h. Aus der Datenbank des GDV, welche für diese Studie verwendet wurde, geht auch hervor, dass 42 % aller Auslösungen des Beifahrerairbags unnötig waren, da der Sitz nicht besetzt war, was unnötige Reparaturkosten zur Folge hat. Ebenso lösen 50 % der Airbags bereits bei einer EES von 15 km/h aus, was zu früh ist, da in diesem Bereich der Gurt als Rückhaltesystem ausreicht. Durch die zusätzliche Airbagauslösung in diesen Fällen kommt es zu vermeidbaren Verletzungen, wie Verbrennungen und Abschürfungen. Wichtiger ist jedoch, dass im Falle einer möglichen schweren Zweitkollision der Airbag keine Schutzwirkung mehr hat und es somit zu schweren Verletzungen kommt [LANGWIEDER, 1997].

Die Schutzwirkung von Airbag und Gurt für Beifahrer in unterschiedlichen Sitzpositionen wurde in verschiedenen Versuchsreihen untersucht [SCHMITZ, 1996]. Hierzu wurden unterschiedliche Dummies (5%-Frau bis 95%-Mann) in unterschiedlichen Sitzpositionen im Fahrzeug platziert. Die Sitzpositionen reichen von ganz nah vor dem Airbagmodul bis hin zu einer liegenden Position mit den Beinen auf dem Armaturenbrett. Dies bildet mögliche Out-of-Position-Positionen eines Beifahrers ab. Als Schutzsystem wird ein 65-I-Eurobag mit gekoppel-

tem Gurtstraffer verwendet. Ein Versuch mit einem nicht angeschnallten Dummy zeigt ein erhebliches Verletzungsrisiko, da er den Airbag durchschlägt und mit dem Kopf in die Frontscheibe prallt. Die Variation der Sitzlängseinstellung zeigt keine Unterschiede in der Belastungshöhe der Dummies, allerdings entstehen etwas größere Biegewinkel am Hals (6°) sowie eine etwas größere Brusteingdrückung (13–18 mm) bei entfernter Sitzposition. Hier ist durch bessere Abstimmung der Komponenten eine weitere Verbesserung zu erzielen. Für den 5%-Dummy ergab sich kein erhöhtes Risiko trotz Airbaganschusses. Bei liegender Position ist der Airbag wirkungslos. Liegen die Füße auf der Modulklappe, ergibt sich eine erhebliche Belastung für die Beine. Bei einem weiteren Versuch wurde der Dummy so nah wie angeschnallt möglich am Airbagmodul platziert. Auch in diesem Versuch traten keine Belastungen auf, die den Insassen ernsthaft gefährdet hätten. Es hätte jedoch zu Abschürfungen im Gesicht kommen können. Beim Versuch mit dem 95%-Dummy zeigt das Schutzsystem ausreichende Schutzwirkung, wird allerdings bis an seine Grenzen belastet. Auch hier könnte eine bessere Abstimmung zu weiteren Verbesserungen führen.

Um Pkw-Insassen vor schweren Verletzungen zu schützen, erscheinen die derzeit vorhandenen Sicherheitseinrichtungen für den Frontalaufprall wie Sicherheitsgurt, Airbag und konstruktive Maßnahmen am Pkw ausreichend. Es wird allerdings noch Entwicklungspotenzial im Fußraum zur Vermeidung von Fußverletzungen und bei der Verringerung von Intrusionen der Fahrgastzelle gesehen. Für den Seitenaufprall gilt es, noch Verbesserungen durch den Einsatz von geeigneten Airbagsystemen einzusetzen [OTTE, 1997]. Ein Schritt in diese Richtung stellen die neuen Kopfairbagsysteme in der Vorhangausführung (Curtain- oder Windowbag) dar. Die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen haben gezeigt, dass heutige Airbagsysteme weiterer Anpassung bedürfen, um möglichst vielen realen Gegebenheiten im Unfallgeschehen nachzukommen. Teilweise ist eine bessere Abstimmung der Systeme aufeinander schon ausreichend. Dies kann allerdings nur einen Kompromiss für die möglichen Konstellationen darstellen. Es wird deutlich, dass Systeme notwendig werden, die in der Lage sind, unterschiedliche Sitzpositionen und Insassen zu sensieren, um dann gezielt auf die vorliegende Situation optimal reagieren zu können.

Mit Hilfe der numerischen Simulation lassen sich Optimierungsmöglichkeiten von Rückhaltesyste-

men aufzeigen. Für mehrstufige Gurtkraftbegrenzer und deren Auslegung ließ sich zeigen, dass durch Anpassen des Gurtkraftbegrenzers an die unterschiedlichen Unfallsituationen die Schutzwirkung des Rückhaltesystems effektiv erhöht werden kann [SCHAUB, 1997; NITSCHKE, 2002].

### 3.2 Intelligente Rückhaltesysteme – iRHS

#### 3.2.1 Systematisierung der Funktionsweise von iRHS

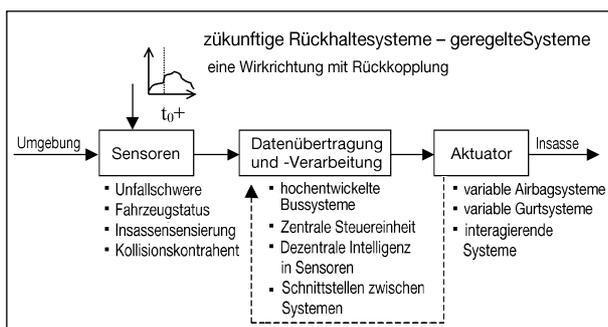
Vergleichend zu der Systematisierung der Funktionsweise von RHS wird in Bild 3.6 Gleiches für die iRHS dargestellt.

Für intelligente Rückhaltesysteme wird das Erkennen einer drohenden Kollision schon im Vorfeld der Kollision den entscheidenden Zeitvorteil für die Aktivierung der adaptiven Schutzsysteme liefern. Die Pre-Crash-Sensierung wird zum charakteristischen Bestandteil zukünftiger intelligenter Rückhaltesysteme werden.

Die Pre-Crash-Phase bezeichnet den Zeitraum vor der Kollision, der mit der ersten Berührung endet. Fraglich ist jedoch die Festlegung des Beginns. Stellt man dem System eine kürzere Reaktionszeit ein, was zu einer kürzeren Pre-Crash-Sensierung führt, so bleiben die angesteuerten Systeme sehr aggressiv. Zur Verringerung der Aggressivität ist eine längere Reaktionszeit einzuplanen, was zu einer Steigerung der Fehleranfälligkeit des Systems führt.

Für ein voll entwickeltes Pre-Safe-System müssen folgende Anforderungen an das System gestellt werden:

- Solange der Fahrer durch aktiven Eingriff den Unfall verhindern kann, darf es nicht zu einer Systemreaktion kommen.



**Bild 3.6:** Systematisierung der Funktionsweise zukünftiger Rückhaltesysteme

- Um die Schutzeinrichtungen zu aktivieren, muss der bereits unvermeidlich gewordene Unfall mit hinreichender Wahrscheinlichkeit erkannt werden; bei Systemen mit höherer Wahrscheinlichkeit für einen Fehlalarm dürfen nur Einrichtungen aktiviert werden, die sich selbst in den Originalzustand zurückstellen oder leicht zurückgestellt werden können und somit bei einer Fehlauflösung keine Reparaturkosten nach sich ziehen (reversible Systeme).
- Erst wenn mit der Sicherheit heutiger Crashesensoren der Unfall erkannt wird, werden nicht reversible Systeme aktiviert.

Eine Kollision kann durch ein Pre-Crash-System etwa 90 ms vor der ersten Berührung erkannt werden. Dieser Zeitgewinn kann genutzt werden, um den Insassen früher zurückzuhalten und die Belastungen zu minimieren. Wird eine Insassenerkennung verwendet, kann hierdurch das Rückhaltesystem auf den Insassen und seine Sitzposition abgestimmt reagieren. Eine der wichtigsten Größen, nämlich die Masse des Kollisionsobjektes, kann nicht berührungsfrei im Fernfeld gemessen werden, weshalb heutige Pre-Crash-Systeme fehlertolerant ausgelegt werden müssen. Die von einem Pre-Crash-System aufgenommenen Größen können die Entscheidung heutiger Rückhaltesysteme unterstützen, da mehr Informationen über den Unfall zur Verfügung stehen und bestimmte Informationen auch noch früher verfügbar sind. Dadurch ist eine differenzierte Reaktion des Rückhaltesystems möglich. Bestimmte reversible Systeme, wie Sitzeinstellung, Lenksäule und elektromechanische Retraktoren, können durch das Pre-Crash-System aktiviert werden, um den Insassen in eine möglichst günstige Position zu bringen [KIMBERLEY, 2001; LANG, 1999].

In [MORSINK,2001] wird auf Basis einer Literaturrecherche ein Überblick über die Pre-Crash-Sensierung zur Erhöhung der aktiven und passiven Sicherheit gegeben. Pre-Crash-Sensing bedeutet dabei so viel wie die Überwachung der Unfallumstände (Umfeld, Kollisionspartner) und der individuellen Insassenmerkmale unmittelbar vor dem Unfall und in der Anfangsphase der Kollision, um den Unfall zu vermeiden oder ihn zu beeinflussen. Im Bild 3.7 ist das Prinzip eines integrierten Sicherheitssystems dargestellt.

Die Pre-Crash-Sensierung erhöht die Fahrzeugsicherheit durch:

- die Vermeidung eines Unfalls,

- die Optimierung der Maßnahmen zur Minderung der Unfallfolgen Schwere durch einen deutlichen Zeitgewinn.

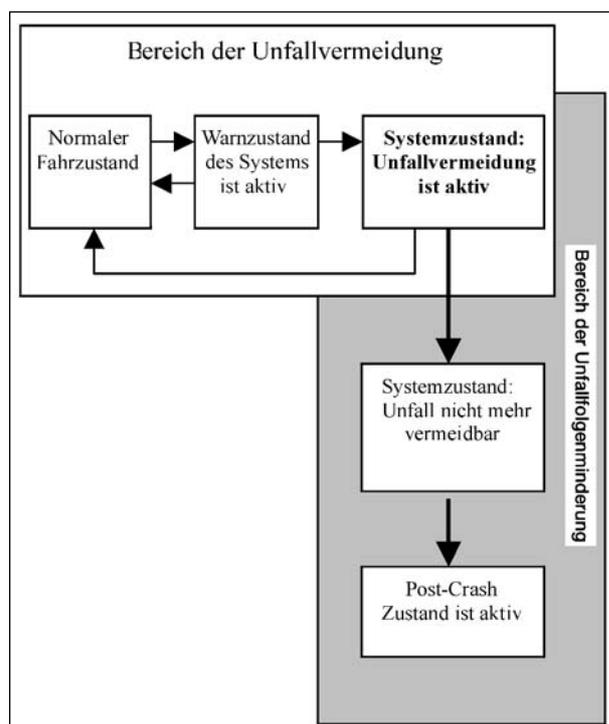
Damit wird der Weg hin zu einer Fahrzeugsicherheit geebnet, die Schutzfunktionen in Kenntnis umfassender Informationen über Kollisionstyp, Anstoßrichtung, Unfallschwere, Insassenposition und -klassifikation in Echtzeit optimal auslöst.

### Sensoren

Zukünftig werden vielfältige Sensoren zur Überwachung der Umgebung in das Fahrzeug Einzug halten. So werden Sensoren mit kurzer, mittlerer und großer Reichweite zum Einsatz kommen.

Es können zwei unterschiedliche Gruppen von Systemen unterschieden werden. Auf der einen Seite stehen die Systeme zur Unfallvermeidung, wie ACC (Adaptive Cruise Control), ADAS (Advanced Driver Assistant Systems) und aktive Unfallvermeidungsaktuatoren (Bremse, Gas, Lenkung). Auf der anderen Seite stehen die Systeme zur Unfallfolgenmilderung. Hierzu gehören Systeme wie:

- Pre-Crash-Sensoren mit großer Reichweite,
- Pre-Crash-Sensoren mit geringer Reichweite,
- Crashsensoren,



**Bild 3.7:** Integriertes Sicherheitssystem (Integrated Safety System) [MORSINK, 2001]

- Insassenklassifizierung (Sitzbelegungserkennung, Gewichtssensierung, individuelle Merkmale, z. B. Nutzererkennung),
- Insassennähe und -bewegungssensierung,
- Sensierung der Sitzstellung,
- Sensierung der Gurtbenutzung.

In der Pre-Crash-Phase lässt sich durch „eine virtuelle Vergrößerung“ des Fahrzeugs wertvolle Zeit sparen [TEICHMANN, 2000]. Man unterscheidet dabei in:

- Sensorsysteme, die die Auslöseelektronik voreinstellen,
- Sensorsysteme, die die Auslöseelektronik voraktivieren und eventuell vorhandene reversible RHS aktivieren,
- Sensorsysteme, die bereits vor dem Aufprall irreversible RHS aktivieren.

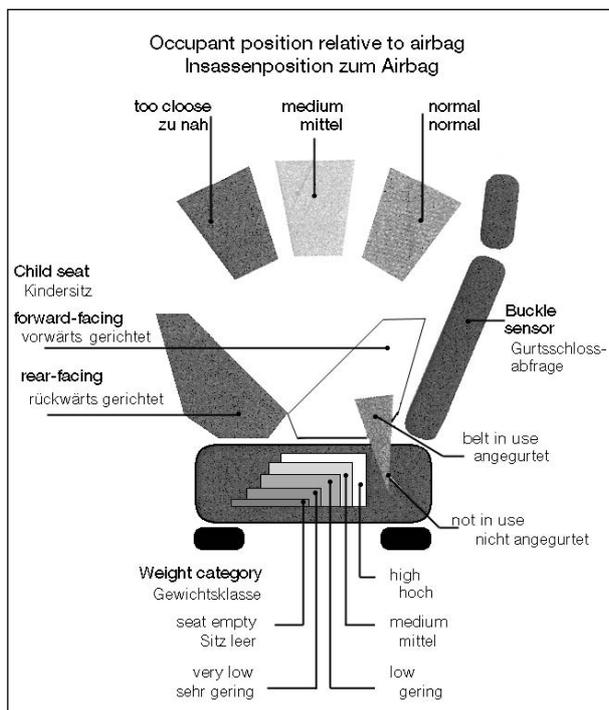
Für die Sensierung der Unfallschwere stehen folgende Sensoren zur Verfügung:

1. Crashsensoren. Sie messen Beschleunigungen und verwenden unterschiedliche physikalische Prinzipien:
  - feinmechanisch, mikromechanisch,
  - piezoelektrisch,
  - Winkelratensensoren.
2. Pre-Crash-Sensoren. Sie sensieren Objekte vor dem Fahrzeug und bestimmen deren Abstand zum Fahrzeug:
  - Mikrowellenradar,
  - LIDAR, 3d-Kameras,
  - Ultraschall-Entfernungsmesser,
  - Videokameras im sichtbaren oder infraroten Frequenzbereich mit automatischer Bildanalyse.

Für die Sensierung der Fahrzeuginsassen sind die folgenden Technologien einsetzbar:

Sensierung des Gewichtes der Insassen:

- Resistive Strain Gauges (Dehnmessstreifen),
- Load Cells (Kraftmessdosen),



**Bild 3.8:** Sensoren für die OOP-Sensierung des Insassen [TEICHMANN, 2000]

- Bladder-based Pressure Measurement (blasenbasierte Druckmessung).

#### Dynamische Insassensensierung

- kapazitiv (elektrisches Feld),
- passives Infrarot,
- Reichweitesysteme (Ultraschall, Radar, Infrarot, optisch),
- Bilderkennungssysteme (visuell, optisch, Infrarot).

In Bild 3.8 ist die Insassenpositionsbestimmung als eine Schlüsselgröße für zukünftige Rückhaltesysteme dargestellt.

Allerdings könnte ein fortgeschrittenes Unfallwarnsystem nach Aussagen der Hersteller frühestens in 5 Jahren serienreif sein. Aktive Kontrolle des Fahrzeugs in kritischen Situationen benötigt noch sehr viel mehr Zeit bis zur Einsatzreife. Bei allen Entwicklungen ist stets die Akzeptanz durch den Fahrer bzw. Kunden im Auge zu behalten [MORSINK, 2001].

### 3.2.2 Gurtsysteme

Auslöser für den Gedanken zur Entwicklung eines innovativen Gurtsystems war die Verbesserung des

Insassenschutzes besonders für die Fondinsassen. Für die Rücksitze ist gerade die Verwendung von Gurtkraftbegrenzern problematisch, da weniger Vorverlagerungsweg zur Verfügung steht als im Bereich der Frontsitze. Bei schweren Unfällen kann es so zum Kontakt mit Teilen des Fahrzeuginnenraumes kommen.

Der Inflatable Tubular Torso Restraint (ITTR) bietet den Vorteil, dass es wie der Gurt die Vorverlagerung des Insassen begrenzt sowie die Kräfte über eine größere Fläche abfängt. Da nur der Brustgurt aufgeblasen wird, sind in der Entwicklung ein Retraktor für den Beckengurt und ein Retraktor für den Brustgurt vorgesehen. Der Gasgenerator befindet sich im Bereich des Gurtsschlusses. Das Aufblasen des Gurtes ist mit einer Gurtstraffung verbunden, da sich das Gewebe in der Länge verkürzt. Für den aufblasbaren Gurt sind keine Ventilationsöffnungen vorgesehen, was zu einer sehr langen Standzeit für den ITTR führt, wodurch dieser auch noch für eine Sekundärkollision eine Schutzwirkung bietet.

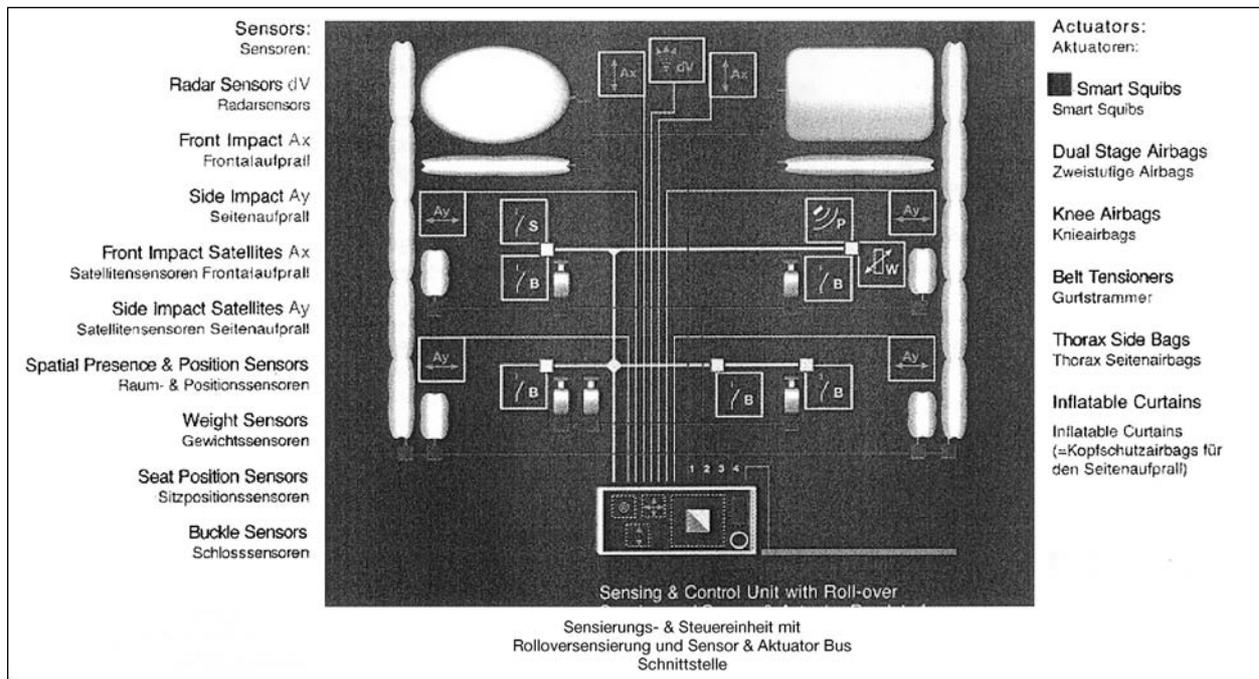
Die Schutzwirkung im Seitencrash wird erheblich verbessert. Es wird keine Zeit zur Positionierung benötigt. Der ITTR entfaltet sich direkt am zu schützenden Insassen, wodurch eine Abstützung an der Fahrzeugstruktur nicht erforderlich ist. Bei einem Pfahltest wurden im Vergleich mit einem normalen 3-Punkt-Gurtsystem Belastungsreduzierungen von bis zu 90 % erreicht. Im Vergleich mit einem herkömmlichen Gurtsystem sind die Belastungen beim Frontalcrash in etwa gleich, wobei die Vorverlagerung reduziert wird.

Die Integration in ein Sitzsystem mit integriertem Gurt, wie es häufig in Cabrios zum Einsatz kommt, ist ohne großen Aufwand möglich [MOWRY, 1999]. Derzeit stehen aber noch einige praktische Fragen einer Einführung im Wege (Aufwickelverhalten des deutlich dickeren Gurtes, Dauerhaltbarkeit).

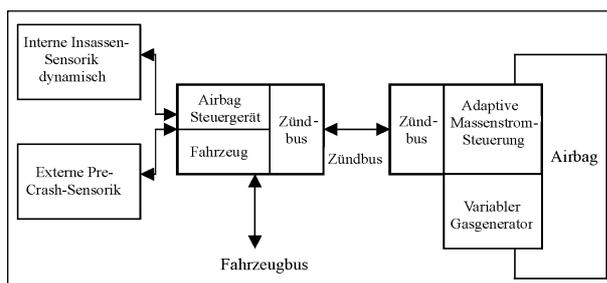
### 3.2.3 Adaptive Frontairbagsysteme

Ein adaptives Airbagsystem muss in der Lage sein, die für die adaptive Regelung des Generators notwendigen Informationen in Echtzeit zur Verfügung zu stellen. Das stellt insbesondere hohe Anforderungen an die Sensorik und das zentrale Steuergerät (Bild 3.10).

Für eine optimale Funktion müssen der Insassen-Sensorik die folgenden Informationen zur Verfügung stehen:



**Bild 3.9:** Architektur eines adaptiven Rückhaltesystems [TEICHMANN, 2000]



**Bild 3.10:** Prinzip eines adaptiven Airbagsystems [BAUER, 1997]

- Sitzposition,
- Insassengröße,
- Insassengewicht,
- Insassenposition, statisch,
- dynamische Vorverlagerung und Überwachung des kritischen Insassenabstandes zum Airbag-Modul vor und während des Crashes.

Bezogen auf die externe Pre-Crash-Sensorik sind die folgenden Informationen notwendig:

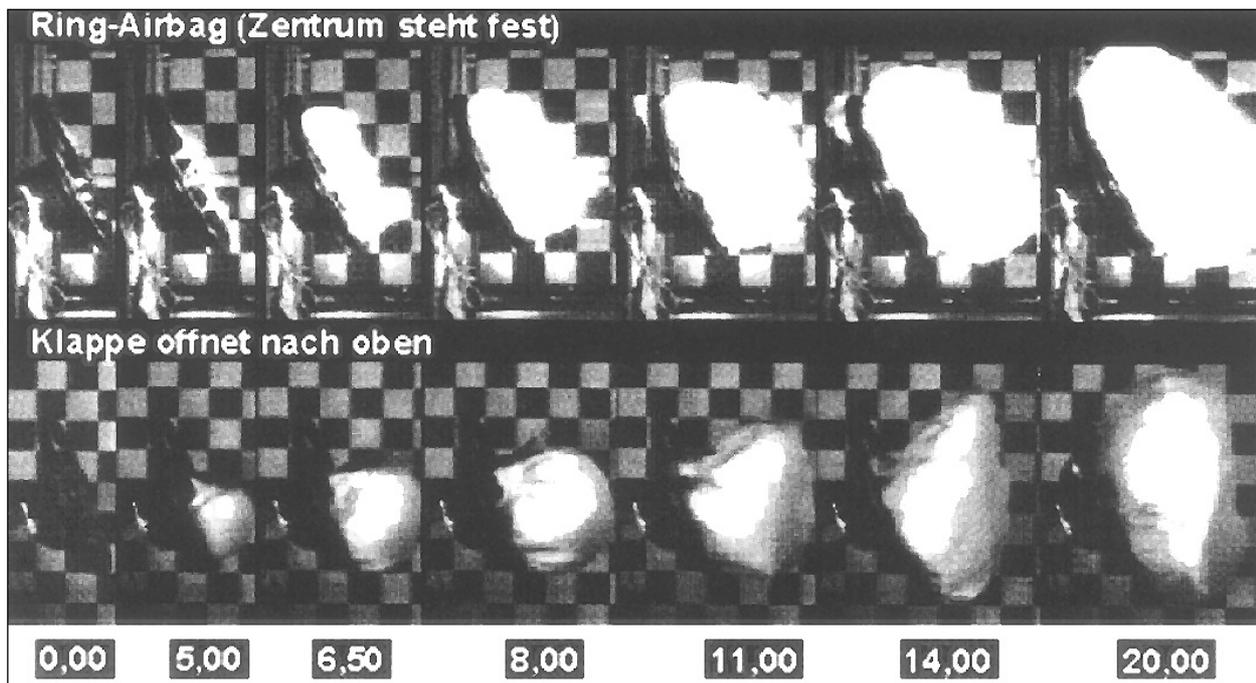
- Abstand und Richtung zum Kollisionsgegenstand,
- Differenzgeschwindigkeit zum Kollisionsgegenstand,
- Größe und Masse des Kollisionsgegenstandes.

Diese Informationen sind im zentralen Steuergerät aufzuarbeiten und dem Gasgenerator in Form einer

Kennlinie vor dem Crash zuzuweisen. Bei Bedarf muss das Steuergerät während, vor oder nach einem Auslösen des Generators Korrekturdaten liefern, mit denen die voreingestellte Kennlinie adaptiv angepasst werden kann [BAUER, 1997].

Für einen Rundumschutz können künftig bis zu 15 verschiedene Sensorik- und Kontrolleinheiten benötigt werden. In Anlehnung an heutige RHS ist in Bild 3.9 die Architektur eines künftigen Sicherheitssystems abgebildet. Es wird deutlich, dass speziell auf der Sensorseite erheblich mehr Informationen bereitgestellt werden müssen, um ein adaptives RHS darzustellen [TEICHMANN, 2000].

Andere Entwicklungsrichtungen versuchen heutige Airbagsysteme zu optimieren und so eine Intelligenz des Systems zu erreichen, ohne die Entwicklungskosten extrem steigen zu lassen. Beim Vergleich eines herkömmlichen Rückhaltesystems mit einer optimierten Kennung und einem System mit variablem Gasgenerator ließ sich zeigen, dass sehr wohl ein Adaptionsbedarf bei Rückhaltesystemen besteht, dieser aber mit einer optimierten Auslegung eines herkömmlichen Systems besser erreicht wird als durch die Einführung variabler Gasgeneratoren [ADOMEIT, 1997]. Dabei wurde das herkömmliche RHS auf biomechanisch verträgliche Kräfteinleitung optimiert, um die Effektivität zu steigern. Ein früher und harter Anstieg der Rückhaltekräfte hat eine Verringerung der Belastungen während der Vorverlagerung des Insassen zur



**Bild 3.11:** Vergleich des Entfaltungsverhaltens eines Ringairbags (oben) und eines herkömmlichen Airbags [FELLHAUER, 2001]

Folge. Somit können sich auch Belastungsspitzen und die Insassenvorverlagerung reduzieren lassen, woraus der Schluss gezogen wird, dass eine Adaption an extrem schwere Unfälle nicht notwendig ist.

Um dem Sekundäraufprall durch Airbagsysteme besser gerecht zu werden, wurde ein System entwickelt, bei dem ein Deformationselement in das Airbagmodul integriert ist, welches den Insassen bei nicht auslösendem oder schon ausgelöstem Airbag zu schützen vermag. Dabei wird der Insasse vor einem Kontakt mit dem Airbagmodul geschützt, was sich in deutlich geringeren Belastungen, ermittelt in Simulationen, erkennen lässt [NEUPERT, 1997].

Eine Alternative zu den herkömmlichen Airbags stellt der Ringairbag dar. Seine Besonderheit liegt in erster Linie darin, dass sich der Airbag nicht zum Fahrer hin, sondern seitlich entfaltet. Dabei ähnelt der geöffnete Luftsack einem Rettungsring. Der Zentralteil der Abdeckung des Airbagmoduls bleibt erhalten, sodass der Fahrer weder vom Airbag noch von der Modulabdeckung direkt getroffen wird. Aus den Versuchen, die zum Vergleich mit normalen Airbags gemacht wurden, zeigen sich die Vorteile des Ringairbags deutlich (vgl. Bild 3.11). Es zeigt sich durch die Konstruktion und Faltung bedingt eine harmonischere Entfaltung ohne das typische Überschwingen bei herkömmlichen Luft-

säcken. Die Befestigung des Airbags im Zentrum bietet Fangbändeigenschaften, womit der Airbag sehr gut stabilisiert werden kann.

Audi führt erstmals weltweit das Ringairbagsystem mit zweistufigem Generator auf dem Fahrerplatz in die Serie ein. Außerdem führt Audi ein System ein, das per Fingerabdruck des Fahrers personenabhängige Komforteinstellungen vornimmt (Sitzposition, Lenkradposition, Radiosender etc.). In einem nächsten Schritt wäre es denkbar, dieses System auf die RHS zu übertragen. So könnte mit dem Wissen über Größe, Gewicht und Alter des Fahrers, gespeichert mit dem Fingerabdruck, eine adaptive Einstellung des Airbags, der Gurtstraffer und des Gurtkraftbegrenzers erfolgen.

### 3.2.3.1 Wirkungsweise

Gestufte/variable Gasgeneratoren

Die Entwicklung hin zu einem adaptiven Airbagsystem mittels variabler Gasgeneratoren wird schrittweise erfolgen. Der erste Schritt sind zweistufige Gasgeneratoren, wie sie schon heute in Fahrzeugen eingesetzt werden. Durch diese Systeme kann auf die OOP-Problematik bereits besser reagiert werden. Danach wird der Schwerpunkt der Entwicklungen auf variablen oder auch adaptiven Gasgeneratoren liegen. Natürlich stellt ein variabler Gasgenerator nur ein Subsystem eines variablen

Airbagsystems dar. Betrachtet man das Subsystem Gasgenerator, so werden zwei Entwicklungstrends klar dominieren:

- der Zündbus mit verteilter Intelligenz des Airbagsystems,
- der variable Gasgenerator.

Der Zündbus hat dabei direkten Einfluss auf die Entwicklung variabler Gasgeneratoren, da nur über eine bidirektionale Kommunikation mit dem zentralen Steuergerät eine sinnvolle Einbindung des variablen Gasgenerators in ein Airbagsystem sinnvoll ist.

Bei zweistufigen Generatoren können die jeweiligen Zündstufen einzeln, beide gleichzeitig oder beide nacheinander zeitversetzt gezündet werden. Dabei kann die Leistung des Gasgenerators in einem Bereich von 20 %–100 % des einstufigen Generators variiert werden. Die Einstellbarkeit der maximalen Leistung beschränkt sich nicht nur auf die maximale Leistung, sondern betrifft auch den zulässigen Beginn der Druckkurve [BAUER,1997].

Die Kennendruckkurve eines variablen Generators stellt sich als ein Kennfeld dar, dessen Leistungsbereich von den OOP-Bedingungen und der FMVSS 208 umschlossen wird.

In [BAUER,1997] werden folgende Anforderungen an einen variablen Gasgenerator gestellt:

- Der Generator muss über mehrere, unabhängige und einzeln zündbare Gaserzeuger oder über ein steuerbares Ausströmorgan verfügen.
- Der Generator muss mit einer intelligenten Zündbusschnittstelle versehen sein.
- Steuerung, Regelung und Aktuatorik müssen wartungsfrei und mit einer Selbstdiagnoseeinheit ausgestattet sein.
- Nur kurze Schaltzeiten für Regelung und Steuerung, wenn während des Crashes adaptiv geregelt werden soll.

Für die Anforderungen des variablen Generators an ein Airbagsystem lassen sich folgende Punkte nennen:

- Die Stufung der Kennlinienseinstellung ist den Systemanforderungen zu entnehmen.
- Sensorik und Steuergerät müssen eindeutige Vorgaben für die Voreinstellung und Regelung des variablen Generators in Echtzeit machen.

Dazu müssen insbesondere statische (Masse, Größe, Sitzposition, Gurtschlossabfrage) und dynamische Insassendaten (aktuelle Position) ermittelt und weitergegeben werden.

Für die Leistungsvariation eines Gasgenerators bestehen grundsätzlich drei Möglichkeiten:

- Variation der erzeugten Gasmenge  
Bei mehrstufigen Generatoren wird in jeder Stufe eine spezifische Gasmenge erzeugt. Diese können dann gleichzeitig oder zeitversetzt gezündet werden. Bei flüssigen Treibstoffen ist auch eine ungestufte Variation der erzeugten Gasmenge möglich.

- Steuerung des Massenstromes aus dem Generator

Hier wird der Strömungsquerschnitt zwischen Generator und Airbag gesteuert. Dadurch ist der Massenstrom über der Zeit steuerbar. Ein unterschiedliches Aufblasverhalten des Airbags wird hierbei durch die Dynamik des Massenstromes in den Luftsack und durch die Entlüftungsöffnungen bestimmt. Das Problem hierbei ist, dass die Anpassung der Dynamik des Massenstromes sehr komplex ist und nur über die Generatormodulebene möglich ist.

- Öffnen einer Abströmöffnung

Hier wird zusätzlich zur Hauptöffnung des Generators in Richtung Airbag eine Abströmöffnung geöffnet, durch die ein Teil des erzeugten Gases am Airbag vorbei geleitet wird. Es muss darauf geachtet werden, dass die Gase im Fahrzeug unschädlich abströmen können.

Bei den letzten beiden Varianten regelt ein schnelles Ventil den Massenstrom oder variiert die Abströmöffnungen. Dieses Ventil muss einen stufenlos verstellbaren Abströmquerschnitt aufweisen. Es wird mit Daten aus dem Steuergerät (Insassendaten, Crashdaten) und Daten aus dem Generator selbst (Temperatur) voreingestellt. Diese Voreinstellung sollte so spät wie möglich vorgenommen werden. In einer zweiten Entwicklungsstufe wird das Ventil in Echtzeit geregelt. Dazu muss das Ventil eine Ansprechzeit von deutlich weniger als 5 ms aufweisen. Dieses Ventil kann über Piezo- oder Magnetstellglieder realisiert werden.

Die Auslegung adaptiver Rückhaltesysteme erfordert es, optimale Einstellungen für eine Vielzahl von Parametern simultan zu ermitteln und die Ergebnis-

se z. B. in Form von Tabellen elektronisch gespeichert im Steuergerät abzulegen. Dieses Vorgehen ist noch stärker als die Auslegung eines komplexen, nicht adaptiven RHS auf den Einsatz numerischer Verfahren angewiesen. Erst damit wird es möglich, unter den stets gegebenen zeitlichen und materiellen Restriktionen Optima zu identifizieren. Die rasche Weiterentwicklung dieser Verfahren wird es bald ermöglichen, viel stärker als heute die „real-life-performance“ zu optimieren. Der Verordnungsgeber muss ebenso wie Verbraucherschutzorganisationen darauf achten, dass das Ziel, die Anforderungen der Tests zu erfüllen und das Ziel „das reale Unfallgeschehen“ abzubilden, sich nicht zu weit voneinander entfernen. Es scheint daher sinnvoll, über die Nutzung numerischer Verfahren zum Nachweis von „real-life-performance“ gegenüber den Zulassungsstellen systematisch nachzudenken.

### 3.2.4 Adaptive Seitenairbagsysteme

Die beschriebenen Entwicklungsrichtungen auf dem Gebiet der Frontairbagsysteme treffen sinngemäß auch für die Seitenairbagsysteme zu. Vor allem an die Sensorik werden bei einem Seitenaufprall höhere Anforderungen als bei einem Frontalaufprall gestellt. Hier kann eine Pre-Crash-Sensorik zur „virtuellen Vergrößerung“ des Fahrzeugs die entscheidende Größe sein, um wertvolle Zeit zur Aktivierung des Systems zu gewinnen.

#### 3.2.4.1 Wirkungsweise

Neben den bereits beschriebenen Anwendungen zur Auslösung von Seitenaufprallschutzsystemen können auch Dehnungssensoren verwendet werden [ZANDER, 2001].

Dehnmessstreifen messen direkt mechanische Ausdehnungen und Biegungen. Mit ihnen können Schutzsysteme ausgelöst werden, wenn sie an Bauteilen des Fahrzeugs montiert sind, die in einer frühen Phase des Aufpralls deformiert werden.

Eine Ausführungsform sind piezoelektrische Folien (PVDF-Folien). Sie basieren auf dem piezoelektrischen Effekt, der eine Verschiebung von Ladungen innerhalb der Folie als eine Reaktion auf eine Bewegung bewirkt. Die dynamische Biegung wird als Spannung ausgegeben. Dieser Folientyp findet in der Medizin Anwendung.

Eine weitere Ausführungsform sind die Dehnmessstreifen. Sie erreichen die gleichen Auslösezeiten

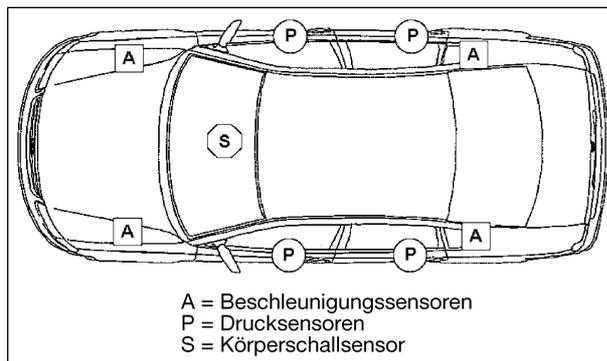
wie Drucksensoren in den Türen. Auch sie sind unanfällig gegenüber Fehlauflösungen. Allerdings benötigen sie kein abgeschlossenes Volumen wie Drucksensoren und sind somit flexibler positionierbar.

Die erreichbaren Auslösezeiten hängen von der Anzahl und dem Einbauort ab. Der Sensor kann nur ein starkes Signal liefern, wenn er direkt im Bereich der steigenden Dehnung angebracht ist. Deshalb müssen möglicherweise mehrere Sensoren verwendet werden, um sicher auszulösen.

Körperschallsensoren stellen eine weitere Möglichkeit zur Auslösung von Sicherheitssystemen dar. Sie sensieren den durch Deformation des Bleches hervorgerufenen Körperschall. Typische Frequenzen dieser Körperschallwellen liegen bei 60 kHz und die Ausbreitungsgeschwindigkeit liegt bei 2.500 m/s. Diese Sensoren nutzen Piezoelemente, um den Körperschall zu messen. Um schnelle Auslösezeiten zu erreichen, ist es allerdings nicht ausreichend, nur einen Sensor in der Zentraleinheit auf dem Tunnel zu platzieren. Vorteile dieses Sensortyps sind die 360°-Sensierung und die Unempfindlichkeit gegenüber Fehlauflösungen bei Fahrwerksstößen.

In Zukunft können auch Pre-Crash-Sensoren dazu beitragen, Seitenkollisionen zu detektieren und Sicherheitseinrichtungen auszulösen. Als Pre-Crash-Sensoren können grundsätzlich Radar- und Lasersensoren dienen, die schon jetzt bei Forschungsarbeiten eingesetzt werden. Diese Sensoren können die Relativgeschwindigkeit und die Bewegungsrichtung eines Hindernisses seitlich des Fahrzeugs bestimmen. Da sie aber keine Aussage über die Masse und die Steifigkeit des herannahenden Objektes machen können, damit also die Unfallschwere nicht bestimmen können, sind sie für die Entscheidung über eine Auslösung des Systems ungeeignet. Die Auslöseentscheidung muss weiterhin durch die herkömmlichen Sensoren geschehen. Kombinierte Systeme können eine Pre-Crash-kontrollierte, minimale Auslöseschwelle beinhalten, die die Auslöseeinheit des Systems auf das drohende Hindernis einstellt. Dies führt dann zu einer schnelleren und besser angepassten Auslösung des Sicherheitssystems.

So könnte eine optimale Auslöseeinheit für ein Seitenaufprallschutzsystem aus der Kombination verschiedener Sensortypen und ihrer Platzierung im Fahrzeug bestehen. Dabei zeigte sich eine Kombination aus Beschleunigungs-(A) und Drucksensoren



**Bild 3.12:** Lage der verschiedenen Sensortypen am Fahrzeug als Kombination für eine Auslöseeinheit für Seitenaufprallschutzsysteme [ZANDER, 2001]

ren (P) für die Auslöseeinheit und einem Körperschallsensor (S) für die Sicherheitsfunktion als die beste Lösung. Diese ist modular gestaltet, sodass noch zusätzliche Rückhaltesysteme integriert werden können [ZANDER, 2001].

Pre-Crash-Sensoren würden nur eingesetzt werden, wenn zukünftige Anforderungen nicht durch dieses hybride System erfüllt werden könnten. Abgesehen davon könnten diese Umweltsensoren für aktive Systeme, z. B. für die Fahrerunterstützung, benutzt werden.

### 3.2.5 Systeme zum Schutz bei Fahrzeugüberschlägen

Ein Fahrzeugüberschlag ist ein Ereignis, das eine Rotation des Fahrzeugs um die Längsachse (Roll-over) oder die Querachse (Pitchover) von mindestens 90° hervorruft und somit zu Verletzungen der Insassen führen kann. Ein Modul zur Sensierung eines Überschlags (RSM – rollover sensing module) ist in der Lage, einen Überschlag zu detektieren oder sogar vorherzusagen. Falls notwendig, können dann entsprechende Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Beispiele für diese einzuleitenden Überschlagssicherheitsmaßnahmen sind die Auslösung der Gurtstraffer, Seitenairbags, Window- bzw. Curtain-Airbags und aufspringende Überrollbügel bei Cabrios [KONG].

Die RSM-Einheit besteht aus einem Trägheitssensor, wie z. B. einem Winkelratensensoren, einem Beschleunigungsmesser oder einem Neigungsmesser, dem Sensierungsalgorithmus und der Eingangs-/Ausgangs-Schnittstelle. Der Sensierungsalgorithmus verarbeitet die Sensordaten und bewertet den dynamischen Fahrzeugzustand bzw. sagt ihn voraus. Bei diesem RSM-System stellt der Winkelratensensor die kritische Komponente dar,

da ihn häufig auftretende Längsbeschleunigungen nicht beeinflussen sollen. Die Eigenfrequenz eines solchen Winkelratensensors sollte außerhalb der beim Fahrzeugbetrieb auftretenden Vibrations-, Erschütterungs- oder Crashpulsfrequenzen (bis zu 4 kHz) liegen.

#### Sensoren

Heutige Überschlagssensierungssysteme basieren auf Neigungsmessern oder Neigungssensoren. Diese gravitationsbasierten Sensoren neigen allerdings zu unakzeptablen Fehlern, wenn sie starken Längsbeschleunigungen ausgesetzt sind. Ein neuer, genauerer Ansatz für die Überschlagssensierung basiert auf Winkelratensensoren (Angular Rate Sensors – ARS). Das Funktionsprinzip dieser Sensoren basiert auf dem Coriolis-Effekt. Damit sind diese Sensoren unempfindlicher gegenüber Längsbeschleunigungen. Anforderungen an diese Winkelratensensoren sind:

- genaue Sensierung auch unter Längsbeschleunigungen,
- unempfindlich gegenüber starken Beschleunigungsspitzen,
- unempfindlich gegenüber unebenen Straßen, Kiesstraßen und extremen Fahrzeugmanövern,
- unempfindlich gegenüber extremen Situationen (z. B. Hammerschläge, Tür zuschlagen).

Die Winkelratensensoren können aus Piezoelementen, Keramik/Metall-Aluminium-Vibrationsstrukturen, piezoelektrischen Kristall-Vibrationsstrukturen und aus Variationen aus mikromaschinellen Strukturen bestehen. Keramiksensoren werden häufig in Navigationssystemen verwendet und müssen, wenn als Überschlagssensor im Fahrzeug modifiziert, mit einer mechanischen Erschütterungs- und Vibrationsdämpfung versehen werden.

Neuste Entwicklungen in der Mikromechanik ermöglichen es, die bekannten Prinzipien robuster, billiger und zuverlässiger zu machen. Dies wird auch zur Anwendung bisher nicht genannter Messprinzipien führen.

#### 3.2.5.1 Wirkungsweise

Einen Weg, einen Fahrzeugüberschlag zu verhindern, stellt das Active Roll Stabilization System (ARS) dar [Auto Technology, 2002]. Dieses System kontrolliert über ein Hydrauliksystem die

Rollbewegungen des Fahrzeugs. Dabei können zwei aktive Stabilisatoren, jeweils einer an der Vorder- bzw. Hinterachse, unabhängig voneinander über schnelle Hydraulikaktuatoren angesprochen werden, um die Rollbewegungen des Fahrzeugaufbaus zu reduzieren. Die notwendige Energie wird über eine Hydraulikpumpe bereitgestellt. Die ARS-Einheit bewertet Daten eines Querbeschleunigungssensors. Parallel dazu werden weitere Signale anderer elektronischer Systeme im Fahrzeug durch das ARS verarbeitet. Außerdem gibt das ARS seinen eigenen Status an diese Systeme weiter, wodurch ein integriertes, komplexes ARS-System entsteht. Dieses beeinflusst dann auch Systeme wie das ESP und kann die Fahrwerkscharakteristik den jeweiligen Fahrsituationen anpassen.

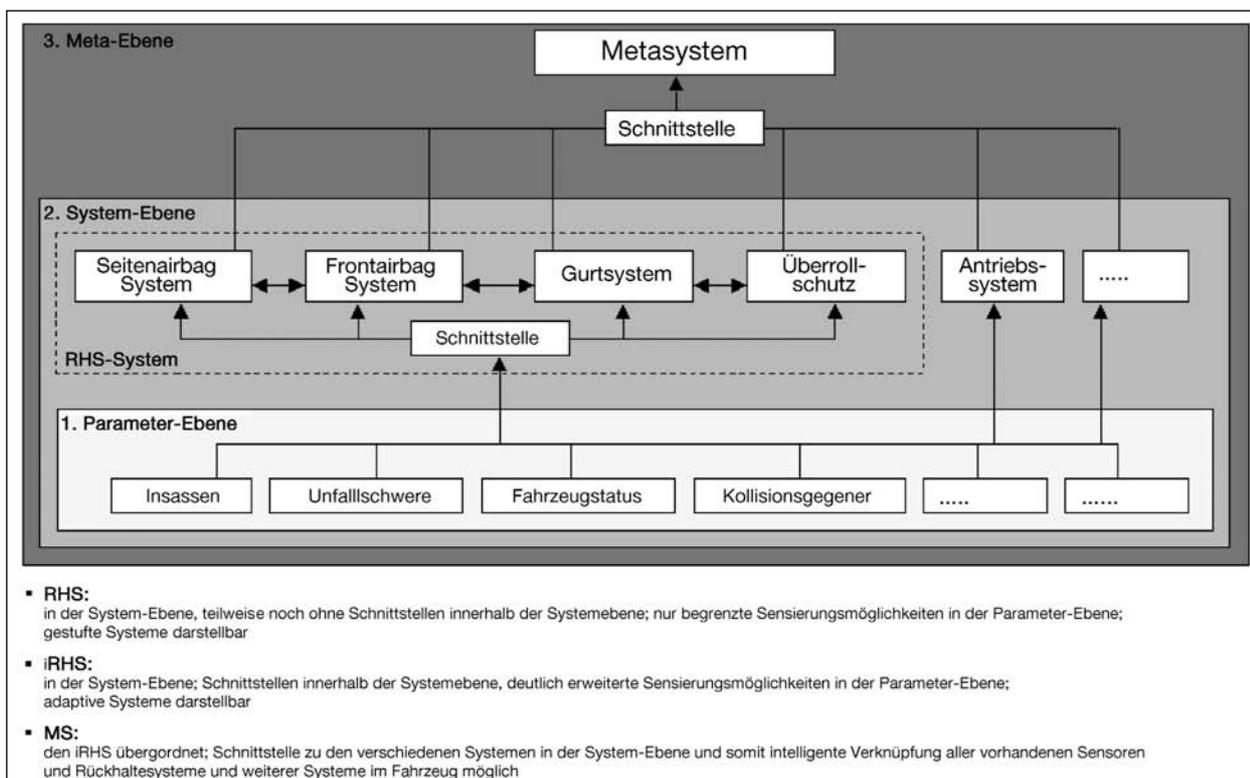
### 3.2.6 Übergeordnete Sicherheitssysteme

Ein Sicherheitssystem, das Informationen intelligenter Rückhaltesysteme mit denen anderer relevanter Fahrzeugsysteme koppelt, kann als übergeordnetes System oder Meta-System bezeichnet werden. Es realisiert ein umfassendes Sicherheitsmanagement im Fahrzeug. In Bild 3.13 ist das Meta-System in einem 3-Ebenen-Modell systematisch dargestellt. Es verknüpft die relevanten Systeme der System-Ebene. Dabei kann es auf mehr In-

formationen aus der Parameter-Ebene zurückgreifen, um so besser angepasste und umfassendere Aktionen auszulösen.

Ein Beispiel für solch einen Ansatz ist das kürzlich vorgestellte Pre-Safe-System von Mercedes Benz. Dieses System nutzt vier verschiedene Subsysteme zur Sensierung. Eine Fahrzustandssensorik informiert über den aktuellen Fahrzustand und vergleicht die Werte mit gespeicherten Optimal- und Grenzwerten. Die Pre-Crash-Sensorik erkennt das Umfeld des Fahrzeugs und untersucht dieses auf mögliche Gefahrenquellen. Hierzu werden Radar und Videosysteme eingesetzt. Die Crash-Sensorik misst wie bei herkömmlichen Rückhaltesystemen den Unfall und ist für die Aktivierung irreversibler Rückhalteeinrichtungen, wie des Airbags, zuständig. Die Innenraumsensorik soll die Insassen und deren Position erfassen, um die Rückhalteeinrichtungen auf den Insassen abgestimmt einzusetzen.

Abgeleitet aus der Zustandsanalyse lassen sich bestimmte Systeme aktivieren, um die Unfallfolgeschwere so gering wie möglich zu halten. Hierzu kann als Erstes der Gurt vor dem Unfall entsprechend gestrafft werden, um den Insassen in eine möglichst günstige Position zu bringen und eine übermäßige Vorverlagerung des Insassen während einer Vollbremsung zu verhindern. Durch den er-



**Bild 3.13:** Möglichkeit der Systematisierung von Sicherheitssystemen im Fahrzeug

weiteren Zeitrahmen kann zur Gurtstraffung ein Motor verwendet werden, wodurch die Straffung reversibel erfolgt. Der Beifahrersitz kann in eine für den Unfall geeignete Position gebracht werden. Hierzu muss kein besonders großer Aufwand betrieben werden, da die Geschwindigkeit, mit der die Einstellungen vorgenommen werden müssen, durchaus auch von den Einstelleinrichtungen wie der elektrischen Sitzverstellung erreicht wird. Zusätzlich können ausfahrbare Schutzpolster durch einfache elektrische Motoren angesteuert werden.

Durch die Erkennung eines Unfalls vor dessen Eintreten ist es ebenfalls möglich, das Fahrzeug selbst entsprechend zu konditionieren. So können ausfahrbare Stoßstangen die Knautschzone verlängern. Durch das Schließen der Fenster und des Schiebedaches kann die Gefahr des Eindringens von Gegenständen und des Hinausschleuderns von Insassen verringert werden. Schaltbare Crashboxen, die sich bei leichten Anstößen wie Dämpfersysteme verhalten und die Energie reversibel aufnehmen, werden bei einem schweren Unfall gesperrt und verhalten sich dann wie herkömmliche Längsträger. Dadurch können sie durch gezielte Verformung mehr Energie aufnehmen [Daimler-Chrysler, 2001].

Ziel der Entwicklung von fortgeschrittenen Sicherheitssystemen ist es, dass die Sensorik und Auswerteeinrichtung zu jeder Zeit die Wahrscheinlichkeit für einen Unfall ermitteln sowie den Unfalltyp bestimmen können. Dies wird es ermöglichen, auch noch weiterführende Systeme anzusteuern. Dazu könnten z. B. gehören:

- Sitze mit aktiven Elementen,
- wegklappbare Pedalarie und Lenkrad,
- Mechanismen zum Fixieren der Extremitäten,
- Abstützung des Kopfes.

### 3.2.7 Allgemeine Einschätzung der Situation

Im Rahmen des BAST-Forschungsprojektes „intelligente Rückhaltesysteme“ sollen mögliche Verbesserungen der passiven Sicherheit durch intelligente Rückhaltesysteme sowie die Auswirkungen auf die gesetzlichen Regelungen dargestellt werden. Um ein möglichst umfassendes Bild von den Problemen bei der Entwicklung und Einführung intelligenter Rückhaltesysteme zu erhalten, wurden Experten auf dem Gebiet der Fahrzeugsicherheit befragt. Nur durch die Einbindung dieses Wissens zu

dem Thema können sinnvolle, weil für die praktische Umsetzung bedeutsame, Empfehlungen gegeben werden. Es werden Trends bei der Entwicklung intelligenter Rückhaltesysteme aufgezeigt.

Abschnitt 3.2.7 gibt die gesamte Bandbreite aller Antworten der befragten Experten wieder. Im Rahmen dieses Projektes wurden 7 Experten befragt. Dabei gehören 5 Experten der Wirtschaft, 1 Experte einer Organisation und 1 Experte der Wissenschaft an.

Die folgenden Angaben stellen nicht die Meinung des Autors dar. Es handelt sich vielmehr um eine unbewertete und nicht kommentierte Zusammenfassung der Statements der befragten Experten. [Expertenbefragung, 2002].

#### Allgemein

Es kann die Meinung vertreten werden, dass intelligente Rückhaltesysteme und Elektronik nicht zwangsläufig zusammenhängen. Durch konstruktive Parameter in Rückhaltesystemen sind Anpassungen an verschiedene Einflussparameter, wie Größe, Konfiguration und Crasheschwere, möglich.

So können die Anforderungen der FMVSS 208 durchaus ohne zusätzliche Elektronik erfüllt werden. Zusätzlich zur speziellen konstruktiven Auslegung des Systems bedarf es eines zusätzlichen Crashsensors, der die 32-km/h-Schwelle für das „Low Risk Deployment“ sensieren kann. Dabei müssen alle Stufen des Airbags gezündet werden, die bei 32 km/h gegen die starre Barriere aktiviert werden.

Bei der Umsetzung von intelligenten RHS stellt heutzutage die Elektronik das Kostenproblem dar. Ihre Einführung lohnt sich betriebswirtschaftlich nur in Zusammenhang mit einem Zusatznutzen eines anderen Systems. Ein Beispiel für einen Zusatznutzen durch die Einführung eines Systems stellt das 42-V-Bordnetz dar. So benötigt der elektrische Gurtstraffer, der bei einer Pre-Crash-Erkennung den Insassen vor dem eigentlichen Zusammenstoß zurück in den Sitz zieht, höhere Ströme, als sie das heutige Bordnetzsystem liefern kann. So wirkt sich die Einführung des 42-V-Bordnetzes positiv auf eine Sicherheitsanwendung aus. Dies ist also auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht lohnend.

Allgemein kann man feststellen, dass die Elektronik, und hier im Speziellen die Sensorik, momentan

der Hemmschuh bei der Einführung intelligenter Systeme ist. Dies gilt sowohl für die Kostenaspekte als auch für technologische Aspekte, bei denen die Elektronik noch nicht den Erwartungen entsprechen kann.

Dabei sollte das elektronische System eine dem mechanischen System vergleichbare Ausfallsicherheit aufweisen. Diese kann von den bisherigen Dauerfunktionstests der mechanischen Komponenten abgeleitet werden. Die gesetzlichen Vorgaben sollten Mindestanforderungen bleiben. Der Fahrzeughersteller muss aus Produktsicherheitsgründen eine höhere Ausfallsicherheit vorweisen.

Beispiele für die nächsten Entwicklungsschritte hin zu einem adaptiven Rückhaltesystem können sein:

- Insassenerkennung nach Größe, Gewicht und Position in Echtzeit und dadurch Anpassung der RHS-Systeme.
- Pre-Crash-Sensorik zur Vorkonditionierung verschiedener RHS (z. B. Pre-Safe).
- Pre-Crash-Sensorik zur Unfallvermeidung, dabei Eingriff in Lenkung und Bremsen. Es besteht allerdings das Problem der Produkthaftung.

Betrachtet man die Rangfolge hinsichtlich der Seriennähe intelligenter Systeme, so ergibt sich folgendes Bild:

#### 1. Kurzfristig

- Umschaltung des Gurtkraftniveaus (schaltbare Gurtkraftbegrenzer),
- mehrstufige Frontairbags,
- elektromotorische Gurtstraffer,
- Auslösung von Window- bzw. Curtainairbag im schrägen Frontalcrash,
- Vorkonditionierung der RHS (Pre-Safe-System).

#### 2. Mittelfristig

- Einbeziehung der Besetzung des Fahrzeugs, des Gewicht der Insassen.

#### 3. Langfristig

- Einbeziehung der Insassenposition,
- personalisierte RHS,
- Systeme zur Unfallvermeidung.

Um diese Systeme umsetzen zu können, sollten folgende Daten bereitgestellt werden:

- Fahrzeugdaten, die den Fahrzustand und damit den Gefahrenzustand des Fahrzeugs beschreiben. Hier sollten die bereits im Fahrzeug verbauten Sensoren noch intensiver in die Sicherheitsanwendungen integriert werden.
- Erfassung des fahrdynamischen Zustandes auf der Basis eines Echtzeit-Modells mit der Fähigkeit, unfallträchtige Situationen zu erkennen und zu bewerten.
- Umgebungsdaten.
- Erfassung der unmittelbaren Fahrzeugumgebung bis zu einer „zeitlichen Umgebung“ von ca. 100 ms (Kollisionsgeschw., -richtung, -objekt).
- Daten zur Insassenbeschreibung, wie Gewicht, Position, Geschlecht.
- Persönliche Daten des Insassen wie Alter, Gesundheitszustand.
- Status des Zustandes der RHS, auch in Kombination mit Sitz, Fenster, Schiebedach, Lenkrad, Pedalarie, etc.
- Daten zur Unfallschwere über ausgelagerte Beschleunigungsaufnehmer.
- Relativgeschwindigkeit zwischen Kollisionsgegnern.
- Angaben über das Kollisionsobjekt.
- Erfassung von Art, Schwere und Ort des Unfalls als Basis für Rettungsmaßnahmen.

Dabei kann man den Einfluss der Insassenparameter auf eine angepasste Rückhaltung wie folgt angeben. Dabei nimmt der Einfluss absteigend ab.

#### 1. Gewicht

- Hier gestaltet sich die Sensierung eines hohen Gewichtes schwieriger als die eines niedrigen. Prinzipiell ist eine robuste Erfassung möglich.

#### 2. Größe

- Hier gestaltet sich die Sensierung eines großen Insassen weniger schwierig als die eines kleinen. Prinzipiell ist eine robuste Erfassung möglich.

#### 3. Alter und Geschlecht

- Die zuverlässige Sensierung des Alters erscheint schwierig. Am ehesten sind Zusatzfunktionen durch personalisierbare Zugangssysteme vorstellbar.

## Sensoren

Für die Entwicklung adaptiver RHS werden verschiedene Sensorarten vorgesehen. Dabei konzentriert sich die Entwicklung auf folgende Systeme:

1. Fahrzeuginsassen
  - Videotechnik für Innenraumüberwachung mit Bilderfassungs- und -bewertungssystemen,
  - Wägesysteme für Insassenmasse,
  - kapazitive Sensoren,
  - Ultraschall-Sensoren,
  - Infrarot-Sensoren.
2. Pre-Crash-Systeme
  - Nahbereichs-Radar-Sensorik,
  - Videosysteme,
  - 3D-Kamera.
3. Sensorsysteme zur Bestimmung der Unfallschwere durch die Bewertung lokaler mechanischer Beanspruchung.

Dabei wird der Entwicklungsstand der zur Adaption relevanten Sensoren hinsichtlich der Serieneinführung wie folgt eingeschätzt: Sensoren zur Erfassung des Insassengewichtes könnten 2003 ihre Seriennähe erreichen. Die videobasierte Sensierung der Insassenposition wird wahrscheinlich nicht vor 2006 die Serienreife erreichen. Gleiches gilt für die Ermittlung der Relativgeschwindigkeit der Kollisionskontrahenten mittels Radar. Die Sensierung der Unfallschwere, die teilweise schon umgesetzt wird, bedarf Verbesserungen, um ihr Potenzial zu erhöhen.

Bei der Einführung von intelligenten RHS mit entsprechender Sensorik ergibt sich das Problem der Abprüfung ihrer Zuverlässigkeit und Funktion. Es ist denkbar, die Systeme zeitnah durch Signaleinstellung und Simulation, wie z. B. heute schon bei Airbagsystemen, zeitgerecht beim Schlittentest zu aktivieren. Außerdem sind Komponententests und weitere Versuche ähnlich den Einzeltests nach FMVSS 208 denkbar und notwendig.

Da Systeme wie das Pre-Safe-System Add-on-Systeme darstellen, sollten sie erst mit viel Nachlauf in entsprechende Vorschriften aufgenommen werden. Beim Standard-Crash bedarf es nicht der Aktivierung dieser Systeme. Solange solche Systeme als Add-on-Systeme entwickelt werden, beste-

hen also keine Zulassungsprobleme. Diese würden dann entstehen, wenn die Rückhaltesysteme nur dann „scharf“ geschaltet werden, wenn die Pre-Crash-Sensorik eine Gefahr erkannt hat und keine Rückfallebene vorhanden ist.

## Aktuatoren

Für die adaptive Gestaltung von Aktuatoren werden u. a. folgende Möglichkeiten in Betracht gezogen: Eine Möglichkeit ist die Regelung des Aufblasvorgangs über den Gasflow des Airbaggenerators. Eine andere ist die Einführung verschiedener Gurtkraftbegrenzungsebenen in Abhängigkeit der Insassen. Die Regelung der Adaptivität erscheint vor allem bei den Frontairbags und den Gurtkraftbegrenzern als sinnvoll.

Daher werden in näherer Zukunft die Ziele auf den folgenden Gebieten liegen:

- OOP-taugliche 2-stufige Frontairbags,
- Vermeidung bzw. Reduzierung der Gurtlose durch den elektromotorischen Gurtstraffer,
- Einführung optimierter Gurtkraftniveaus.

Probleme bei der adaptiven Gestaltung der Aktuatoren sind auf den Gebieten der Zulassung, der Produkthaftung und der Technologie zu sehen. In Europa wird es hauptsächlich ein Zulassungsproblem geben, wohingegen in den USA die Produkthaftung das zentrale Problem darstellen wird. Die Technologieproblematik tritt dabei völlig in den Hintergrund.

Andere Stimmen sehen die Technologieproblematik im Vordergrund und die Zulassungsproblematik als weniger kritisch. Auch der Nachweis der Feldtauglichkeit der Systeme mittels der Unfallstatistik stellt aus Expertensicht ein Problem dar.

Für die Umsetzung der konkreten Maßnahmen werden verschiedene Zeithorizonte angegeben. Der zweistufige Frontairbag ist bereits Ende 2003 in der Lage, die FMVSS 208 hinsichtlich OOP zu erfüllen. Die adaptive Generatorregelung wird noch ca. 5 Jahre bis zur Serienreife benötigen. Eine Gurtkraftbegrenzung in Abhängigkeit von Insassenparametern dagegen wird nach Expertenmeinung noch 5–10 Jahre zur Serienreife benötigen.

## Pre-Crash

Vorbereitende Maßnahmen in der Pre-Crash-Phase haben folgenden Nutzen:

- optimale Positionierung des Insassen im Fahrzeug, was eine Erhöhung der Wirksamkeit des RHS zur Folge hat,
- Reduzierung der Gurtlose,
- Reduzierung der Relativgeschwindigkeit zwischen den Kollisionsgegnern,
- optimale Ausnutzung des vorhandenen Überlebensraumes für den Insassen.

Zur Umsetzung der Pre-Crash-Erkennung sind folgende Parameter relevant:

- Relativgeschwindigkeit,
- mögliche Aufprallbereiche am Fahrzeug,
- Größe/Masse des Kollisionsgegners, zumindest eine grobe Klassifikation,
- Abstand zum Kollisionsobjekt,
- Genauigkeit der Erkennung durch das Messsystem,
- fahrdynamische Zustandserkennung (z. B. Schleudervorgang).

Dabei haben infrastrukturelle Rahmenbedingungen zur Verbesserung der Erkennung keine große Bedeutung, da ihr Wirkungsbereich begrenzt ist.

Der Nachweis der Funktion der Pre-Crash-Systeme durch die Integration in einen ECE- oder EuroNCAP-Test erscheint dabei möglich. Andererseits müssen auch spezielle Testbedingungen definiert werden, mit denen das Gesamtfahrzeug getestet wird. Es werden also fahrdynamische Tests notwendig sein. Dabei müssen Auslöseschwellen definiert werden, die die unbedingte Auslösung von der Nichtauslösung trennen. Allerdings sollte eine Testprozedur erst ausgearbeitet werden, wenn diese Systeme zum Stand der Technik werden.

#### Post-Crash

Größere Beachtung sollten auch Maßnahmen in der Post-Crash-Phase geschenkt werden. So sind Maßnahmen zur Sicherstellung eindeutiger Situationen für die Retter bei der Insassenbergung erforderlich, um eine optimale Bergung und Versorgung der Insassen sicherzustellen. Es muss von außen für die Retter leicht sichtbar sein, wie das Fahrzeug ausgerüstet ist. So sollten deutlich erkennbar Angaben über die Sicherheitsausstattung und deren Status am Fahrzeug angebracht sein

(Anzahl der Airbags, Status der Airbags, zentrale Abschaltung etc.) Entsprechende Angaben fehlen an heutigen Fahrzeugen. Die Einführung solcher Maßnahmen ist über die Gesetzgebung denkbar, da wahrscheinlich kein Hersteller die zusätzlichen Kosten übernehmen würde. Ein zusätzlicher Anreiz für die Einführung der entsprechenden Post-Crash-Maßnahmen könnte eine Aufwertung der Ergebnisse des entsprechenden Fahrzeugs in Verbrauchertests (z. B. EuroNCAP) sein.

## 4 Reales Unfallgeschehen und mögliche Schutzpotenziale durch iRHS

### Unfallursachen

Es hat sich gezeigt, dass der Fahrnfall auf deutschen Straßen einen sehr häufigen Unfalltyp darstellt. Hierzu zählen Unfälle, bei denen der Fahrer die Kontrolle über sein eigenes Fahrzeug verloren hat, ohne dass ein zweites Fahrzeug beteiligt war. Grund hierfür ist sehr oft unangepasste Geschwindigkeit. Dies ergibt sich auch aus der Analyse der Unfallursachen. So ist unangepasste Geschwindigkeit mit 20,6 % die häufigste Unfallursache.

Oft werden Fahrer aber mit Fahrsituationen konfrontiert, die sie überfordern, da sie kein Erfahrungswissen für diese Fahrsituation erlernen konnten. So könnte es sinnvoll sein, typische kritische Ausweichmanöver, Manöver bei widrigen Witterungsverhältnissen oder auch einfache Manöver zur Stabilisierung des Fahrzeugs einen Bestandteil der Fahrprüfung werden zu lassen. Als Vorbild könnten die Sicherheitsfahrbungen der Motorradfahrprüfung dienen. Es reicht bei weitem nicht aus, ein Fahrertraining nur auf freiwilliger Basis durch Fahrzeughersteller oder andere Organisationen anzubieten. So wird selbst die Gefahrenbremsung nicht von jedem Autofahrer beherrscht! Ab 1. November 2002 kann die Vollbremsung Prüfungsstoff eines Fahrschülers sein. Beim so genannten Bremsschlag muss der Fahrschüler das Fahrzeug schnellstens von 40 km/h bis zum Stillstand verzögern. Das könnte Vorbild sein für die Integration weiterer nicht alltäglicher, und damit kritischer, Fahrsituationen in die Fahrprüfung. Zu diesem Zweck könnte ein Fahrsimulator eingesetzt werden, der realitätsgetreu und reproduzierbar entsprechende Situationen ohne Verletzungsgefahr simulieren kann.

Unfälle im Längsverkehr repräsentieren mit 33,1 % den häufigsten Unfalltyp auf deutschen Straßen. Es wird vor allem deutlich, dass es sich hierbei zu 46 % um Auffahrunfälle handelt, bei denen auf ein Stauende, ein vorausfahrendes oder wartepflichtiges Fahrzeug aufgefahren wird. So kann man folgern, dass der Fahrer vor einer gefährlichen Situation in seiner unmittelbaren Umgebung nicht ausreichend gewarnt wird. Hier kann eine verbesserte Bremslichttechnik Abhilfe schaffen. Heutige Bremslichter zeigen nur an, dass das Bremspedal betätigt wird. Es gibt dem Hintermann keine Information darüber, wie stark gebremst wird. Diese fehlende Information kostet den Nachfolgeverkehr entscheidende Zeit, entsprechend auf die Situation zu reagieren. Mittlerweile stehen Systeme zur Verfügung, die Verzögerung, Geschwindigkeit, Geschwindigkeitsdifferenz sowie Informationen anderer Sensoren im Fahrzeug nutzen, um ihr optisches Signal auszugeben. Hierbei werden unterschiedliche Warnstrategien verfolgt. BMW favorisiert ein System, bei dem Geschwindigkeitsreduzierung und Informationen des ABS, des Abstandsradars und der Crash-Sensorik die Größe des leuchtenden Stopplichts bestimmen. DaimlerChrysler dagegen setzt auf ein mit 7 Hz pulsierendes Stopplicht. So kann laut DC die Reaktionszeit um 0,3 s verkürzt werden. Die Systeme der französischen Hersteller dagegen schalten bei starker Bremswirkung die Warnblinker dazu. Ein anderes System lässt bei zunehmender Gefahr die Breite eines leuchtenden Diodenbandes ansteigen. Steigt die Gefahr weiter, blinkt es mit steigender Frequenz und warnt auch noch nach dem Anhalten. All diese Systeme verbessern den heutigen Standard. Natürlich müssen die Warnstrategien vereinheitlicht werden, die erforderliche Sensorik allerdings befindet sich bereits jetzt in den Fahrzeugen. Voraussetzung bleibt allerdings eine Gesetzesänderung auf europäischer Ebene, die es erlaubt, gefahrenabhängige Bremslichter einzuführen [IPPEN, 2002]. Ideen dieser Art sind schon seit Jahren vorgeschlagen worden. Leider gelang es trotz detaillierter Nachweise über die Schutzfunktion [FENK, SCHINDLER, 1994] nicht, solche Systeme zulassungsfähig zu machen.

Viele Unfälle entstehen unter Missachtung der Vorfahrt (22,5 %) und beim Abbiegen (16,2 %). Rein fahrzeugseitige technische Maßnahmen können nach heutigem Stand solche Unfälle kaum wesentlich beeinflussen. Längerfristig wären Systeme denkbar, die die Informationsdefizite, die solchen Unfällen meistens zugrunde liegen, durch Ad-hoc-

Netzwerke zwischen den betroffenen Fahrzeugen ausgleichen. Hierzu sind noch grundlegende Untersuchungen sowohl zur Art der erforderlichen Daten der Mensch-Maschine-Schnittstelle als auch zur Technik solcher Netzwerke erforderlich. Kurzfristig könnte die Einführung von Tagfahrlicht einen Beitrag leisten, über dessen Größe aber noch Unklarheit besteht. Grundsätzlich wären hier – ähnlich dem Bremslicht – auch Systeme denkbar, die die aktuelle Geschwindigkeit signalisieren. Neben solchen fahrzeugseitigen Maßnahmen können bauliche und verkehrsorganisatorische Maßnahmen kritische Punkte im Einzelfall entschärfen.

Zukünftige technische Systeme werden in der Lage sein, drohende Kollisionen zu erkennen und sie gegebenenfalls durch aktive Maßnahmen zu verhindern. Dabei können „-By-wire“-Technologien in Zukunft sehr nützliche Dienste leisten. Aktive Lenkungen und aktive Bremsen erlauben künftig automatische Eingriffe in die Längs- und Querdynamik. Theoretisch wäre es auch denkbar, in absolut kritischen Situationen Bremsysteme einzusetzen, die nicht der Begrenzung des Kraftschlusses Reifen – Fahrbahn unterliegen.

Dass die falsche Beladung einen wichtigen Punkt bei der Beeinflussung der passiven Sicherheit darstellt, wird auch im GIDAS-Datenmaterial deutlich. Hier rangiert diese Ursache mit 10,1 % an dritter Stelle aller Unfallursachen. Unter diesem Punkt werden Überladung, Überbesetzung und unzureichend gesicherte Ladung zusammengefasst. 9,8 % aller getöteten Insassen sind auf diesen Umstand zurückzuführen. Hier könnten geeignete Möglichkeiten zur Ladungssicherung bei der konstruktiven Auslegung der Fahrzeuge Abhilfe schaffen. Um einer Überladung des Fahrzeugs vorzubeugen, könnte dem Fahrer eine Information über den Beladungsstatus des Fahrzeugs zur Verfügung gestellt werden. Möglicherweise kann auch die falsche Beladung von Dachgepäckträgern unfallsächlich sein. Hier ist vor allem auf die korrekte Befestigung der Trägersysteme zu achten. Des Weiteren sollten solche Systeme dann auf ihre Crashstabilität (Front, Seite) überprüft werden.

Anhand der Unfallursachen lassen sich weitere Handlungsfelder ablesen. So sollte der mangelnden Verkehrstüchtigkeit des Fahrzeugführers mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden. Sie ist für 19,7 % aller Getöteten verantwortlich, obwohl sie nur für 5,3 % der Unfälle Ursache ist. Dies könnte Maßnahmen am Fahrzeug rechtfertigen, die bei

festgestellter Fahruntüchtigkeit ein Starten des Fahrzeugs verhindern.

#### Gurtanlegequote

Aufgrund der in [LANGWIEDER, 1998] ermittelten schlechten Gurtanlegequote besonders bei schweren und tödlichen Unfällen wäre zu empfehlen, dass intelligente „Gurterinnerer“ das Anlegen von Sicherheitsgurten überprüfen, auch während der Fahrt. Dies kann durch akustische oder optische Signale mit ansteigender Intensität geschehen. Auch der Angurtzustand der Rücksitzinsassen sollte ständig überprüft werden, da nur 60 % der Rücksitzpassagiere den Gurt anlegen. Durch die Einführung von Sitzbelegungserkennungen auf den Frontsitzen für das adaptive Auslösen von Airbags sollte diese Möglichkeit auch für das ständige Überprüfen des Gurtzustandes zumindest auf den Vordersitzen genutzt werden. Eine ähnliche Lösung für die Rücksitzinsassen wäre wünschenswert.

Ein entscheidender Punkt ist die Akzeptanz der Rückhaltesysteme bei den Insassen. Hier verdeutlicht die aus dem GIDAS-Material ermittelte Gurtanlegequote nochmals, dass noch ein beträchtliches Potenzial zur Minimierung der Verletzungsfolgeschwere besteht. Möglicherweise sind die niedrigen Gurtanlegequoten darauf zurückzuführen, dass den Fahrzeuginsassen nicht ausreichend verdeutlicht wird, wie effektiv der Gurt schützt (vgl. Bild 2.48), und dass andere Systeme (Airbag) ohne Gurt nur eine minimale Schutzwirkung erzielen können. Hier sollte in Zukunft mehr Arbeit geleistet werden, um die Insassen auf einen nicht angelegten Gurt hinzuweisen. Dies könnte auch durch Einführung von technischen Maßnahmen in den Fahrzeugen geschehen (seat belt reminder).

Besonders für die Rücksitzinsassen zeigt sich die Effektivität des Gurtes deutlich. So ist die Wahrscheinlichkeit, auf den Rücksitzen unangegurtet schwer verletzt zu werden, ca. 2,5 Mal höher als angegurtet. Für die getöteten Insassen auf der Rückbank liegt dieser Faktor bei ca. 2. Sehr häufige Verletzungen der Rücksitzinsassen betreffen den Kopf, den Hals und den Thorax. Um dem entgegenzuwirken sollten Fahrzeuge mit energieabsorbierenden technischen Maßnahmen ausgestattet sein (z. B. Airbag in der Rückenlehne der Vordersitze), die den Oberkörper schützen helfen. Bedenkt man, dass 10,8 % der Thoraxverletzungen aller Insassen auf das Gurtband zurückzuführen

sind, so ist auch ein aufblasbares Gurtsystem (vgl. Kap. 3.2.2, ITTR) eine mögliche Lösung. Allerdings können die hier gemachten Zahlenangaben und Lösungsmöglichkeiten nur Richtungen aufzeigen, die noch einer detaillierten Untersuchung bedürfen.

#### Pre-Crash-Systeme

Eine große Bedeutung wird den Pre-Crash-Sensoren in den verschiedensten Applikationen zukommen (vgl. Kap. 3.2.1). Die Unfallsituation wird unter anderem durch den Kollisionskontrahenten, den Überdeckungsgrad, die Differenzgeschwindigkeit und die Anstoßstelle charakterisiert.

Es konnte festgestellt werden, dass mit 67 % der Pkw der häufigste Kollisionspartner bei Primärkollisionen ist. Allerdings nehmen das Objekt (16,6 %) und das Nfz (11,4 %) einen bedeutenden Anteil ein. Der Kollisionspartner bestimmt die Unfallfolgeschwere mit, sodass Systeme, die sich auf den Kollisionskontrahenten einstellen können, zur Reduktion der Verletzungsfolgeschwere beitragen. Dies kann durch Pre-Crash-Sensoren geschehen, die in der Lage sind, Objekte zu kategorisieren und die RHS angepasst auszulösen. Des Weiteren kann der Überdeckungsgrad ein wichtiger Parameter bei den zu treffenden Rückhalteentscheidungen sein. Es zeigt sich, dass für die verschiedenen Aufprallarten unterschiedliche Überdeckungsmuster auftreten. In einem ersten Schritt wäre es entscheidend zu detektieren, ob es sich um eine Kollision mit Teilüberdeckung oder voller Überdeckung handelt. Dementsprechend können die RHS angepasst aktiviert werden.

Pre-Crash-Systeme werden in Zukunft auch in der Lage sein, den Anprallort festzustellen. Hier besteht großes Potenzial darin, schon vor dem eigentlichen Aufprall zwischen Seiten- und Frontalkollision zu unterscheiden. Dadurch kann wertvolle Zeit gewonnen werden, die zur angepassten Auslösung der RHS benötigt wird.

#### Adaptive RHS

Im GIDAS-Datenmaterial ließen sich folgende Einflüsse herausarbeiten:

Bezogen auf die Körpergröße konnte festgestellt werden, dass sitzplatzübergreifend 92,7 % der Insassen zwischen 1,50 m und 1,90 m groß sind. Nur 2,2 % sind größer als 1,90 m und 5,1 % sind kleiner als 1,50 m. Man kann feststellen, dass Men-

schen über 1,76 m kaum noch die Rücksitze benutzen. Auffällig ist auch, dass 73,9 % der Beifahrer eine Größe zwischen 1,50 m und 1,75 m aufweisen. Aus den Verletzungsverteilungen in den verschiedenen Größenklassen lassen sich direkt keine Risikogruppen ableiten. Es erscheint vor dem Hintergrund nicht zwingend notwendig, RHS in Abhängigkeit der Körpergröße wirken zu lassen. Eine Ausnahme bilden die Kinder mit einer Größe unter 1 m. Sie weisen ein mehr als dreifaches Risiko für tödliche Verletzungen im Vergleich zu den anderen Größenklassen auf. Hier zeigt sich das Problem des Transports von Kindern ohne entsprechende Kinderrückhaltesysteme.

Für das Gewicht als möglichen Parameter für adaptive RHS lässt sich sagen, dass 81 % aller Insassen zwischen 56 kg und 85 kg wiegen. Dominieren auf den vorderen Sitzplätzen die Insassengewichte zwischen 56 kg und 85 kg, so trifft dies für die Rücksitze nicht zu. Hier ergibt sich ein deutlich differenziertes Bild, wobei 47 % aller Rücksitzeinsassen unter 55 kg wiegen.

Auf den Vordersitzen kann man eine homogene Verteilung der Häufigkeit der Gewichtsklassen feststellen. Allerdings dominiert bei den tödlichen Verletzungen die Klasse der 56 kg bis 70 kg schweren Insassen mit 41,7 %. Betrachtet man aber das Risiko für schwer verletzte und getötete Insassen innerhalb der Gewichtsklassen, so zeigt sich hier keine Risikogruppe. Vor diesem Hintergrund ist die Notwendigkeit nicht begründet, der Adaptivität der RHS das Gewicht zugrunde zu legen.

Für das Geschlecht des Insassen als Parameter eines adaptiven RHS zeigt sich, dass sowohl Männer als auch Frauen in etwa das gleiche Risiko für leichte, schwere und tödliche Verletzungen aufweisen. Allerdings beträgt die Wahrscheinlichkeit für Frauen, unverletzt zu bleiben, nur die Hälfte von der der Männer. Ungeachtet dessen ist auch der Parameter des Geschlechts, aufgrund der durchgeführten Analyse, nicht geeignet, RHS in ihrer Wirkung zu steuern.

Eine generelle Zunahme der Verletzungsschwere bei zunehmendem Alter lässt sich nicht nachweisen. Die 45–54-Jährigen weisen das geringste Verletzungsrisiko auf (vgl. Kap. 2.3.3). Bezogen auf diese Gruppe steigt das Risiko für schwere Verletzungen innerhalb der 64–98-jährigen Insassen auf das 3,7fache. Auch für die 18–24-Jährigen ist ein erhöhtes Risiko feststellbar (2,7fache der 45–54-Jährigen). Dies rechtfertigt nicht zwingend die Ein-

führung von Systemen, die eine generelle altersabhängige Schutzwirkung erzeugen. Das erhöhte Risiko bei den über 64-jährigen Insassen könnte aber für eine Anpassung der RHS in diesen Fällen sprechen. Dafür sprechen auch Hinweise in [LANGWIEDER, 1998], die eine altersabhängige Entfaltung der Schutzwirkung von RHS stützen.

Auch wenn im GIDAS-Datenmaterial keine eindeutigen Hinweise auf die Notwendigkeit der Einbeziehung der eben beschriebenen Insassenparameter in die Schutzwirkung der RHS gefunden werden konnten, ist es schon aus energetischen und geometrischen Überlegungen ableitbar und durch experimentelle Untersuchungen von Einzelfällen nachweisbar, dass adaptive RHS positive Auswirkungen auf die Rückhaltung von Insassen unterschiedlicher Größe und Masse haben werden. [LANGWIEDER, 1998; GRANDALL, 1997]

#### Verletzungsmuster

Über alle Sitzplätze hinweg fällt im GIDAS-Datenmaterial auf, dass insgesamt eine schlechtere Situation für Hals, Kopf und Thorax bezüglich der Verletzungshäufigkeit im Vergleich zu den anderen Körperteilen vorliegt. Deutlich wird auch die mit jeweils über 20 % hohe Verletzungshäufigkeit der unteren Extremitäten.

Betrachtet man speziell die AIS 3+ Verletzungen, so ist festzustellen, dass die größte Wahrscheinlichkeit für solche Verletzungen sitzplatzübergreifend am Kopf und am Thorax besteht. Vor allem auf den vorderen Sitzplätzen werden die unteren Extremitäten häufig schwer verletzt. Über alle Körperteile und alle Sitzplätze hinweg liegt am Becken das geringste Risiko für schwere Verletzungen vor.

Das lässt den Schluss zu, dass der Kopf inkl. Hals und der Thorax in den Mittelpunkt der Anstrengungen innerhalb der intelligenten RHS rücken sollten. Im Bereich des Thorax sollten auch alternative Gurtsysteme (ITTR) in die weiteren Überlegungen einbezogen werden. Weiterhin bedarf es in Zukunft einer noch besseren Abstimmung zwischen Gurtsystem und Airbag, um Verletzungen im Kopf-, Hals- und Thoraxbereich zu reduzieren. Hier zeigte sich, dass es relativ häufig zu Anstößen des Kopfes mit der Frontscheibe und dem Lenkrad kommt. Eine von den Intrusionen der Spritzwand noch besser entkoppelte Lenksäule, die zusätzlich noch energieabsorbierend wirkt, könnte einen eventuellen Aufprall des Kopfes am Lenkrad verhindern.

Außerdem wird dadurch dem Fahrerairbag eine noch bessere Wirkmöglichkeit gegeben.

Auch im Bereich des Halses kommt es häufig zu einem Kontakt, der verletzungsinduzierend sein kann. Allerdings kann dies mit den vorliegenden Daten nicht näher beschrieben werden.

Dem Gurtband können häufig Thoraxverletzungen zugeordnet werden, sodass sich vor allem hier auch aufblasbare Gurtsysteme und Gurtkraftbegrenzer zur Verletzungsreduktion anbieten würden.

Wie auch schon in [LANGWIEDER, 1998] festgestellt wurde, bildet der Schutz der unteren Extremitäten einen weiteren Schwerpunkt für zukünftige RHS. Die Verletzungen der Beine wurden in der Vergangenheit nicht genügend beachtet. Das liegt u. a. darin begründet, dass die Verletzungen der unteren Extremitäten eine geringe Mortalitätsrate besitzen und damit in einer AIS-Klassifizierung als nicht lebensbedrohlich codiert werden. Allerdings bergen sie überproportional hohe Verletzungsfolgekosten, was Grund genug ist, hier tätig zu werden. Dazu kommt, dass selbst bei den schweren Verletzungen die unteren Extremitäten nach Kopf und Thorax in den Mittelpunkt rücken. Zu 6,43 % sind die Verletzungen der Beine auf einen Kontakt mit der Armaturentafel zurückzuführen.

Hier können eine energieabsorbierende Gestaltung des Instrumententrägers oder auch Airbags im Kniebereich Abhilfe schaffen. Allerdings besteht die größere Gefahr für die unteren Extremitäten in den Intrusionen im Fußraum und der eindringenden Pedalarie. Systeme, die die Pedalarie von den Intrusionen der Spritzwand entkoppeln sind nur ein erster Schritt zur Lösung. Es bedarf neuer und entscheidender Änderungen, um Verletzungen der Beine zu reduzieren. Der Fußraum muss gestaltfest ausgelegt sein, damit er ähnlich dem Überlebensraum für den Oberkörper des Insassen auch die Beine vor Intrusionen schützt. Solange die Pedalarie noch massiv ausgeführt wird und eine mechanische Verbindung zu den Aktuatoren darstellt, sollten die Pedale aus dem Fußraum gezogen werden, um das Verletzungspotenzial von Fuß, Sprunggelenk etc. zu minimieren. Langfristig werden „X-by-wire“-Technologien und neue Bedienelemente im Fußbereich Abhilfe schaffen.

Um die Verletzungssituation von Kopf, Hals und Thorax deutlich zu verbessern, bedarf es der konsequenten Einführung von Gurtraffern, Gurtkraftbegrenzern und Airbagsystemen. Die in dem analy-

sierten Datenbestand geringe Ausrüstungsquote mit diesen Systemen lässt auf ein noch erhebliches Potenzial schließen. So ist einzig der Frontairbag in fast jedem zweiten Fahrzeug verbaut.

Einige der genannten Maßnahmen, die sich aus der Analyse ergeben, sind schon umgesetzt, finden aber aufgrund des Alters der betrachteten Fahrzeuge noch nicht ihren Niederschlag in den GIDAS-Daten.

#### Fahrzeugkategorie der Vans und N1-Fahrzeuge

Nach Studien der DEKRA bedarf die Van-Sicherheit erhöhter Aufmerksamkeit, vor allem vor dem Hintergrund, dass der Anteil am Gesamtfahrzeugbestand in Deutschland von 1,23 % im Jahr 1998 auf 2,7 % im Jahr 2001 gestiegen ist. Bei Crashtests wurde festgestellt, dass vor allem das Nebeneinander von Passagieren und Ladung gefährlich werden kann. So wirkt ein Van wie ein einziger großer Kofferraum, bei dem die Insassen bei einer Kollision mit schweren Verletzungen durch herumfliegende Gegenstände rechnen müssen. Vor allem bei Heckkollisionen sind Passagiere in der dritten Sitzreihe stärker gefährdet als die übrigen Insassen. Der Grund liegt in der zu geringen Knautschzone vieler Vans. Der mögliche Problempunkt Schiebetür stellt sich insofern nicht als kritisch dar, da bei ihnen keine größeren Intrusionen als bei Flügeltüren auftreten. Allerdings sind sie bei starken Kollisionen kaum noch zu öffnen, da sich die Führungsschienen verbiegen. Das stellt ein ernsthaftes Problem bei der Rettung der Insassen dar, das nicht unterschätzt werden sollte [Unter uns, 2002].

Die Problematik der Van-Fahrzeuge spiegelt sich auch bei der Betrachtung der Verletzungsschwere der Insassen im GIDAS-Material wider. Hier ist in der Massenklasse über 2.000 kg die Wahrscheinlichkeit, schwere Verletzungen zu erleiden, fast doppelt so hoch wie im Bereich zwischen 800 bis 2.000 kg. Bei Fahrzeugen über 2 Tonnen Masse werden 6,78 % aller Insassen getötet. Das Risiko, in einem solchen Fahrzeug zu sterben, ist damit etwa 4,5 Mal höher als das in Fahrzeugen der anderen Massenklassen. Auch die Van-Fahrzeuge fallen zum Teil in diese Kategorie. Hier wäre allerdings auf Grund der sehr gemischten Fahrzeugstruktur, bestehend aus Van, Transporter, Geländewagen und großer Limousine, eine genauere Betrachtung notwendig, um für diese Fahrzeugklasse detaillierte Aussagen bezüglich des Verletzungsrisikos treffen zu können. Diese Zahlen sind auch ein

Anknüpfungspunkt für die genauere Untersuchung des Verhaltens von N1-Fahrzeugen im Unfallgeschehen. Aktuell scheinen die schweren Unfälle mit Fahrzeugen dieser Kategorie zuzunehmen, was für eine Einbeziehung der N1-Fahrzeuge in die Testvorschriften nach ECE-R94/95 sprechen könnte.

## 5 Gesetzgebung

### 5.1 Abgleich der bestehenden Gesetzgebung mit den Erfordernissen des realen Unfallgeschehens

#### 5.1.1 Frontalaufprall

##### ECE-R 94

Seit 1998 wird das Testverfahren nach ECE-R 94 angewandt. Hierbei stößt das Fahrzeug frontal mit einer Überdeckung von 40 % und einer Geschwindigkeit von 56 km/h gegen ein festes Hindernis mit einem Verformungselement.

Das Testgewicht des Fahrzeugs ohne Dummies soll das Leergewicht zuzüglich 90 % Tankfüllung betragen. Nach dem Test muss je Sitzreihe mindestens eine Fahrzeurtür, sofern vorhanden, ohne Werkzeug geöffnet werden können. Sind nicht für jede Sitzreihe Türen vorgesehen, so müssen sich die zum Befreien der Insassen nötigen Sitze entsprechend verschieben lassen. Diese Regelung ist nur für Fahrzeuge mit festem Dach zutreffend. Die Dummies sollen sich ohne Werkzeug aus dem Fahr-

Kopf	schwerpunktbezogene Kopfbeschleunigung • HPC < 1.000 • $a_{res,3ms} < 80 \text{ g}$
Hals	• Axiale Zugkraft • Scherkraft • Biegemoment • NIC - Kraft-Zeit-Verlauf • Halsbiegemoment < 57 Nm
Brustkorb	• Brusteindrückung zwischen Brustbein und Wirbelsäule • ThCC < 50 mm • VC < 1 m/s
Oberschenkelknochen und Schienbein	• Axiale Druckkraft • Biegemomente • Verschiebung des Schienbeins in Bezug auf den Oberschenkelknochen • Oberschenkel längskraft-Zeit-Verlauf • Knieverschiebung < 15 mm • TCFC < 8 kN • TI < 1,3

Tab. 5.1: Messungen an den Prüfpuppen nach ECE-R 94

zeug herausnehmen lassen. Das Kraftstoffsystem soll nach dem Test unversehrt sein. Die maximale Verschiebung des oberen Endes der Lenksäule darf in senkrechter Richtung und in waagerechter Richtung nicht mehr als 80 mm bzw. 100 mm in den Fahrzeuginnenraum betragen.

Auf den beiden äußeren Frontsitzen werden männliche 50-Perzentil-Hybrid-III-Dummies nach FMVSS 208 eingesetzt. An den Dummies müssen 10 festgelegte Schutzkriterien aufgenommen werden. Folgende Messungen werden an der Prüfpuppe durchgeführt (s. Tabelle 5.1).

#### Diskussion

##### Testbedingungen

Untersuchungen von LANGWIEDER zeigten, dass eine Erhöhung der Kollisionsgeschwindigkeit beim Offset-Test auf 64 km/h das reale Unfallgeschehen bei schweren Pkw/Pkw-Kollisionen zu 95 % abdecken würde. Diese Testgeschwindigkeit stellt allerdings die obere Grenze im Realunfall dar [LANGWIEDER, 1998].

Er weist außerdem darauf hin, dass die winklige Frontalkollision mit Bewegungsrichtung des Insassen gegen die A-Säule nicht hinreichend in den Testnormen wiedergegeben wird. Dieser Kollisionstyp stellt für den angegurteten Insassen ein erhebliches Verletzungsrisiko an Kopf und Halswirbelsäule dar. Daraus ergibt sich die Forderung, den Windschutzscheibenrahmen und den seitlichen Dachrahmen konsequent zu polstern. Des Weiteren sollten die Überlegungen des amerikanischen Sicherheitsstandards FMVSS 201, welcher den Kopfaufprall auf die A- und B-Säule und den Dachrahmen simuliert, auch auf die ECE-R 21 übertragen werden [LANGWIEDER, 1998].

Im Rahmen einer Überprüfung der europäischen Front- und Seitencrashtestanforderungen, die am 1. Oktober 1998 in Kraft traten, wurde eine Analyse des europäischen Unfallgeschehens durchgeführt. Dies wurde, teilweise von der Europäischen Kommission finanziert, von BAST, TNO, TRL und Volvo ausgeführt. Ergebnisse dieser Überprüfung und daraus resultierende mögliche Erweiterungen werden im Folgenden dargestellt [EDWARDS, 2001; WHYKES, 1998]:

- Für den Frontalaufprall nach ECE-R 94 sollte die Testgeschwindigkeit auf ungefähr 65 km/h angehoben werden. Nackenverletzungen stellen

ein signifikantes Problem dar. Ein Kriterium zur Nackenverletzungsbewertung sollte in den Test mit eingeschlossen werden. Es konnte gezeigt werden, dass das Risiko, eine Nackenverletzung zu erleiden, nahezu unabhängig von der Kollisionsschwere ist. Das würde bedeuten, dass ein Nackenverletzungskriterium unabhängig von der Testgeschwindigkeit angesetzt werden müsste. Für leichte Nackenverletzungen, wie das Halswirbelsäulenschleudertrauma (HWS-Syndrom), die eher Langzeitfolgen als lebensbedrohliche Konsequenzen haben, ließ sich herausarbeiten, dass ihr Auftreten beim Frontalaufprall genauso häufig ist wie bei jedem anderen Kollisionstyp. Das begründet die Notwendigkeit, ein Bewertungskriterium für Halsverletzungen beizubehalten (siehe ECE-R 94), dass allerdings den Nacken beinhalten sollte.

- Die N1-Fahrzeuge bis zu einer zulässigen Masse von 2,5 t sollten in die Tests übernommen werden, da keine bedeutenden Unterschiede in der Unfallcharakteristik zwischen N1- und M1-Fahrzeugen gefunden wurden. Im Gegensatz zu [WYKES, 1998] sollten nach [EDWARDS, 2001] die N1-Fahrzeuge mit einer Masse zwischen 2,5 t und 3,5 t aus Kompatibilitätsgründen nicht eingeschlossen werden.
- Es wird der Vorschlag gemacht, das existierende Lenkradverschiebungskriterium beizubehalten und zusätzlich eine seitliche Verschiebungsgrenze von ungefähr 100 mm einzuführen.
- Eine Erhöhung der Testgeschwindigkeit für den Frontalcrash wäre sinnvoll, um die strukturelle Integrität der Fahrgastzelle zu erhöhen, um so schwere Verletzungen durch den Kontakt der Insassen mit Teilen des Innenraumes zu verhindern. Im Rahmen dieser Untersuchung zeigte sich, dass ein viel größerer Anteil von schweren Verletzungen durch den Kontakt mit Innenraumteilen hervorgerufen wird als durch die Wirkung von Rückhaltesystemen. Es bleibt daher zu bedenken, dass bei einer Versteifung der Fahrgastzelle des Pkw auch größere Verzögerungen während eines Crashes auf die Insassen wirken. Das könnte zu mehr Verletzungen durch die Rückhaltesysteme führen, besonders bei verletzlicheren Insassen, wie den Älteren. Es wird vermutet, ohne es quantifizieren zu können, dass der Nutzen durch Vermeidung von Verletzungen durch Innenraumkontakt größer ist als die Zunahme von Verletzungen durch die

„aggressiveren“ Rückhaltesysteme [WYKES, 1998].

Zur Reduzierung tödlicher Verletzungen schlägt THOMAS einen zusätzlichen Hochgeschwindigkeitscrashtest mit einer EES von 70 km/h vor, da es sich bei diesem um den im Mittel bei einem Unfall mit tödlichem Ausgang vorliegenden EES-Wert handelt [THOMAS, 1997]. Werden bei diesem Test die Kontakte zwischen Dummy und Fahrzeug überprüft, so führt dies zu einer Verringerung des Verletzungsrisikos durch Kontakte mit der Fahrzeugstruktur. Die Tests bei geringeren Geschwindigkeiten sollen erhalten bleiben, damit das Verletzungsrisiko für die Insassen bei weniger schweren Unfällen nicht steigt, was aus einer zu steifen Auslegung des Fahrzeuges folgen kann. Weitere zu variierende Parameter sind Anstoßrichtung sowie Größe und Geschlecht der Insassen, um ein breites Spektrum möglicher Unfallkonstellationen abbilden zu können [THOMAS, 1997].

OTTE schlägt vor, zur Reduzierung der schwer verletzten Pkw-Insassen (MAIS 3+) einen Offset-Anprall durchzuführen [OTTE, 1997]. Dies ist in erster Näherung auch mit der ECE-R-94-Testkonfiguration gegeben. Allerdings zeigt sich bei dieser Analyse, dass es im realen Unfallgeschehen bei schwer verletzten Pkw-Insassen häufig zu schrägen Kollisionen zwischen Pkw unter Teilüberdeckung der Frontfläche kommt. Bei der jetzigen Testkonfiguration mit einer stehenden Barriere erscheint die seitliche Impulskomponente nicht entsprechend berücksichtigt und somit die Insassenrelativbewegung nicht realitätskonform wiedergegeben. Er schlägt deshalb vor, zwei Fahrzeuge bewegend miteinander kollidieren zu lassen oder eine bewegte Barriere zu benutzen. Zusätzlich ist nach OTTE ein Pfahlanprall, mittig gegen die Fahrzeugfront, erforderlich.

#### Kompatibilität

Eine Studie des GDV [LANGWIEDER, 1998] bestätigt das erhöhte Verletzungsrisiko von Insassen kleinerer Fahrzeuge. Es wird eine Änderung des Frontaltests vorgeschlagen, um der Kompatibilitätsproblematik Rechnung zu tragen. Der Test sollte durch die Verwendung einer intelligenten Barriere mit Messung von Kompatibilitätskriterien erweitert werden. Eine mehrstufige Barrierencharakteristik soll dabei die Energieproblematik beim Aufprall von Pkw mit unterschiedlicher Masse lösen.

## Sekundärkollision

Die Problematik der Sekundärkollision sollte nicht vernachlässigt werden. 20 % aller Fahrzeuge des Datenmaterials hatten nach der ersten noch eine zweite Kollision. So ließ sich feststellen, dass bei Sekundäraufprall die Frontalkollision dominiert (51 %), allerdings in 55 % der Fälle das Objekt der häufigste Kollisionskontrahent ist. Der Pkw folgt mit 29,6 % erst an zweiter Stelle. Die Problematik der Sekundärkollision besteht darin, dass heutige RHS auf die Primärkollision ausgelegt werden und somit bei einer anschließenden zweiten Kollision nicht mehr zum Schutz der Insassen zur Verfügung stehen. Dazu kommt, dass es sich meist um schwere Unfälle handelt, wie der Objektanprall als häufigste Kollisionsart für die Sekundärkollision verdeutlicht. Es ist zum einen zu überlegen, wie die RHS zusätzlich bei einem zweiten Aufprall den Insassen schützen können und wie dieser Umstand in einem möglichen Testverfahren abgeprüft werden kann.

## Ableitungen aus dem GIDAS-Datenmaterial

Die Bedeutung des Frontalaufpralls am Unfallgeschehen des Pkw und damit die Notwendigkeit für ein Testverfahren unterstreichen die folgenden Zahlen: Mit 54,7 % ist er die häufigste Aufprallart im Pkw-Unfallgeschehen. Auch bei den Unfällen mit AIS3+ Verletzungen nimmt er mit 32 % die zweite Position hinter dem Seitenaufprall ein.

Beim Frontalaufprall dominieren mit 52,5 % Kollisionen mit Überdeckungsgraden von bis zu 50 %. Das spricht für die Durchführung des Testverfahrens unter Offset-Bedingungen mit 40%iger Überdeckung (Anteil von 41,5 %). Allerdings kollidieren auch 30,7 % der Fahrzeuge frontal mit einem Überdeckungsgrad von 90–100 % mit dem Kollisionsgegner. Dies würde auch einen Anprall mit 100 % Überdeckung im Testverfahren gegen die deformierbare Barriere rechtfertigen. Dabei würden die höheren Anforderungen an die Rückhaltesysteme gestellt werden. Demgegenüber stellen die Konstellationen mit Teilüberdeckung die höheren Anforderungen an die Fahrzeugstruktur.

Betrachtet man die energieäquivalente Kollisionsgeschwindigkeit (EES), so lässt sich feststellen, dass 96,4 % aller Frontalkollisionen unterhalb von 61 km/h stattfinden. Das würde bedeuten, dass Aufprallversuche mit dieser Testgeschwindigkeit unter Verwendung einer starren Barriere 96,4 % aller realen Frontalkollisionen abdecken. Hier erscheinen 60 km/h als eine geeignete Testgeschwindigkeit.

Allerdings sollte in einem Testverfahren auch dem Umstand Rechnung getragen werden, dass 16,6 % der Pkw mit einem Objekt kollidieren. Das könnte ein Indiz für einen obligatorisch durchzuführenden Objektanprall (z. B. Pfahl) sein. Die letztendliche Notwendigkeit einer solchen Testform bedarf allerdings noch gezielter Untersuchungen.

## Dummysanforderungen

Der Forderung nach der stärkeren Einbeziehung der unteren Extremitäten in ein Testverfahren nachkommend, sollten moderne Dummies laut einer Studie des GDV [LANGWIEDER, 1998] mit geeigneten Sensoren im Unterschenkel-, Fuß- und Beckenbereich ausgestattet werden. Hier bedarf es weiterer biomechanisch abgesicherter Belastungskenngrößen.

Verletzungen der unteren Extremitäten sind im GIDAS-Datenmaterial mit über 20 % an allen Verletzten nach Kopf, Hals und Thorax am häufigsten. Bei den AIS 3+ Verletzungen nimmt die Bedeutung der Verletzungen der unteren Extremitäten noch zu (vgl. Bild 2.50–2.52). Betrachtet man die Häufigkeit dieser Verletzungen vor dem Hintergrund der erhöhten Verletzungsfolgekosten im Vergleich zu Verletzungen anderer Körperregionen, so könnte dies die Einbeziehung von Grenzwerten an den Beinen in ein Testverfahren begründen. Auch [LENZ, 1997] bestätigt die Notwendigkeit für Maßnahmen zum Schutz der unteren Extremitäten.

## 5.1.2 Seitenaufprall

### ECE-R 95

Bei dem gesetzlichen Seitentestverfahren nach ECE-R 95 fährt ein Schlitten mit einer deformierbaren Barriere rechtwinklig mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h in die Seite des zu testenden Fahrzeugs. Der Anstoß soll gegen den R-Punkt des Fahrzeugs erfolgen. Die Barriere hat eine Masse von 950 kg. Die deformierbare Stoßfront der Barriere besteht aus sechs Elementen mit unterschiedlichen Steifigkeiten (Aluminiumwaben oder Hartschaum). Die Unterkante des Deformationselementes befindet sich 300 mm über der Fahrbahnoberfläche.

Auf dem Fahrerplatz, also auf der stoßzugewandten Seite des Fahrzeugs, wird ein EuroSID1 positioniert. An ihm sind die in Tabelle 5.2 dargestellten Messwerte zu erfassen.

Kopf	schwerpunktbezogene Kopfbeschleunigung • HPC < 1.000
Thorax	• Rippeneindrückung • RC > 42 mm • VC < 1,0 m/s
Abdomen	• Abdomenkraft • $\Sigma$ APF 2,5 kN
Becken	• Schambeinfugenkraft • PSPF < 6 kN

Tab. 5.2: Messungen an den Prüfpuppen nach ECE-R 95

## Diskussion

### Testbedingungen

Als Ergebnis einer Studie von OTTE (basierend auf Unfalldaten der MH Hannover aus den Jahren 1985–1993) wird festgestellt, dass die Schambeinfugenkraft, gemessen am EURO-SID, ein passendes Verletzungskriterium vor allem für die Beckenfraktur darstellt. Auf eine Kraftmessung in der Oberschenkelregion kann verzichtet werden. Weiterhin wird die Abbildung einer Pkw-Nfz-Kollision im Testverfahren als nicht notwendig erachtet, da die Problematik durch die Barriere im Testverfahren abgedeckt wird [OTTE, 1995].

Die typische Seitenkollision erfolgt nach Untersuchungen der Verkehrsunfallforschung Hannover in einem Winkel von 15–45° schräg von vorn, was in den derzeitigen Testverfahren nicht oder nur unzureichend berücksichtigt wird. Das flächige Auftreffen der Barriere entspricht nicht dem realen Unfallgeschehen. Die Unfallschwere sollte mit einem  $\Delta v$  von 40 km/h abgebildet werden, da 90 % aller realen Unfälle mit einem  $\Delta v \leq 40$  km/h erfolgen [OTTE, 1993].

Um die Zahl der schwer verletzten MAIS 3+ Pkw-Insassen zu reduzieren, schlägt OTTE vor, dass eine schräg einlaufende Barriere Verwendung findet. Hierbei sollte allerdings die Ecke der Barriere zuerst treffen und nicht die Frontfläche parallel zur Seitenfläche des Pkw stoßen. Die Unterkante der Barriere sollte hoch angeordnet sein, da sich im Unfallgeschehen zeigte, dass der Türschweller grundsätzlich überfahren wurde. Dafür sprechen auch Studien von OTTE, bei denen gezeigt wurde, dass im realen Unfallgeschehen mit Beckenverletzungen der Anstoßpunkt oberhalb des Schwellers lag. Somit erfährt das Fahrzeug hohe seitliche Intrusionen, die zu schweren Verletzungen führen [OTTE, 1997 und 1993].

Aussagen zur Testbarrierenunterkante finden sich auch in [WYKES, 1998], der eine Erhöhung vorschlägt, um die Realität besser abzubilden. Die Barrierenunterkante liegt heute bei 300 mm. Die untere Kante der Fahrzeuglängsträger ist im Durchschnitt 380 mm über dem Boden und der Fahrzeugboden befindet sich im Durchschnitt 350 mm über dem Boden. Die Barrierenoberkante sollte in der jetzigen Höhe bleiben.

Für den Seitenaufprall nach ECE-R 95 wird anhand von Untersuchungen weiterhin Folgendes vorgeschlagen [EDWARDS, 2001]:

- Anhand des Unfallgeschehens ist nach Edwards zu erkennen, dass die Schwere des Aufpralls erhöht werden muss. Das kann einerseits durch die Erhöhung der Geschwindigkeit, die Anhebung des Bodenabstandes der Barriere oder die Anhebung der Masse geschehen. Es wird allerdings betont, dass noch zusätzliche Forschung benötigt wird, um den richtigen Weg auszuwählen. Entscheidet man sich für die Erhöhung der Geschwindigkeit, so konnte gezeigt werden [EDWARDS, 2001], dass heutige Fahrzeuge die Testbedingungen noch bei 60 km/h erfüllen. Bei Anpassung der Masse muss diese erhöht werden, um ein heutiges Mittelklassefahrzeug zu repräsentieren.
- Die Einschränkung zur Sitzposition des Dummys im Seitenaufpralltest könnte zurückgenommen werden [EDWARDS, 2001; WYKES, 1998]. Sie soll verhindern, dass der Dummy in Höhe der B-Säule sitzt und dadurch direkt mit der B-Säule in Kontakt kommt. Es wurde herausgefunden, dass ein Fahrzeug mit Seitenairbags die Testanforderungen erfüllen kann, auch wenn der Dummy in einer Linie mit der B-Säule sitzt. Das könnte eine Reduzierung der Verletzungen durch den Anstoß an der B-Säule bedeuten. Allerdings ist die Höhe der Reduzierung der Belastungen nicht klar und es wird zu weiterer Forschung auf diesem Gebiet geraten. Ergebnis der Aufhebung dieser Einschränkung könnte sein, dass alle Fahrzeuge serienmäßig mit Seitenairbags ausgestattet werden müssen.
- Das Viscous Criterion (VC) sollte bei dem vorgeschlagenen Wert von 1 m/s beibehalten werden, bis zukünftige Untersuchungen etwas anderes sagen.

Auch die Einführung eines Pfahltests in die europäische Gesetzgebung wird in den Bereich des

Möglichen gerückt [EDWARDS, 2001; WYKES, 1998; LANGWIEDER, 1997]. Unfallstudien zeigen, dass der Pfahlaufprall einen bedeutenden Teil des Seitenaufpralls ausmacht. Im Gegensatz zu dem Pole-Test in den USA, der nur den Kopfaufprall bewertet, sollte dieser europäische Test so ausgeführt sein, dass der Schutz des ganzen Körpers bewertet werden kann. OTTE kommt zu dem Schluss, dass zusätzlich ein Pfahlanprall eingeführt werden sollte, der so gestaltet ist, dass der Pfahl zwischen A- und B-Holm am Pkw unmittelbar vor dem Becken des Insassen anprallt. Der Pfahl sollte von schräg vorn in die Seite des Pkw prallen. Die Höhe der Pfahlbarriere kann über die gesamte Höhe des Pkw, einschließlich Schweller und Dach, reichen [OTTE, 1997 und 1993].

Im Abschlussreport zur Überprüfung der europäischen Front- und Seitencrashgesetzgebung [WYKES, 1998] wird festgestellt, dass eine Erhöhung der Schwere der Seitenaufprallcrashtest-Direktive 96/27/EC (ECE-R 95) in Erwägung gezogen werden kann. So könnten nach WYKES noch mehr schwer verletzte oder getötete Insassen durch einen verschärften Test gerettet werden. Es wurde festgestellt, dass die Testgeschwindigkeit der empfindlichste Parameter in Bezug auf die Verletzungssituation der Insassen ist. Eine mögliche Testgeschwindigkeit ist stark von der Frage abhängig, „wen und bis zu welcher Schwere“ ich schützen möchte. Da es solche Prinzipien aus ethischen und moralischen Gründen nicht gibt, wird in dieser Studie keine konkrete Testgeschwindigkeit vorgeschlagen. Möchte man zum Beispiel 50 % der AIS 3+ Verletzten schützen, zeigen die schwedischen Daten eine notwendige Testgeschwindigkeit von 50 km/h, die britischen Daten würden eine Geschwindigkeit von über 50 km/h nahe legen und die deutschen Daten weisen auf eine Testgeschwindigkeit von 67 km/h hin. Ein ähnlich unterschiedliches Bild würde sich für den Fall ergeben, dass 75 % der AIS 3+ Verletzten eingeschlossen werden sollten. Die Erhöhung der Testgeschwindigkeit auf einen zu hohen Wert könnte auch negative Folgen für die betreffenden Altersgruppen haben. So könnten sich die Altersgruppen der Verletzten oder Getöteten hin zu Älteren oder Verletzlicheren verschieben. Weiterhin bleibt noch zu bedenken, dass 30–60 % der schwer verletzten oder getöteten Insassen, abhängig vom Land, älter als 40 Jahre sind und 20–40 % älter als 50 Jahre. Diese Altersgruppen sind verletzlicher und würden wahrscheinlicher Verletzungen erleiden, auch bei den häufigeren leichteren Seitenkollisionen.

Ableitungen aus dem GIDAS-Datenmaterial

Der Seitenaufprall hat mit 21 % einen sehr großen Anteil am Gesamtunfallgeschehen. Noch deutlicher wird dies bei der Betrachtung für schwere und tödliche Verletzungen. Hier rangiert die Seitenkollision mit 52 % an erster Stelle. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit eines Seitenaufpralltestverfahrens.

Es konnte festgestellt werden, dass 41,4 % der an Unfällen beteiligten Fahrzeuge zwischen 1.200 kg und 1.600 kg schwer waren. Nur 19,6 % der Fahrzeuge wogen unter 1.000 kg (vgl. Bild 2.20). Es wird deutlich, dass das Gewicht von 950 kg für die Barriere im Seitenaufprall nach ECE-R 95 das Unfallgeschehen nicht abbildet.

Weiterhin konnte ermittelt werden, dass bei einer Seitenkollision Überdeckungsgrade von bis zu 20 % der Fahrzeuglänge mit 44,7 % dominieren. Hier ist der Anstoß in die Fahrerseite deutlich häufiger. Mit 29,4 % ist die Seitenkollision mit 31–50 % Überdeckung am zweithäufigsten. Dieser Überdeckungsgrad entspricht in etwa auch der in die Fahrzeugseite einlaufenden Barriere. Die geringeren Überdeckungsgrade von bis zu 20 % können ein Indiz für Objektanstöße (z. B. Pfahl) sein, womit die Notwendigkeit eines Pfahlanpralls unterstrichen werden würde.

Betrachtet man die energieäquivalente Kollisionsgeschwindigkeit für den Seitenaufprall, so finden 91 % aller Seitenkollisionen unterhalb von 46 km/h und 96,6 % unter 61 km/h statt. Dies kann den Schluss zulassen, dass 50 km/h eine ausreichend hohe Testgeschwindigkeit darstellt. Bei der Wahl der Testgeschwindigkeit sollten aber 60 km/h die obere Grenze darstellen.

Dummyanforderungen

Laut einer Studie des GDV [LANGWIEDER, 1998] sollten die verwendeten Dummies im Seitencrash besonders im Beckenbereich optimiert werden.

OTTE schlägt vor, zusätzlich zu dem Beckensensor auch die Längs- und die Querkraft auf den Oberschenkelknochen des Dummies zu messen [OTTE, 1993].

### 5.1.3 Heckaufprall

Diskussion

LANGWIEDER schlägt vor, dass bei einem möglichen Heckaufpralltest das Fahrzeug mit Dummies

besetzt sein sollte, um die Nackenbelastungen ermitteln zu können [LANGWIEDER, 1997]. Außerdem wird in [LANGWIEDER, 1998] ein optimiertes Gesamtsystem „Sitz-Kopfstütze“ gefordert. Grund hierfür ist die Dominanz der Heckkollision bei Unfällen mit leichten Personenschäden. Dieser Sicherheitstest sollte sich auf den unteren und mittleren Bereich einer Geschwindigkeitsänderung von  $\Delta v$  bis ca. 25 km/h beschränken. Dies sollte zur Prävention von Schleudertraumen und zur Kontrolle des Verformungsverhaltens der Sitzlehne (Bruchfestigkeit) dienen. Die Sitze sollten so ausgelegt werden, dass sie kontrolliert nachgeben, aber eine absolute Sicherheit gegen Abknicken nach hinten bzw. Brechen der Sitzlehne gewährleisten.

#### Ableitungen aus dem GIDAS-Datenmaterial

Der Heckaufprall ist die zweithäufigste Aufprallart in dem analysierten Datenmaterial. Allerdings geht ihre Bedeutung bei der Betrachtung von schweren und tödlichen Unfällen deutlich zurück. Das zeigt, dass hauptsächlich leichte Verletzungen die Folgen einer Heckkollision sind. Dafür spricht auch das geringe Geschwindigkeitsniveau, bei dem Heckkollisionen stattfinden. Bereits 91,6 % aller Heckkollisionen geschehen bis zu einem EES von 31 km/h. Dazu kommt, dass 36 % der Heckkollisionen mit einem Überdeckungsgrad von 90–100 % stattfinden, es sich also um typische Auffahrunfälle handelt. Dieser Fakt wird zusätzlich dadurch untermauert, dass 46 % aller Unfälle im Längsverkehr ein Auffahren auf ein Stauende, ein wartepflichtiges oder vorausfahrendes Fahrzeug umfassen.

Allgemein kann man sagen, dass der Heckaufprall im Vergleich zu Front- und Seitenaufprall die geringste Verletzungsfolgeschwere nach sich zieht. Die hohe Zahl an AI S1 Verletzungen kann in Zusammenhang mit den HWS-Verletzungen stehen. Dies wird dadurch gestützt, dass allgemein bei den Insassen neben den Kopfverletzungen vor allem Verletzungen des Halses dominieren (vgl. Bild 2.50–2.52). Dieser Verletzungstyp zieht trotz geringer Verletzungsschwere erhebliche Folgekosten nach sich, weshalb die hohe Anzahl durchaus zum Handeln Anlass geben sollte. Die auf dem Markt erhältlichen Systeme aktiver Kopfstützen in Kombination mit entsprechenden Sitzlehnen können die Gefahr von Halswirbelsäulenverletzungen reduzieren. Sie stellen somit eine kostengünstige Möglichkeit zur Verbesserung der passiven Sicherheit dar.

#### Überschlag

Die Analyse des Unfallgeschehens lässt es im Gegensatz zu [LANGWIEDER, 1997] nicht sinnvoll erscheinen, einen Überschlagtest als obligatorisches Testverfahren einzuführen. Der Überschlag hat auf deutschen Straßen keine Bedeutung [APPEL, 1998].

## 5.2 Vorschläge zur Erweiterung der Sicherheitsgesetzgebung

Es kann zu Widersprüchen zwischen den verschiedenen Vorschriftensystemen kommen. So wird behauptet, Fahrzeuge, die auf die optimale Erfüllung der Euro-NCAP-Anforderungen ausgelegt sind, könnten in US-amerikanischen Tests nicht optimal eingestuft werden. Vom neuen Honda Accord wird berichtet, er sei besonders gut auf den Fußgängerschutz ausgelegt; dafür habe man eine verschlechterte Versicherungseinstufung wegen höherer Reparaturkosten in Kauf genommen. Es ist also eine Abwägung von Zielkonflikten erforderlich.

Um ein möglichst umfassendes Bild von den Problemen bei der Einführung intelligenter Rückhaltesysteme zu erhalten, wurden Experten auf dem Gebiet der Fahrzeugsicherheit befragt. Nur durch die Einbindung dieses Wissens können sinnvolle Empfehlungen gegeben werden. Es werden Konflikte dargestellt, die bei der Einführung intelligenter Rückhaltesysteme durch existierende Vorschriften auftreten und Lösungsvorschläge erarbeitet.

Im Rahmen dieses Projektes wurden 7 Experten befragt. Dabei gehören 5 Experten der Wirtschaft, 1 Experte einer Organisation und 1 Experte der Wissenschaft an.

Abschnitt 5.2 gibt die gesamte Bandbreite aller Antworten der befragten Experten wieder. Die Angaben stellen nicht die Meinung des Autors dar. Es handelt sich vielmehr um eine unbewertete und nicht kommentierte Zusammenfassung der Statements der befragten Experten [Expertenbefragung, 2002].

#### Allgemein

Die ECE-Regelungen bilden nicht den gesamten Anforderungskatalog in der fahrzeugtechnischen Entwicklung ab. Darüber hinaus sollte bei der Bewertung vorausgesetzt werden, dass Hersteller

nicht nur die ECE-Regelungen beachten, sondern u. a.

- Mindestanforderungen nach gesetzlichen Vorschriften im internationalen Kontext erfüllen, um Handelshemmnisse zu vermeiden und die Fahrzeuge weltweit zum Verkehr zulassen zu können,
- eigene Zielvorgaben erfüllen, die häufig über die gesetzlichen Vorgaben hinausgehende,
- Vorgaben aus anderen gesetzlichen Bereichen, wie z. B. Produkthaftung, Sprengstoffgesetz, berufsgenossenschaftliche Forderungen, allgemeine technische Normen usw., bei der Entwicklung und Zulassung eines Produktes beachtet werden müssen,
- Zielvorgaben aus Consumer-Tests zu berücksichtigen sind,
- Randbedingungen zu berücksichtigen sind, die sich aus der Versicherungseinstufung ergeben.

Insofern sind ECE-Regelungen nur ein Segment im Anforderungskatalog unter mehreren.

Da die Möglichkeit zum Ändern der Vorschriften auch durch die Fahrzeughersteller gemeinsam mit Partnern, wie z. B. Mitgliedsstaaten und technischen Diensten, besteht, werden prinzipiell keine alternativen RHS verhindert. Allerdings beträgt der Mindestzeitbedarf für Änderungen von EG /ECE-Anforderungen in der Regel 3 Jahre. Dieser Prozess ist damit sehr langwierig und unterdrückt zumindest für diese Zeit die Einführung alternativer Systeme. Darüber hinaus besteht noch die Möglichkeit, Systeme über Sondergenehmigungen einzuführen. Diese Genehmigungen bedürfen bis zu ihrer Erteilung einer Zeit von bis zu 1,5 Jahren. Damit können sie als ein Mittel angesehen werden, Alternativen kurzfristiger am Markt einzuführen. Bedenkt man aber die Schnellebigkeit und den starken Konkurrenzkampf in der Automobilindustrie (sowie die Notwendigkeit der weltweiten Zulassungsfähigkeit), erscheinen all diese Zeitspannen als zu lang. Es muss also nach Wegen gesucht werden, noch schneller auf fortschrittliche, technische Änderungen zu reagieren.

Bei den ECE-Regelungen in Bezug auf die Sicherheit rund um das Kraftfahrzeug handelt es sich teilweise um Konstruktionsvorschriften. Diese haben ihren Ursprung in den 70er Jahren mit dem Beginn der Sensibilisierung der Öffentlichkeit für den Schutz der Insassen in Kraftfahrzeugen. In der

Regel sind diese Konstruktionsvorschriften als Mindestvorschriften ausgeführt, sodass ein großes Maß an Gestaltungsfreiheit vorhanden ist.

Speziell bei den Rückhaltesystemen haben wir Einzelvorschriften, bestehend aus Wirk- und Konstruktionsvorschriften, für Gurtverankerungen, Sicherheitsgurte, Sitzfestigkeit und Instrumententafel (Airbagunterbringung) zu beachten. Dies sind die ECE-Regelungen 14, 16, 17 und 21. Darüber hinaus wird das Zusammenwirken aller Komponenten im Frontal- und Seitenaufprall nach ECE-R 94/95 abgeprüft.

Insgesamt führt dies zu einer Überbestimmung. So wird beispielsweise die Insassenvorverlagerung einmal nach ECE-R 16 (Sicherheitsgurtprüfung) mittels Schlitten und einem vereinfachten TNO-10-Dummy abgeprüft. Zusätzlich wird die Insassenvorverlagerung nach ECE-R 94 mittels Hybrid-III-Dummys abgeprüft.

Es liegt die Überlegung nahe, generell die Einzelvorschriften bestehen zu lassen, allerdings bei „Problemfällen“ immer eine dynamische Gesamtbeurteilung des Rückhaltesystems im Full-Scale-Test bzw. Schlittenversuch als ausschlaggebenden Nachweis einzuführen.

Konstruktionsvorschriften können alternative Entwicklungen verhindern. Allerdings ist das zum Teil beabsichtigt, um zu vermeiden, dass z. B. fahrzeugbezogene Fahrlizenzen vergeben werden müssen. Mit den normalen Führerscheinen sollen dagegen alle Fahrzeuge nach kurzer Einweisung gefahren werden können. So kann man die Konstruktionsvorschriften eher als eine Bremse für zügellose Innovationssprünge ansehen. Es ist nur eine langsame Einführung innovativer Ideen möglich, wenn das System Fahrzeug-Fahrer direkt berührt wird. Verdeckte Innovationen, die nur indirekt das System Fahrzeug-Fahrer betreffen, sollten dagegen leichter umzusetzen sein.

Als Beispiel für die Einschränkung bei der Umsetzung technischer Lösungen durch Konstruktionsvorschriften kann der elektronische Sensor zur Retraktor-Ansteuerung des Sicherheitsgurtes bei einem deutschen Automobilhersteller gelten. So existierte lange die Anforderung, dass bei Sensoren, die von einer externen Stromquelle abhängig sind, der Gurtaufroller bei „Strom aus“ blockieren muss. Bei dem Fahrzeugmodell mit vollständig in den Sitz integrierten Gurt wurde deshalb ein Bowdenzug zwischen Gurtschloss und Aufroller verbaut, so dass sich der Insasse bei „Zündung aus“

zumindest angurten konnte. Sobald der Insasse angegurtet war, blockierte der Sicherheitsgurt und gab erst bei „Zündung ein“ Gurtband frei.

Wirkvorschriften sind prinzipiell flexibler und erleichtern somit die Einführung alternativer RHS. Allerdings erhöhen sie den Aufwand für den Nachweis der Übereinstimmung mit den festgelegten technischen Anforderungen deutlich. So sind Wirkvorschriften durchaus zu bevorzugen, allerdings immer mit Blick auf das Kosten/Nutzen-Verhältnis.

Bei der Lösung dieser Problematik ist ein Kompromiss aus Konstruktions- und Wirkvorschrift denkbar. Dabei würde sich jede Einzelrichtlinie wie folgt gliedern:

- Präambel,
- Mittelteil mit Abnahmekriterien,
- Freistellungsklausel.

In der Präambel jeder Einzelrichtlinie ist festzulegen, was die Vorschrift erreichen will und welcher Lastfall geprüft werden soll.

Im Mittelteil werden dann die technischen Anforderungen, gleichgültig, ob Konstruktionsanforderungen oder Leistungsanforderungen, an beispielhaften Abnahmekriterien für den Normalfall festgelegt.

Zusätzlich kann in jeder Einzelregelung festgelegt werden, dass auch nach anderen Kriterien geprüft und beurteilt werden kann, wenn nachgewiesen wird, dass das Ziel der Präambel erfüllt wird. Die in der Freistellungsklausel als alternativ durchführbarer Nachweise festgelegten Verfahren können dann für zukünftige Anpassungen der Abnahmekriterien im Mittelteil verwandt werden. So kann technischen Entwicklungen besser nachgekommen werden und es ist sichergestellt, dass sich die Regelungen immer am neusten technischen Stand der Abnahmekriterien orientieren. Durch die Offenlegung der Verfahren ist auch das Vertrauensverhältnis zwischen den Mitgliedern und Nutzern der internationalen Abkommen gewahrt.

Alternativen in der Zulassung von Produkten sind die Kombination von Test- und Nachweismöglichkeiten für den Fahrzeughersteller und die Einbindung der Komponentenhersteller in die Zertifizierungsverfahren. Dazu sollten vom Hersteller alle Ergebnisse nach dessen Einschätzung genutzt werden. Neue Entwicklungstools, wie z. B. die rechnerische Simulation, sollen explizit Berücksichtigung

finden. Endergebnis sollte sein, dass die produzierten und verkauften Fahrzeuge den Zielvorgaben der Zulassungsregelungen entsprechen. Dies ist dann in der Produktion zu prüfen und weniger bei Prototypen, die nicht aus Teilen der Serienproduktion zusammengestellt worden sind. Daraus ergäbe sich eine Annäherung an das Selbstzertifikatswesen entsprechend den Bestimmungen in den USA.

Prinzipiell bietet die rechnerische Simulation heutzutage das Potenzial, in ECE-Richtlinien als Abnahmetool eingesetzt zu werden. Größter Vorteil hierbei ist die Kosteneinsparung bei der gleichzeitigen Möglichkeit, zahlreiche Varianten durchzuprüfen. Allerdings müssen die Methoden sorgfältig validiert sein. Zugleich sind eine Offenlegung des Verfahrens und eine Beschränkung in den Randbedingungen (standardisiertes Modell mit festgelegten Leistungsmerkmalen, Software, Validierung anzustreben.

Der reproduzierbare experimentelle Versuch hat sich über die Jahre als ein zuverlässiges, allerdings auch kostenintensives und zeitaufwändiges, Abnahmekriterium herausgestellt. Auch hier scheint eine Kombination aus Experiment und rechnerischer Simulation neue Möglichkeiten zu bieten, um die Eingangsparameter für ein Testverfahren fahrzeugspezifisch zu ermitteln. Denkbar ist weiterhin das Benutzen der rechnerischen Simulation für eine Robustheitsanalyse bestimmter Produkte, wie sie schon jetzt von Herstellern im Entwicklungsprozess angewandt wird. So kann der Einfluss veränderter Randbedingungen auf das Verhalten der RHS überprüft werden. So können z. B. Abschätzungen über das Verhalten des Systems bei Ausfall eines Crashsensors oder dem Nichtzünden einer Airbagstufe schnell und kostengünstig getroffen werden.

Die meisten ECE-Vorschriften sind so verfasst, dass sie sich an der anschaulichen mechanischen Vorstellungswelt orientieren. Deshalb wurden Forderungen nach mechanischen Rückfallebenen eingebracht. Prinzipiell sind elektronische Systeme mit mechanischen Systemen in der Zuverlässigkeit vergleichbar. Eine elektronische Redundanz könnte die mechanische Rückfall-Lösung ersetzen. Ein gutes Beispiel für die Bewertung der Zuverlässigkeit bietet der „Elektronik-Leitfaden“ zur ECE-R 13 (Bremse).

Beim Nachweis der Zuverlässigkeit bzw. der Ausfallwahrscheinlichkeit technischer Systeme kann

für die Zertifizierung folgender Ansatz gewählt werden: Die Ausfallwahrscheinlichkeit wird aus den entsprechenden mechanischen Dauerfunktions-tests der ECE-Regelungen übernommen und auf die elektronischen Systeme übertragen. Das elektronische System kann als mindestens gleich sicher bewertet werden, wenn die Ausfallwahrscheinlichkeit kleiner oder mindestens gleich der von mechanischen Komponenten ist.

Darüber hinaus sollten auch probabilistische Analysen, FMEA-Methoden oder ein Fehlermanagement für Softwareapplikationen als Zuverlässigkeitsnachweis für technische Systeme verwandt werden.

### **ECE-R 94/95**

Bei der zukünftigen Entwicklung von intelligenten Rückhaltesystemen und der geforderten Gesetzeskonformität bezüglich ECE-R 94/95 wird es keine oder nur geringfügige technische Konflikte geben, solange Europa keine eigenständigen Airbagregelungen einführt. Unabhängig hiervon sind die wirtschaftlichen Vor- oder Nachteile zu sehen, die Hersteller haben, die auf dem US-amerikanischen Markt Fahrzeuge und Systeme verkaufen und daher auch in Europa, aufgrund der Produkthaftung in den USA, im Prinzip keine vom US-Standard abweichende Lösung anbieten können. Vorteile haben hier eventuell Firmen, die Produkte nur in Europa vertreiben und somit nur den europäischen Regelungen entsprechen müssen.

Da sich auch die europäische Gesetzgebung nicht der OOP-Problematik entziehen kann, wird es Anpassungen der bestehenden Regelung geben müssen. Die FMVSS 208 kann jedoch für die zukünftige Entwicklung in Europa nicht einfach übernommen werden. So wird in den USA auch der Fall geprüft, dass sich das Kind unangegurtet vor der Instrumententafel befindet. Da der Gurt für eine sichere Rückhaltung unabdingbar ist und dies auch in den europäischen Vorschriften so verankert wurde, wäre das der falsche Weg für Europa.

Dass die FMVSS 208 ein schlechtes Beispiel für die Weiterentwicklung von Testverfahren für Rückhaltesysteme in Europa darstellt, leitet sich auch aus ihrer Entstehung ab. So forderte die „alte“ FMVSS 208 zwingend u. a. die Ausrüstung mit Lenkrad- und Beifahrerairbag, die einen ungegurteten Insassen bei einem 30-mph-Frontalaufprall ausreichend

schützen. Dies brachte entsprechend aggressive Airbags auf dem US-amerikanischen Markt hervor, die nun in der „neuen“ FMVSS über die Insassenerkennung gegebenenfalls deaktiviert werden bzw. auf „low risk deployment“ ausgelegt werden müssen, um Insassen in OOP-Situationen nicht übermäßig zu gefährden. Die Vorschrift wurde veröffentlicht, ohne dass eine ausgereifte Technologie zur Verfügung steht.

Bei der Weiterentwicklung der ECE-R 94/95 wird die Sensorik eine immer größere Rolle spielen. Trotzdem sollte die „klassische“ Zulassung von Rückhaltesystemen möglich sein. Die ECE-R 94/95 sollte mit allen Funktionen geprüft werden, die bei einem Fahrzeug bei der entsprechenden Aufprallgeschwindigkeit aktiv sind. Die OOP-Problematik sollte nicht vorschnell in die europäischen Vorschriften überführt werden. Um eine mögliche Vorschrift am effektivsten zu gestalten, sollte vielmehr die Entwicklung in den USA beobachtet werden. Die sich durchsetzenden Systeme können dann Anhaltspunkte für eine Weiterentwicklung der entsprechenden Vorschriften sein. Dabei sollte man beachten, dass heute vieles nicht mehr per Vorschrift, sondern kurzfristiger per Verbrauchertest (z. B. NCAP) zum Quasi-Standard wird. Für einen Fahrzeughersteller sind mehrere Testkonfigurationen für das gleiche Schutzziel die schlechteste Lösung.

Bei möglichen Anpassungen der EEVC-R 94/95 an das reale Unfallgeschehen sollten unter anderem folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Verwendung von Dummies auch auf den Rücksitzen. Deutsche Hersteller testen mit 1–3 Insassen auf der Rückbank. Eine Relevanz ist aus dem Unfallgeschehen nicht direkt ableitbar. Allerdings ist sicherzustellen, dass den Rücksitzinsassen der gleiche Schutz wie den Frontpassagieren geboten wird.
- Bild einer größeren Insassenpopulation, unter anderem Einbeziehung der 5-%-Frau und des 95-%-Mannes. Es sollte in korrekter Sitzposition und gegurtet geprüft werden.
- Orientierung an EuroNCAP in Form der Einführung einer zweiten Testkonfiguration mit einer Kollisionsgeschwindigkeit von 56 km/h gegen die starre Wand mit voller Überdeckung.
- Ergänzung der Regelung durch eine Heckkollision mit niedriger und hoher Geschwindigkeit.

## ECE-R 14

Da der Gesamtfahrzeugtest nach ECE-R 94/95 Insassen nur auf bestimmten Sitzpositionen berücksichtigt, erscheint ist quasistatischer Test mit definierten Kraft/Zeit-Anstiegen und kurzen Kräftehaltezeiten zum Test der Stabilität der Gurtverankerungen sinnvoll. Problematisch hierbei ist, dass die Gurtverankerungen integrierter Bestandteil des Rückhaltesystems sein werden. Daher muss die Einzelregelung ECE-R 14 im Sinne einer Gesamtsystembetrachtung des Rückhaltesystems u. a. stärker mit der ECE-R 16, 17, 21, 12, 94 und 95 verknüpft werden.

Man kann davon ausgehen, dass dieser Zusatztest durch intelligente Systeme nicht beeinflusst werden wird. Allerdings bedarf es entscheidender Änderungen des Tests, um der Realität besser zu entsprechen. So scheinen folgende Änderungen sinnvoll:

- Anlenkpunkte werden festgelegt. Dabei müssen Minima und Maxima der Lageänderung nach der Beanspruchung in einem Toleranzfenster liegen.
- Die Prüfbeanspruchung sollte dynamisch und kurzzeitig sein.
- Ein sitzreihenübergreifender Zugtest der Struktur wäre denkbar.

Es ist auch denkbar, dass Gurte mit Kraftbegrenzer und Sitzplätze mit Airbag bezüglich der Festigkeit der Gurtverankerungen und Vorverlagerung nur dynamisch nach ECE-R 94 bewertet werden. In den Einzelvorschriften ECE-R 14 und 16 sollten dafür entsprechende Verweise aufgenommen werden.

Darüber hinaus besteht ein Zielkonflikt zwischen der ECE- und der entsprechenden FMVSS-Regelung. Bei der FMVSS-Regelung sind zeitlich noch längere Prüfbeanspruchungen gefordert.

Durch den statischen Zugtest nach ECE-R 14 werden Strukturen tendenziell überdimensioniert. Dies führt zu mehr Gewicht und höheren Kosten. Abhilfe könnte hier die rechnerische Simulation schaffen. Sie könnte die ECE-R 14 und R 17 ersetzen. Die Erfüllung der Kriterien würden dann in der ECE-R 94 abgeprüft werden. Die Simulation würde mit einem dynamischen Lastfall, bei kleineren Lasten und einem kleineren Zeitfenster durchgeführt werden.

So ergeben sich beispielsweise folgende Problemfelder bei der Anwendung der ECE-R 14:

- Einen kritischen Punkt stellen die Toleranzfelder dar, in denen die Befestigungspunkte nach der Beanspruchung liegen müssen. So erscheint z. B. der einzuhaltende Winkel des unteren Befestigungspunktes als zu klein. Für Kindersitze sind die effektiven Befestigungspunkte in einem zu engen Toleranzfeld angeordnet. Ohne eine Erweiterung dieser Toleranzfelder kann eine verbesserte Rückhaltung der Kinder verhindert werden.
- Bei sitzintegrierten Gurten (z. B. SUV) ergibt sich das Problem, dass die freistehende hintere Sitzbank nach ECE-R 14 in ihrer Neigung eine vertikale Ebene im H-Punkt nicht überschneiden darf. Dadurch müssen die Strukturen sehr steif ausgelegt werden, was zu einer Erhöhung der Belastungen der Insassen führt.
- Gurtintegralsitze haben aufgrund des Gurtzugversuchs bezüglich ihrer Festigkeit überdimensionierte Rückenlehnen. Hier wäre eine kurzzeitige dynamische Prüfung sinnvoller.
- Die Lagefeldanforderungen nach ECE-R 14 sollten bei dynamisch im Frontalaufprall nach ECE-R 94 geprüften Sicherheitsgurten entfallen. Dies ist auch bei den US-Standards FMVSS 210/208 so geregelt. (Dies hätte einen positiven Einfluss auf die an sich wünschenswerte Einführung gurtintegrierter Sitze [Autor])
- Bei Gurten mit Kraftbegrenzer sollten die Gurtverankerungen nicht höher belastet werden als mit dem Kraftniveau des Kraftbegrenzers.

## ECE-R 16

Viele Vorgaben in der ECE-R 16, wie z. B. die Gurtbandbreite, die rote Drucktaste am Gurtschloss, die Gurtbandfestigkeit und die Sperrfunktionen des Retraktors, sind absolut sinnvoll. Darüber hinaus gibt es allerdings Problemfelder, die der Effektivität eines RHS entgegenwirken können. Ein Beispiel stellt der Gurtkraftbegrenzer dar. Seine Zulassung ist nur über eine sehr langwierige und aufwändige Sonderregelung möglich. So werden in der ECE-R 16 ein minimaler und ein maximaler Vorverlagerungsweg definiert. Das widerspricht aber dem physikalischen Prinzip, dem Insassen bei der Interaktion mit dem Airbag einen Vorverla-

gerungsweg zur Verfügung zu stellen, sodass zusätzlich Energie abgebaut werden kann. Die Wirksamkeit muss für die Zulassung des Systems Airbag-Gurt mit Kraftbegrenzer extra nachgewiesen werden.

Es bereitet also Zulassungsprobleme, sobald der Drei-Punkt-Gurt in das Gesamtrückhaltesystem Gurt-Sitz-Airbag integriert wird und Zusatzfunktionen wie der Straffer oder der Kraftbegrenzer eingeführt werden.

### **ECE-R 32-34**

Die ECE-R 32-34 bestehen im Wesentlichen aus vier Teilen:

- Allgemeine Anforderungen an den Einbau des Kraftstofftanks (ECE-R 34),
- Anforderungen an Kunststoffkraftstoffbehälter (ECE-R 34),
- Aufprallversuche zur Leckagebestimmung (ECE-R 34, entsprechen den Aufprallversuchen aus ECE-R 23/33,
- Strukturtests (Front-/Heckaufprallversuche) (ECE-R 32/33).

Denkbar wäre, dass ein Strukturtest mittels rechnerischer Simulation die heutige Regelung der ECE-R 32/33 ersetzt, der aber nicht in der ECE festgeschrieben sein sollte.

Die ECE-R 32-34 sollten nicht aufgewertet oder weiter bearbeitet werden. Dafür sprechen folgende Gründe:

- In der ECE-R 94/95 sind bereits Anforderungen bezüglich der Leckage des Kraftstoffsystem angeführt.
- Die US-Vorschrift FMVSS 301, Anforderungen an die Kraftstoffanlage im Frontal-/Heck-/Seitenaufprall, ist die geläufigere Vorschrift.
- FMVSS 301 wird fortgeschrieben: Künftig muss ein 80-km/h-Heckaufpralltest mit 70%-Überdeckung erfüllt werden.

Die Regelungen ECE-R 32-34 könnten in einer Regelung zusammengefasst werden, in dem zur ECE-R 34 ergänzend Strukturmessungen am Fahrzeug vorgenommen werden.

## **6 Zusammenfassung**

Die schnelle Entwicklung der Sensortechnologie und der Aktuatorik verhalf neuartigen Rückhaltesystemen zum Durchbruch und verbesserte somit den Schutz des Insassen bei Unfällen erheblich. Kommende Generationen adaptiver Rückhaltesysteme werden eine dosierte Aktivierung der Schutzwirkung (z. B. mehrstufige Airbags oder Gurtstraffer) abhängig von der Unfallschwere und der Fahrzeugbesetzung erlauben. Um solche Systeme voll auszunutzen, werden Sensoren entwickelt, die die Schwere eines Unfalls in weitaus höherer Auflösung als bisher erkennen können und somit das Einleiten präventiver Maßnahmen ermöglichen. Diese Systeme werden unter dem Begriff der intelligenten Rückhaltesysteme zusammengefasst.

Ziel des Projektes „intelligente Rückhaltesysteme“ ist es, die möglichen Verbesserungen der passiven Sicherheit durch die neuen Technologien zu analysieren und darzustellen. Außerdem sind die Auswirkungen auf die gesetzlichen Regelungen zu untersuchen, um so einerseits mögliche zusätzliche Schutzpotenziale schnell umzusetzen und eventuelle Risiken zu vermeiden.

In einer umfangreichen Literaturrecherche wurde zum einen das Unfallgeschehen analysiert. Ergänzend wurden die Schwerpunkte des Pkw-Unfallgeschehens durch eine Auswertung von Unfalldaten der GIDAS untersucht und dargestellt. Zum anderen wurde der Stand der Technik heutiger und zukünftiger Rückhaltesysteme aufgearbeitet und systematisiert.

Mit Hilfe des Abgleichs der Schwerpunkte des realen Unfallgeschehens mit den RHS und der bestehenden Gesetzgebung wurden Potenziale und Wirkungsbereiche möglicher Maßnahmen skizziert. Durch eine Expertenbefragung konnten Vorschläge zur Erweiterung der bestehenden Sicherheitsgesetzgebung gemacht werden.

Durch die GIDAS-Unfalldatenauswertung konnten spezielle kritische Bereiche im Unfallgeschehen ausfindig gemacht werden, die es gilt durch geeignete Maßnahmen zu bekämpfen. Hierbei kristallisierten sich bestimmte technische Lösungen als sehr geeignet heraus.

Unter anderem ließ sich Folgendes aus dem GIDAS-Datenmaterial ableiten: Besonders die Erkennung des drohenden Unfalls im Vorfeld hat sich

als eine unabdingbare Voraussetzung für intelligente Rückhaltesysteme erwiesen. Des Weiteren hat sich gezeigt, das zukünftige RHS dem Fußraum noch stärkere Aufmerksamkeit schenken müssen. Hier bedarf es neuer Ansätze, die über die bisherigen hinausreichen.

Gefahrenabhängige Bremsleuchten sind in der Lage, die häufige Unfallursache des Auffahrens auf den Vordermann zu reduzieren. Auch RHS, die mit Umfeldsensorik und Fahrstabilitätssystemen verknüpft, angepasst auf kritische Fahrsituationen reagieren, besitzen das Potenzial, dem folgenschweren Alleinunfall des Pkw entgegenzuwirken. Parallel sollte auch auf eine entsprechende Fahrer- und Verkehrsteilnehmer geachtet werden. Auch die mangelnde Verkehrstüchtigkeit des Fahrers, die häufig zu sehr schweren Unfällen führt, bedarf zukünftiger technischer Lösungen.

Aus der Expertenbefragung lässt sich ableiten, dass die europäische Sicherheitsgesetzgebung einiger Änderungen bedarf, dann allerdings flexibel genug erscheint, auf die Einführung zukünftiger Systeme zu reagieren. So erscheint ein Kompromiss aus Konstruktions- und Wirkvorschrift als eine sinnvolle Entwicklungsrichtung. Dabei würde sich jede Einzelrichtlinie in die Präambel, den Mittelteil mit Abnahmekriterien und die Freistellungsklausel gliedern. Der Zunahme der Komplexität der Prüfungen kann durch die numerische Simulation begegnet werden.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass zukünftige RHS in der Lage sein werden, Problembereiche des Unfallgeschehens des Pkw abzudecken und dadurch zu entschärfen. Grundsätzlich steht der Einführung solcher Systeme seitens der Sicherheitsgesetzgebung nichts im Weg. Es kommt aber stellenweise – auch durch die Überlagerung mit US-amerikanischen und anderen Regelungen – zu Überbestimmungen im Detail, die unnötig aufwändige Lösungen erforderlich machen. Allgemein ist die EU willens, Änderungen bei der Gesetzgebung anzustoßen, die es gestatten sollen, flexibler auf Neuerungen zu reagieren.

## 7 Literatur

- ADOMEIT, H.-D., WILS, O., Heym, A. (1997): Adaptive Gurt-Airbag-Systeme – Eine Analyse des biomechanischen Nutzens, Haus der Technik Essen, Tagung 23./24. April 1997
- APPEL, H., KRABBEL, G. (1994): Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion, 1. Auflage 1994, Verlag INFORMATION Ambis GmbH
- APPEL, H., KRABBEL, G. (1998): Grundsätzliches über die Rückhaltung von Insassen im Pkw, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1/1998
- Auto Technology, (2002): Active Roll Stabilization goes into Series Production, Auto Technology, 1/2002
- ATZ (1), (1997): Mercedes-Benz A-Klasse, Sonderausgabe von ATZ und MTZ, 10/1997
- BAUER, H., LAUCHT, H., WINTERHALDER, M. (1997): Variable Gasgeneratoren, ein Beitrag zur Optimierung von Airbag-Systemen, Haus der Technik e. V., Essen, 1997
- BECKER, K., BIETZ, Th., CASTRO, P., COLE, S., JANSEN, K.-H. (1996): Ford Ka, Automobiltechnische Zeitschrift
- BIRCH, S. (2001): From gullwing to vario roof, Automotive Engineering, 10/2001
- BOCKELMANN, W., LEMKE, H., VOKÁL, P., WINTERKORN, M. (2000): Der neue Skoda Fabia, Automobiltechnische Zeitschrift 102, 1/2000
- CLAAR, K., SZARGOT, P. (2000): Die neue Mercedes-Benz C-Klasse, Automobiltechnische Zeitschrift 102, 7/8 2000
- CRANDALL, J. R., MARTIN, P. G. (1997): Lower Limb Injuries Sustained In Crashes And Corresponding Biomechanical Research, International Symposium On Real World Crash Research, 1997
- DaimlerChrysler, (2001): Sicherheit aus einem Guss, Hightech Report 2001, [www.daimlerchrysler.de/research](http://www.daimlerchrysler.de/research)
- DIETRICH, Chr. (2000): Der BMW Z8, Automobiltechnische Zeitschrift 102, 6/2000
- DISCHINGER, P., HO, S. M., KERNS, T. J., BRENNAN, P. (1996): Patterns Of Injury In Frontal Collisions With And Without Airbags, IRCOBI Conference 1996

- EBELING, H., EISENREICH, N., SCHMID, H. (1996): Entwicklung umweltverträglicher Gasgeneratorsätze für sicherheitstechnische Anwendungen als  $\text{NaN}_3$ - und NC-Alternativen, Bag & Belt 1996
- EDWARDS, M., FAILS, A., DAVIES, H., LOWNE, R., HOBBS, A. (2001): Review of the European Frontal and Side Impact Directives, 17<sup>th</sup> ESV Conference 2001
- Expertenbefragung (2002): Befragung von Experten im Rahmen des Projektes iRHS, 2002
- FAUSEL, J., FISCHER, Th., ROTHFUß, Chr. (1997): smart: Superkompakt und sicher, Innovativer Kfz-Insassen- und Partnerschutz, VDI Berichte 1354
- FENK, J., SCHINDLER, V. (1994): Verfahren zur Optimierung der Wahrnehmbarkeit von Hindernissen für den nachfolgenden Verkehr, Automobiltechnische Zeitschrift 96, 1994
- FELLHAUER, A., HEHL, A., SAPOUNTZIS, S., HEILIG, A. (2001): Ringairbag-Fahrerairbagsystem mit sehr hohem Schutzpotenzial bei In- und Out of Position, VDI Tagung, Berlin 06./07. September 2001
- FRAMPTON, R. J., MORRIS, A. P., THOMAS, P., BODIWALA, G. G. (1997): An Overview Of Upper Extremity Injuries To Car Occupants In UK Vehicle Crashes, IRCOBI Conference 1997
- GIEBLER, W., POHLER, H., SCHILLING, R., SCHRIEVER, T. (1999): Passive Sicherheit des Ford Focus, Sonderausgabe von ATZ und MTZ, 1999
- GORONCY, J. (2002): BMW setzt auf schnellen „Bus“, VDI Nachrichten Nr.20, 2002
- HACKENBERG, U., PAEFGEN Fr.-J. (1997): Der Audi A6, Sonderausgabe von ATZ und MTZ, 3/1997
- HUELKE, D. F., COMPTON, C. P. (1995): Rear seat occupants in Frontal Crashes – adults and children – the effects of restraint systems, IRCOBI Conference 1995
- HIRTH, J., ACKER, D., CARRARO, Th., HEILIG, A. (2001): Out-Of-Position-Betrachtung bei heutigen Seitenairbag-Schutzsystemen, VDI Tagung, Berlin 06./07. September 2001
- IPPEN, H. (2002): Gefahrensignal, AUTO Zeitung Nr. 22, Oktober 2002
- JOST, S., PRIEMER, P. (1997): Response and Vulnerability of the Upper Arm and Shoulder in Static Side Airbag Deployments, Haus der Technik, 23./24.04.1997
- KIMBERLEY, W. (2001): Getting smart on safety, Automotive engineer, 10/2001
- KONG, H., WALTER, E.: Automotive rollover angular rate sensors?. Quelle nicht ermittelt! „Automotive rollovers angular rate sensors“ Henry KONG, Ed Walter von Delphi
- KRAMER, F. (1998): Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen, ATZ-MTZ-Fachbuch, Vieweg-Verlag, 1998
- LANG, H.-P., KNÖDLER, K., KOCHER, P., RÖLLEKE, M., OSWALD, K. (1999): Erweiterte Crashsensierung mit zusätzlichem Beschleunigungssensoren, Radarsensoren und Winkelgeschwindigkeitssensoren, VDI Berichte Nr. 1471, 1999
- LANGWIEDER, K., HUMMEL, Th., MÜLLER, Chr. (1997): Der Airbag im Realunfall: Leistungen und Schwächen – Erkenntnisse aus der Unfallforschung., VDI-Berichte 1354 (1997)
- LANGWIEDER, K., BÄUMLER, H., HUMMEL, Th. (1997) (2): Promoting safety using retrospective large databases, International Symposium on Real World Crash Research (1997)
- LANGWIEDER, K. (1998): RESIKO – Retrospektive Sicherheitsanalyse von Pkw-Kollisionen mit Schwer Verletzten, Institut für Fahrzeugsicherheit des GDV, München, 1998
- LENZ, K.-H. (1997): Insassenschutz im Pkw aus deutscher und europäischer Sicht, VDI-Berichte 1354, 1997
- LÖHLE, U. (1996): Airbag zu den Schutzwirkungen der Sicherungssysteme Airbag und Sicherheitsgurt und ihrer Grenzen -Erkenntnisse aus der Unfallrekonstruktion-, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 6/1996
- MESSNER, G., HÜBNER, W. (1997): Unfallforschung: Konsequenzen für die Auslegung von Rückhaltesystemen, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 7/8/1997
- MICHAELSEN, L., HOFFMANN, R. (1997): Realitätsnahe Entwicklung von adaptiven Rückhaltesystemen durch den Einsatz von anthropome-

- trisch skalierten Insassenmodellen, VDI Berichte 1354, 1997
- MORSINK, P. (2001): Pre-crash sensing for increasing active and passive safety, PSN Conference März 2001
- MOWRY, G., HERBERG, A. (1999): Advanced Occupant Restraint Technology – Inflatable Tubular Torso Restraint (ITTR), VDI-Berichte 1471, 1999
- MÜLLER, C.-F., GRANDEL, J. (2000): Stand und Entwicklung der passiven Pkw-Sicherheit, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 01/2000
- MULTHAUPT, H., PLETSCHE, B. (2001): Mercedes SL, Sonderausgabe von ATZ und MTZ, 10/2001
- NETT, R., SCHINDLER, V. (2001): Aktuelle Forschungsergebnisse zur Kindersicherheit im Pkw, VDI-Berichte 1637, 2001
- NEUPERT, R., LUTTER, G., APPEL, H. (1997) : Airbag mit integriertem Deformationselement ,VDI-Berichte 1354, 1997
- NITSCHKE, S. (2002): Theoretische Untersuchung zur Aktivierung, Steuerung und Regelung von Rückhaltesystemen für den Frontalaufprall, Entwurf zur Dissertation am Fachgebiet Kraftfahrzeuge der TU Berlin, unveröffentlicht
- NÜCHTER, K., SCHMALOHR, U. (2000): Der neue Opel Corsa, Automobiltechnische Zeitschrift 102, 12/2000
- OTTE, D. (1997): Bewertung der im Verkehrsunfallgeschehen auftretenden schwer verletzten und getöteten Pkw-Insassen MAIS 3+, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Heft 1/1997
- OTTE, D. (1992): Verletzungsmuster von Pkw-Insassen bei Unfällen, Haus der Technik Essen, 1992
- OTTE, D., POHLEMANN, T. (1995): Injury mechanisms for pelvis fractures of nearside occupants in lateral car impacts and influences of deformation characteristics, IRCOBI Conference 1995
- ORIZARIS, V., TSCHÄSCHKE, U., RUDOLF, H., QUARG, L. (1998): Mercedes-Benz S-Klasse, Sonderausgabe von ATZ und MTZ, 10/1998
- PETRI, H., POSCH, T., EBERHARDT, H., KLAMSER, H. (1997): Passive Sicherheit des neuen 911 Carrera, Sonderausgabe von ATZ und MTZ, 12/1997
- POLEDNA, S., KROISS, G. (1999): TTP: „Drive by Wire“ in greifbarer Nähe, Fachzeitschrift für industrielle Anwender und Entwickler, Sonderdruck, 14/1999
- PÜTTER, P., LÜDKE, B., RITZL, F. (1998): Passive Sicherheit und Fahrzeugschutz der neuen 3er Baureihe, Sonderausgabe von ATZ und MTZ, 5/1998
- RABE, M. (2002): The Safety Concept of the New Volkswagen Polo, AutoTechnology, 1/2002
- REIM, J., SCHRIEVER, T.: Crash-Kurs, Sonderausgabe von ATZ und MTZ, 200?
- SCHAUB, S., BOSIO, A. C. (1997): Intelligente Rückhaltesysteme für den europäischen Markt, VDI-Berichte 1354, 1997
- SCHICK, G. (2001): Das Netzwerk der passiven Sicherheit, Sonderausgabe der ATZ/MTZ, Nr. 11 2001
- SCHLOTT, S. (1996): Airbag – Die zündende Idee beim Insassenschutz, Verlag moderne Industrie (1996)
- SCHMITZ, A. (1996): Schutzwirkung von Gurt und Airbag bei unterschiedlichen Beifahrer-Sitzpositionen, Bag & Belt '96, 4. Internationales Symposium für Fahrzeuginsassen-Rückhaltesysteme 24.-26. April 1996
- SCHÖNEBURG, R., BACHMANN, R., REMMEN, Th. (2002): Mercedes-Benz-E-Klasse – Sicherheit auf höchstem Niveau, Sonderausgabe ATZ/MTZ, Mai 2002
- Statistisches Bundesamt (2001): Verkehr, Fachserie 8, Reihe 7, Verkehrsunfälle, Metzler-Poeschel Verlag, Stuttgart 2001
- SWEDA, W., PESCHKE, L. (2000): Das Sicherheitskonzept des Audi A2, Sonderausgabe von ATZ und MTZ, 3/2000
- THEINERT, B., SCHEEF, J. (2000): Fahrzeugsicherheit im Audi A4, Sonderausgabe von ATZ und MTZ, 2000
- THOMAS, P. (1997): Strategies to Optimize Car Safety for Real-world Collisions, IRCOBI Conference 1997

- TSCHÄSCHKE, U. (2001): Sidebagsysteme bei Pkw-Seitenkollisionen, Dissertation D83, Technische Universität Berlin
- Uni-Car, Schlussbericht (1983): Der Forschungs-Personenwagen der Hochschularbeitsgemeinschaft IKA Aachen, IFT Berlin, FKFS Stuttgart, FZD Darmstadt, Schlussbericht, Förderungskennzeichen: TV 7985, Darmstadt 1983
- Unter uns, (2002): DEKRA und Winterthur testen Van-Sicherheit, Zeitschrift der DEKRA, August 2002
- VDS-Verband der Schadenversicherer e. V. (1994): Fahrzeugsicherheit 90 – Analyse von Pkw-Unfällen, Grundlagen für künftige Forschungsarbeiten, Büro für Kfz-Technik, München, 1994
- VOGT, R., WITT, P. (1996): Restraint system electronics, Automotive Engineering, August/1996
- Wetter (2002): Klimadaten für München Riem, <http://www.wetter.com>
- WYKES, N. J., on behalf of BAST, TNO, TRL, VOLVO (1998): Accident Analysis For The Review Of The Frontal And Side Impact Directives, Report to the European Commission, 1998
- WECH, L., HUPFER, P., OSTMANN, B. (1993): Unterschiedliche Rückhaltesysteme im Crash-Test, VDI-Berichte Nr. 1046, 1993
- ZANDER, A. (2002): Alternative Sensierungskonzepte zur Seitencrash-Erkennung, Entwurf zur Dissertation am Fachgebiet Kraftfahrzeuge der TU Berlin, unveröffentlicht
- ZANDER, A., PRANG, R. (2001): Alternative Sensing Concepts to Trigger Side Protection Systems, CRASHTech-Conference Nürnberg, 2001

## Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt  
für Straßenwesen

## Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

**1993**

- F 1: Einfluß der Korrosion auf die passive Sicherheit von Pkw  
Faerber, Wobben € 12,50
- F 2: Kriterien für die Prüfung von Motorradhelmen  
König, Werner, Schuller, Beier, Spann € 13,50
- F 3: Sicherheit von Motorradhelmen  
Zellmer € 11,00
- F 4: Weiterentwicklung der Abgassonderuntersuchung  
Teil 1: Vergleich der Ergebnisse aus Abgasuntersuchung und Typ-  
prüfverfahren  
Richter, Michelmann  
Teil 2: Praxiserprobung des vorgesehenen Prüfverfahrens für Fahr-  
zeuge mit Katalysator  
Albus € 13,50

**1994**

- F 5: Nutzen durch fahrzeugseitigen Fußgängerschutz  
Bamberg, Zellmer € 11,00
- F 6: Sicherheit von Fahrradanhängern zum Personentransport  
Wobben, Zahn € 12,50
- F 7: Kontrastwahrnehmung bei unterschiedlicher Lichttrans-  
mission von Pkw-Scheiben  
Teil 1: Kontrastwahrnehmung im nächtlichen Straßenverkehr bei  
Fahrern mit verminderter Tagesschärfe  
P. Junge  
Teil 2: Kontrastwahrnehmung in der Dämmerung bei Fahrern mit  
verminderter Tagesschärfe  
Chmielarz, Siegl  
Teil 3: Wirkung abgedunkelter Heckscheiben - Vergleichsstudie  
Derkum € 14,00
- F 8: Anforderungen an den Kinnschutz von Integralhelmen  
Otte, Schroeder, Eidam, Kraemer € 10,50
- F 9: Kraftschlußpotentiale moderner Motorradreifen unter Stra-  
ßenbedingungen  
Schmieder, Bley, Spickermann, von Zettelmann € 11,00

**1995**

- F 10: Einsatz der Gasentladungslampe in Kfz-Scheinwerfern  
Damasky € 12,50
- F 11: Informationsdarstellung im Fahrzeug mit Hilfe eines Head-  
Up-Displays  
Mutschler € 16,50
- F 12: Gefährdung durch Frontschutzbügel an Geländefahrzeugen  
Teil 1: Gefährdung von Fußgängern und Radfahrern  
Zellmer, Schmid  
Teil 2: Quantifizierung der Gefährdung von Fußgängern  
Zellmer € 12,00
- F 13: Untersuchung rollwiderstandsarmer Pkw-Reifen  
Sander € 11,50

**1996**

- F 14: Der Aufprall des Kopfes auf die Fronthaube von Pkw beim  
Fußgängerunfall – Entwicklung eines Prüfverfahrens  
Glaeser € 15,50
- F 15: Verkehrssicherheit von Fahrrädern  
Teil 1: Möglichkeiten zur Verbesserung der Verkehrssicherheit von  
Fahrrädern  
Heinrich, von der Osten-Sacken  
Teil 2: Ergebnisse aus einem Expertengespräch „Verkehrssicher-  
heit von Fahrrädern“  
Nicklisch € 22,50
- F 16: Messung der tatsächlichen Achslasten von Nutzfahrzeugen  
Sagerer, Wartenberg, Schmidt € 12,50
- F 17: Sicherheitsbewertung von Personenkraftwagen – Problem-  
analyse und Verfahrenskonzept  
Grunow, Heuser, Krüger, Zangemeister € 17,50
- F 18: Bremsverhalten von Fahrern von Motorrädern mit und ohne  
ABS  
Präckel € 14,50
- F 19: Schwingungsdämpferprüfung an Pkw im Rahmen der  
Hauptuntersuchung  
Pullwitt € 11,50
- F 20: Vergleichsmessungen des Rollwiderstands auf der Straße  
und im Prüfstand  
Sander € 13,00
- F 21: Einflußgrößen auf den Kraftschluß bei Nässe  
Fach € 14,00

**1997**

- F 22: Schadstoffemissionen und Kraftstoffverbrauch bei kurzzei-  
tiger Motorabschaltung  
Bugsel, Albus, Sievert € 10,50
- F 23: Unfalldatenschreiber als Informationsquelle für die Unfall-  
forschung in der Pre-Crash-Phase  
Berg, Mayer € 19,50

**1998**

- F 24: Beurteilung der Sicherheitsaspekte eines neuartigen Zwei-  
radkonzeptes  
Kalliske, Albus, Faerber € 12,00
- F 25: Sicherheit des Transportes von Kindern auf Fahrrädern und  
in Fahrradanhängern  
Kalliske, Wobben, Nee € 11,50

**1999**

- F 26: Entwicklung eines Testverfahrens für Antriebsschlupf-  
Regelsysteme  
Schweers € 11,50
- F 27: Betriebslasten an Fahrrädern  
Vötter, Groß, Esser, Born, Flamm, Rieck € 10,50
- F 28: Überprüfung elektronischer Systeme in Kraftfahrzeugen  
Kohlstruck, Wallentowitz € 13,00

**2000**

- F 29: Verkehrssicherheit runderneuerter Reifen  
Teil 1: Verkehrssicherheit runderneuerter Reifen  
Glaeser  
Teil 2: Verkehrssicherheit runderneuerter Lkw-Reifen  
Aubel € 13,00

- F 30: Rechnerische Simulation des Fahrverhaltens von Lkw mit Breitreifen  
Faber € 12,50
- F 31: Passive Sicherheit von Pkw bei Verkehrsunfällen  
Otte € 12,50
- F 32: Die Fahrzeugtechnische Versuchsanlage der BASt – Einweihung mit Verleihung des Verkehrssicherheitspreises 2000 am 4. und 5. Mai 2000 in Bergisch Gladbach € 14,00
- F 33: Sicherheitsbelange aktiver Fahrdynamikregelungen  
Gaupp, Wobben, Horn, Seemann € 17,00

## 2001

- F 34: Ermittlung von Emissionen im Stationärbetrieb mit dem Emissions-Mess-Fahrzeug  
Sander, Bugsel, Sievert, Albus € 11,00
- F 35: Sicherheitsanalyse der Systeme zum Automatischen Fahren  
Wallentowitz, Ehmanns, Neunzig, Weilkes, Steinauer, Bölling, Richter, Gaupp € 19,00
- F 36: Anforderungen an Rückspiegel von Krafträdern  
van de Sand, Wallentowitz, Schrüllkamp € 14,00
- F 37: Abgasuntersuchung - Erfolgskontrolle: Ottomotor – G-Kat  
Afflerbach, Hassel, Schmidt, Sonnborn, Weber € 11,50
- F 38: Optimierte Fahrzeugfront hinsichtlich des Fußgängerschutzes  
Friesen, Wallentowitz, Philipps € 12,50

## 2002

- F 39: Optimierung des rückwärtigen Signalbildes zur Reduzierung von Auffahrunfällen bei Gefahrenbremsung  
Gail, Lorig, Gelau, Heuzeroth, Sievert € 19,50
- F 40: Prüfverfahren für Spritzschutzsysteme an Kraftfahrzeugen  
Domsch, Sandkühler, Wallentowitz € 16,50

## 2003

- F 41: Abgasuntersuchung: Dieselfahrzeuge  
Afflerbach, Hassel, Mäurer, Schmidt, Weber € 14,00
- F 42: Schwachstellenanalyse zur Optimierung des Notausstiegssystems bei Reisebussen  
Krieg, Rüter, Weißgerber € 15,00
- F 43: Testverfahren zur Bewertung und Verbesserung von Kinderschutzsystemen beim Pkw-Seitenaufprall  
Nett € 16,50
- F 44: Aktive und passive Sicherheit gebrauchter Leichtkraftfahrzeuge  
Gail, Pastor, Spiering, Sander, Lorig € 12,00

## 2004

- F 45: Untersuchungen zur Abgasemission von Motorrädern im Rahmen der WMTC-Aktivitäten  
Steven € 12,50
- F 46: Anforderungen an zukünftige Kraftrad-Bremssysteme zur Steigerung der Fahrsicherheit  
Funke, Winner € 12,00
- F 47: Kompetenzerwerb im Umgang mit Fahrerinformationssystemen  
Jahn, Oehme, Rösler, Kreams € 13,50

- F 48: Standgeräuschmessung an Motorrädern im Verkehr und bei der Hauptuntersuchung nach § 29 STVZO  
Pullwitt, Redmann € 13,50
- F 49: Prüfverfahren für die passive Sicherheit motorisierter Zweiräder  
Berg, Rücker, Mattern, Kallieris € 18,00
- F 50: Seitenairbag und Kinderrückhaltesysteme  
Gehre, Kramer, Schindler € 14,50
- F 51: Brandverhalten der Innenausstattung von Reisebussen  
Egelhaaf, Berg, Staubach, Lange € 16,50
- F 52: Intelligente Rückhaltesysteme  
Schindler, Kühn, Siegler € 16,00

---

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10  
D-27511 Bremerhaven  
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0  
Telefax: (04 71) 9 45 44 77  
Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.