

Aktive Systeme der passiven Fahrzeugsicherheit

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 90

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Aktive Systeme der passiven Fahrzeugsicherheit

**Bewertung im Rahmen einer
Prüfvorschrift zum
Fußgängerschutz**

von

Frederic Nuß
Lutz Eckstein
Lutz Berger

Institut für Kraftfahrzeuge (ika)
RWTH Aachen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 90

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, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die Berichte der BAST zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de/benutzung>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 82.350/2008

Bewertung von aktiven Systemen der passiven Fahrzeugsicherheit im Rahmen einer Prüfvorschrift zum Fußgängerschutz

Fachbetreuung

Oliver Zander

Herausgeber

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

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9307

ISBN 978-3-95606-051-9

Bergisch Gladbach, November 2013

Kurzfassung – Abstract

Aktive Systeme der passiven Fahrzeugsicherheit

Aktive Systeme der passiven Fahrzeugsicherheit zum Fußgängerschutz, so genannte crash-aktive Fußgängerschutzsysteme, werden seit 2005 zur Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen (siehe Verordnung (EG) Nr. 78/2009 und 631/2009) in Serienfahrzeugen eingesetzt. Diese crash-aktiven Fußgängerschutzsysteme stellen im Gegensatz zu den rein passiven Systemen nur eine instationäre Lösung dar. Da die innerhalb der gesetzlichen Anforderungen definierten Testverfahren zur Bewertung stationärer Systeme entwickelt wurden, können derzeit mögliche Risiken instationärer Systeme nicht berücksichtigt werden.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes soll ein Bewertungsverfahren für diese crash-aktiven Fußgängerschutzsysteme entwickelt werden, welches das reale Potenzial dieser Systeme möglichst gut wiedergibt. Basis hierfür soll eine umfangreiche Untersuchung zusätzlicher Risiken bilden.

Die hier untersuchten instationären Schutzmaßnahmen werden nur im Falle eines Fahrzeuganpralls gegen Fußgänger aktiviert, der daher zuverlässig erkannt werden muss. Für die hierfür eingesetzten kontaktbasierten Sensorsysteme stellen Fußgänger mit geringen Lasteinträgen in die Fahrzeugfront eine große Herausforderung dar. Die Lasteinträge hängen von zahlreichen Faktoren, wie bspw. der Höhe der entsprechenden Krafteinleitungspfade sowie der Größe und dem Gewicht des Fußgängers, ab. Mithilfe von umfangreichen Anprallversuchen und -simulationen wird gezeigt, dass die bisher eingesetzten Prüfkörper nur zum Teil für die Erfüllung dieser Anforderungen geeignet sind. Für ein geeignetes Prüfverfahren müssen daher neue Prüfkörper entwickelt werden.

Durch die Aktivierung der Schutzmaßnahme soll bei den crash-aktiven Systemen vor allem das Verletzungsrisiko beim Kopfanprall verringert werden. Hierfür wird häufig die hintere Motorhaubenkante angehoben, um zusätzlichen Deformationsfreiraum zur Verfügung zu stellen. Die Haubenanhebung kann jedoch auch in zusätzlichen Verletzungsrisiken resultieren, bspw. durch die exponierte hintere Haubenkante oder die Verringerung des Deformationsfreiraums infolge des Oberkörperanpralls.

Ein Ersatzprüfverfahren zur Bewertung der Haubendeformation mithilfe des Hüftimpaktors wird vorgestellt.

Ein hybrides Testverfahren bestehend aus Simulation und Versuch eignet sich für eine objektive Bewertung dieser Systeme, wobei die entsprechenden Versuchsparameter mithilfe der vorherigen Simulation bestimmt werden können.

Active systems of passive vehicle safety

Active systems of the passive vehicle safety for pedestrian protection, so called crash-active pedestrian protection systems, are installed in series vehicles since 2005 to fulfill relevant pedestrian protection requirements (compare regulation (EC) No. 78/2009 and 631/2009). These crash-active pedestrian protection systems act in contrast to solely passive systems only as non-stationary solution. Since, the requirements defined within these directives were developed for stationary systems, potential additional risks of these non-stationary systems could currently not be considered.

Within the framework of this research project an evaluation procedure for these crash-active pedestrian protection systems shall be developed. As a basis, a comprehensive investigation of potential additional requirements for valid test procedures shall be conducted.

The regarded non-stationary protection methods are only activated in case of a vehicle collision with a pedestrian, which has to be detected reliably. For the contact-based sensors used for this application the detection of pedestrians inducing a small load in the vehicle front is very challenging. These loads depend on numerous parameters, like the height of the load paths inducing the force or the height and the weight of the pedestrian. By conducting comprehensive impact tests and simulations, it is shown that existing test objects cannot fulfill these requirements. Therefore, new test objects have to be developed for a suitable evaluation procedure.

With the activation of the protection device these crash-active systems aim to reduce the injury risk of

the head impact mainly. For this purpose, the rear bonnet edge is raised in most cases to provide additional deformation space. However, raising the bonnet can also result in additional injury risks, for example due to the exposed rear bonnet edge or the reduction of the deformation space resulting from the impact of the torso of the pedestrian. A substitute test procedure for evaluating the bonnet deformation with the upper leg impactor is presented.

A hybrid test procedure consisting of simulation and testing is suitable for an objective evaluation of these systems. The corresponding testing parameters can be evaluated with the prior simulation.

Inhalt

Abkürzungen	6	3.1.7 Auswahl relevanter Fußgänger- klassen	41
1 Einleitung	7	3.1.8 Bestimmung der Fußgängerklassen mit den geringsten Lasteinträgen im Falle eines Anpralls	42
2 Literaturrecherche zum Stand der Technik crash-aktiver Systeme	8	3.1.9 Vergleich von Fußgängerklassen mit geringen Lasteinträgen zu Lower- Limit-Impaktoren	47
2.1 Sensorische und aktuatorische Systeme	8	3.2 Notwendige Anforderungen zur Verringerung des Verletzungsrisikos beim Kopfanprall	47
2.1.1 Kontaktfreie Sensorik	8	3.2.1 Einfluss des Fußgängeroberkörpers auf das Schutzpotenzial crash-aktiver Hauben	48
2.1.2 Kontaktbasierte Sensorik	9	3.2.2 Definition des minimal notwendigen Deformationsfreiraumes	52
2.1.3 Relevante Anforderungen für Prüf- verfahren sensorischer Systeme	13	3.2.3 Bestimmung des durchschnittlichen Abstandes zwischen Oberkörper- und Kopfanprall	52
2.1.4 Aktuatorik	13	3.2.4 Auslegung eines Ersatzprüf- verfahrens	53
2.1.5 Relevante Anforderungen für Prüf- verfahren aktuatorischer Systeme	16	4 Erarbeitung eines Prüfverfahrens für crash-aktive Fußgänger- schutzsysteme	56
2.1.6 Sensorische und aktuatorische Systeme in Serienfahrzeugen	16	4.1 Anwendungsbereich	56
2.2 Analyse der Methodik und Eignung veröffentlichter Testverfahren	18	4.2 Berücksichtigung einer möglichst realen Unfallkinematik	56
2.2.1 Prüfkörper zur Bewertung kontakt- basierter Erkennungssensorik	18	4.3 Definition der Versuchsrand- bedingungen mithilfe von Ganzkörpersimulationen	60
2.2.2 Prüfmethode zur Bewertung des Kopfverletzungsminderungspoten- zials crash-aktiver Systeme	21	4.4 Nachweis der korrekten Funktions- weise kontaktbasierter Fußgänger- erkennung	62
2.2.3 Analyse existierender Ansätze zur Bewertung crash-aktiver Systeme	23	4.4.1 Integration der Ergebnisse aus den Ganzkörpersimulationen	62
3 Anforderungen an Sensorik und Aktuatorik crash-aktiver Systeme	27	4.4.2 Überprüfung der Auslösung bei geringen Lasteinträgen	62
3.1 Entwicklung eines Anforderungs- katalogs für kontaktbasierte Fuß- gängererkennungssysteme	27	4.4.3 Überprüfung der Auslösung bei hohen Lasteinträgen	63
3.1.1 Entwicklung eines Ersatzfahrzeug- modells zur Abbildung relevanter Fahrzeugkategorien	28	4.4.4 Überprüfung der Aufstellodynamik	63
3.1.2 Aufbau eines Simulationsmodells	32	4.4.5 Zusammenfassung der Sensor- überprüfung	64
3.1.3 Vorbereitung entsprechender Validierungsversuche	34	4.5 Bewertung des Deformations- freiraums	65
3.1.4 Versuchsergebnisse	35	4.6 Bewertung des Kopfverletzungs- risikos	66
3.1.5 Validierung des Simulationsmodells	38		
3.1.6 Einfluss verschiedener Frontsteifig- keiten	39		

4.6.1	Bestimmung der Versuchsrandbedingungen	66	A	Fahrzeuge der Kategorie A (Sedan)
4.6.2	Auswahl der Anprallpunkte für die Kopfimpaktorversuche	67	APROSYS	Advanced PROtection SYStems
4.6.3	Durchführung der Anprallversuche	68	B	Fahrzeuge der Kategorie B (SUV)
4.6.4	Bewertung zusätzlicher - Verletzungsrisiken	69	BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
4.7	Ablaufplan des Testverfahrens	70	C	Fahrzeuge der Kategorie C (One-Box)
5	Ergebnisse einer Expertenbefragung	71	D	Fahrzeuge der Kategorie D (Sportwagen)
5.1	Bewertung Sensorik	71	DMS	Dehnmessstreifen
5.1.1	Allgemeine Anmerkungen zu den Versuchsergebnissen	71	EPP	Expandiertes Polypropylen
5.1.2	Diskussion des Lasteintrags der Versuchsergebnisse	71	Euro NCAP	European New Car Assessment Programme
5.1.3	Berücksichtigung entsprechender Worst-Case-Szenarien	72	FEM	Finite-Elemente-Methode
5.1.4	Einbeziehung relevanter Menschmodelle	72	IEE	International Electronics & Engineering S. à r. l.
5.1.5	Auswahl der Lower-Limit-Impaktoren	72	ika	Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen University
5.2 -	Kopfaufprall/Bewertung Schutzpotenzial	73	MADYMO	MAthematical DYnamic Models
5.2.1	Analyse möglicher zusätzlicher Verletzungsrisiken	73	MKS	Mehrkörpersystem
5.2.2	Prüfverfahren zur Berücksichtigung der Haubendeformation	73	PDI	Pedestrian Detection Impactor
5.2.3	Dynamische Kopfanprallversuche	74	PMTO	Post Mortal Test Objects
6	Zusammenfassung	74	SUV	Sport Utility Vehicle
7	Datensammlung	77	TeenM	Männlicher Teenager
8	Literatur	87	THUMS	Total Human Model of Safety

Abkürzungen

3yo	3-jähriges Kind
05f	5%-Frau
05m	5%-Mann
6yo	6-jähriges Kind
12yo	12-jähriges Kind
50m	50%-Mann
95m	95%-Mann

Formelzeichen

d	Abstand [mm]
F	Kraft [N]
h	Höhe [mm]
m	Masse [kg]
s	Weg [mm]
t	Zeit [s]
v	Versatz [mm]

Indizes

eff	effektiv
max	maximal
mL	mittlerer Lastpfad
oL	oberer Lastpfad
uL	unterer Lastpfad
x	x-Richtung
y	y-Richtung
z	z-Richtung

1 Einleitung

Die Hauptursache für lebensbedrohliche Verletzungen eines Fußgängers bei einer Kollision mit einem Fahrzeug ist der Kopfanprall. Diese Erkenntnis wurde bereits vor mehr als 20 Jahren gewonnen (vgl. bspw. (EEVC, 1991)). Um das Verletzungsrisiko zu verringern, können verschiedene Schutzmaßnahmen in das Fahrzeug integriert werden. Eine dieser Maßnahmen sind so genannte crash-aktive Systeme wie bspw. aufstellende Motorhauben, die im Falle einer Fußgänger-Kollision zusätzlichen Deformationsfreiraum zur Verfügung stellen.

Anforderungen an den Fußgängerschutz sind für neue Fahrzeugmodelle auf dem europäischen Markt seit Einführung der zweistufigen EU-Richtlinie 2003/102/EG verbindlich. Die hierbei verwendeten Prüfverfahren sehen nur eine Prüfung von passiven Systemen vor. Eine Prozedur zur Bewertung crash-aktiver Systeme, die 2005 erstmals in ein Serienfahrzeug (Jaguar XK) implementiert wurden, wird nicht beschrieben.

In den beiden vorangegangenen Forschungsprojekten der BAST, FE 82.0229/2002 „Schutz von Fußgängern beim Scheibenaufprall“ und FE 82.308/2006 „Schutz von Fußgängern beim Scheibenanprall II“ wurde ein modulares Prüfverfahren für den Kopfaufprall im Bereich der Windschutzscheibe, bestehend aus Versuchs- und Simulationsteil, erarbeitet, mit welchem auch crash-aktive Systeme bewertet werden können. Im Fokus dieses modularen Prüfverfahrens stehen vor allem der Kopfanprall und die Bewertung des hiermit verbundenen Verletzungsrisikos. Innerhalb dieses Forschungsprojektes soll nun das Prüfverfahren um eine Bewertung der kontaktbasierten Erkennungssensorik sowie der Verletzungsrisikobewertung des Kopfanpralls gegen die Motorhaube erweitert werden.

Crash-aktive Systeme zur Erhöhung der Fußgängersicherheit detektieren den Unfallgegner mithilfe geeigneter Sensoren und aktivieren das Schutzsystem, falls der Unfallgegner als Fußgänger charakterisiert wird. Hierfür werden derzeit aufgrund der höheren Zuverlässigkeit hauptsächlich kontaktbasierte Sensoren eingesetzt. Falls der Fußgänger nicht detektiert werden kann, wird das Schutzsystem nicht aktiviert. Im Rahmen eines entsprechenden Bewertungsverfahrens soll daher die korrekte Funktionsweise der Sensorik überprüft werden.

Neben der Sensorik umfassen crash-aktive Systeme auch eine Aktuatorik zur Aktivierung der Schutzmaßnahmen. Aktuatorische Systeme umfassen neben den im Rahmen des Vorgängerprojektes untersuchten externen Airbags auch aufstellende Motorhauben. Innerhalb des in der vorliegenden Untersuchung zu erarbeitenden Bewertungsverfahrens sollen mögliche zusätzliche Verletzungsrisiken der aktuatorischen Systeme berücksichtigt werden.

Basierend auf einer umfangreichen Literatur- und Patentrecherche in Kapitel 2 wird der aktuelle Stand der Technik der sensorischen und aktuatorischen Systeme analysiert. Hierbei werden bereits Kriterien zur Bewertung der verschiedenen Systeme ausgewählt, die bei der Erarbeitung des Bewertungsverfahrens aufgegriffen werden. Des Weiteren werden die Methodik und die Eignung bereits veröffentlichter Testverfahren untersucht, um sinnvolle Ansätze aufzunehmen und eventuelle Schwachstellen aufzeigen zu können.

Anschließend werden in Kapitel 3 die Anforderungen an Sensorik und Aktuatorik crash-aktiver Systeme beschrieben. Hierfür werden zunächst ein Anforderungskatalog für kontaktbasierte Fußgängererkennungssysteme sowie entsprechende Worst-Case-Szenarien mithilfe umfangreicher Simulationen erarbeitet. Durch einen Vergleich der Lasteinträge dieser Szenarien mit den Lasteinträgen aktuell verfügbarer Prüfkörper kann eine Empfehlung für die zu verwendenden Prüfkörper gegeben werden. Des Weiteren werden die zur Verringerung des Verletzungsrisikos beim Kopfanprall notwendigen Anforderungen erarbeitet und beschrieben.

In Kapitel 4 wird die Entwicklung des Prüfverfahrens für crash-aktive Fußgängerschutzsysteme beschrieben. Neben den Erkenntnissen der Vorgängerprojekte werden hier speziell die Ausarbeitung einer Bewertungsmöglichkeit kontaktbasierter Sensorsysteme zur Fußgängererkennung sowie eine anforderungsgerechte Berücksichtigung dynamischer Schutzsysteme erläutert.

Ein Großteil der Ergebnisse des vorliegenden Projektes wurde im Rahmen einer Expertenrunde des VDA sowie von Vertretern der Hersteller der verschiedenen Lower-Limit-Impaktoren vorgestellt und diskutiert. Die Kommentare dieses Treffens werden in Kapitel 5 diskutiert.

Abschließend erfolgen eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick auf zukünftige Forschungsschwerpunkte in Kapitel 6.

2 Literaturrecherche zum Stand der Technik crash-aktiver Systeme

Im Rahmen einer Literatur- und Patentrecherche zum Stand der Technik werden in diesem Kapitel die Themengebiete „Fahrzeugsysteme“ und „Testverfahren“ behandelt. Crash-aktive Systeme, bestehend aus Sensorik zur Fußgängererkennung und Aktuatorik zur Aufstellung bzw. Entfaltung der Schutzvorrichtung, sind seit 2005 in Serienfahrzeugen erhältlich. Sowohl Hersteller als auch Zulieferer verfolgen verschiedene Lösungsansätze, um die hohen Anforderungen hinsichtlich zuverlässiger Erkennung bei kurzen Auslösezeiten verbunden mit einer Verringerung des Verletzungspotenzials zu erfüllen. Kapitel 2.1 gibt einen Überblick über die derzeitige Entwicklung dieser Fahrzeugkomponenten. Bei der Erstellung eines Prüfverfahrens für crash-aktive Systeme ist eine Bewertung beider Komponenten zu berücksichtigen. Zur reinen Überprüfung der Sensorik werden bei bereits vorgestellten Bewertungsansätzen so genannte Lower-Limit-Impaktoren eingesetzt (siehe Kapitel 2.2.1). Weitere Vorschläge für eine ganzheitliche Bewertung der Schutzvorrichtung crash-aktiver Systeme werden in Kapitel 2.2.2 detailliert aufgeführt und diskutiert.

2.1 Sensorische und aktuatorische Systeme

In den Kapiteln 2.11 bis 2.1.6 werden existierende crash-aktive Fußgängerschutzsysteme zusammengestellt sowie deren zukünftiges Potenzial bewert-

tet. Dabei werden die Systeme anhand ihrer Funktionsweise in die zwei wesentlichen Komponenten Sensorik und Aktuatorik unterteilt.

Sensorsysteme zur Fußgängererkennung können in kontaktbasierte und kontaktfreie Sensoren unterteilt werden (siehe Bild 1). Kontaktbasierte Sensorsysteme klassifizieren das Anprallobjekt anhand der vorliegenden Stoßcharakteristik und werden bereits in gegenwärtig auf dem Markt verfügbaren Fahrzeugen eingesetzt, weshalb diese Systeme im Fokus der nachfolgenden Untersuchung stehen. Kontaktfreie Sensorsysteme ermöglichen eine Fußgängerdetektion bereits vor dem eigentlichen Anprall. Technologische Weiterentwicklungen bezüglich Datenerfassung und -auswertung begünstigen den Einbau kontaktfreier Sensoren in zukünftige Fahrzeugmodelle.

2.1.1 Kontaktfreie Sensorik

Typische kontaktfreie Sensorsysteme zur Erkennung einer Fußgängerollision umfassen Radarsensoren, Laserscanner, Infrarot- sowie Videokameras. Darüber hinaus sind so genannte „Car2x“-Systeme im Gespräch, bei denen die Erkennung des Umfelds mit „Radio Frequency Identification“- (RFID-)Transpondern erfolgt.

Verglichen mit reflektionsbasierten Radar-, Laser- und Ultraschallsensoren liefern Infrarot- und Videokamerasysteme wesentlich mehr Informationen über den Fußgänger sowie über das Umfeld. Jedoch ist bei diesen Systemen eine weitere Bearbeitung bzw. Auswertung der Signale zwingend erforderlich. Um eine eindeutige Fußgängerklassifizie-

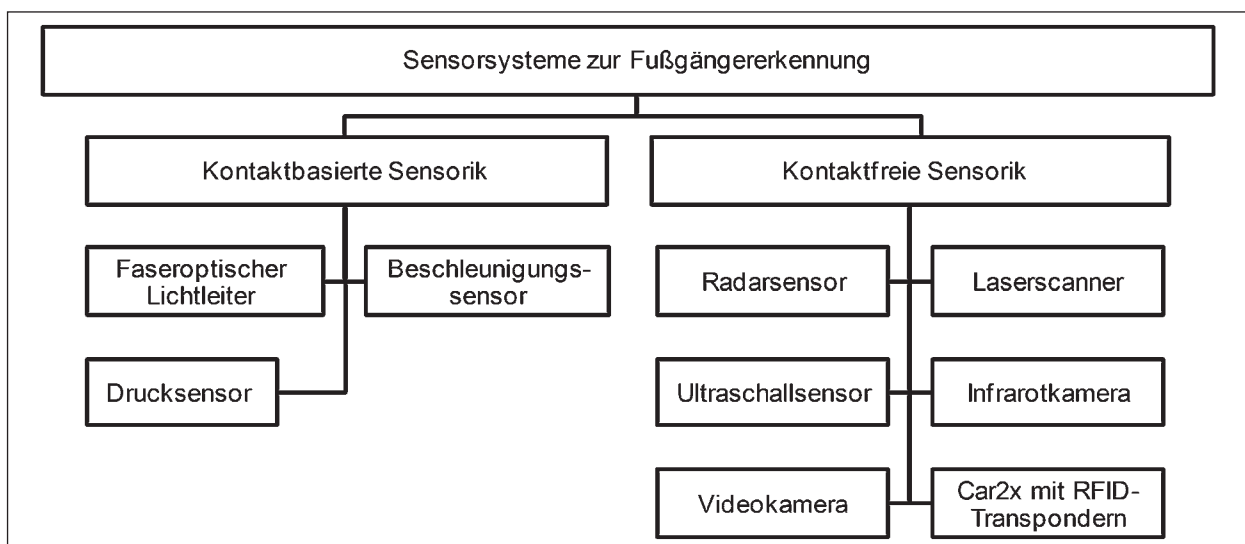


Bild 1: Charakterisierung existierender Einzelsensorsysteme zur Fußgängererkennung (Sensorfusion möglich)

zung zu ermöglichen, reicht der Einsatz von Radar- bzw. Lasersensoren nicht aus. Sie liefern jedoch exakte Aussagen bezüglich Position und Bewegung der Fußgänger, die den Detektionsalgorithmus unterstützen können. Da die genannten Systeme verschiedene Eigenschaften aufweisen, werden sie üblicherweise in Kombination (bspw. Radarsensor und Videokamera) eingesetzt. Der Einsatz von Fußgängererkennungssystemen mithilfe von RFID-Transpondern ermöglicht zwar eine sichere Fußgängererkennung mit relativ simplen Algorithmen, detektiert jedoch nur Fußgänger, die den RFID-Transponder bspw. integriert in Mobiltelefonen oder in Kleidungsstücken mit sich tragen (KÜHN, 2007; HUANG, 2010).

2.1.2 Kontaktbasierte Sensorik

Kontaktbasierte Sensorsysteme detektieren und charakterisieren einen Fußgängeranprall nur im Falle einer Kollision. Unfallvermeidende Systeme können mit diesen Sensoren somit nicht realisiert werden. Damit das zu aktivierende Schutzsystem zum Zeitpunkt des Kopfanpralls vollständig aufgestellt bzw. entfaltet ist, müssen kontaktbasierte Sensorsysteme über eine sehr kurze Sensierzeit verfügen. Daher werden kontaktbasierte Systeme in einem Bereich integriert, in welchem erwartungsgemäß der erste Kontakt zwischen Fahrzeug und

Fußgänger stattfindet. Dieser befindet sich bei vielen Fahrzeugen im Bereich des Stoßfängers. Die in diesem Bereich verwendeten Materialien (bspw. Energieabsorptionsschäume) besitzen ein temperaturabhängiges Verhalten, was jedoch durch geeignete Systemauslegung berücksichtigt werden kann (HUANG, 2008). Im Vergleich zur kontaktfreien Sensorik sind die meisten kontaktbasierten Systeme derzeit kostengünstiger und gegen äußere Umwelteinflüsse (bspw. schlechte Wetterbedingungen) resistent. Zur Gruppe der kontaktbasierten Sensoren zählen optische Lichtleiter, Beschleunigungs- sowie Drucksensoren.

Zu den optischen Lichtleitern zählen neben den klassischen faseroptischen Lichtwellenleitern auch so genannte Hohlraumsensoren. Beim Lichtwellenleiter wird an einem Ende Licht eingekoppelt und am anderen Ende die Intensität des austretenden Lichts mit einem Detektor gemessen. Während optische Fasern normalerweise mit einem reflektierenden Mantel zur Minimierung des Lichtverlusts umhüllt sind, wird dieser Mantel für Anwendungen der Fußgängererkennung teilweise entfernt (siehe Bild 2). In den sensitiven Bereichen, die nicht vom Mantel umhüllt sind, kann das eingebrachte Licht abhängig von der Biegebelastung der Fasern austreten. Somit kann durch das detektierte Licht die Deformation charakterisiert werden. Gemäß dem in Bild 2 dargestellten Prinzip kann neben der reinen Dämpfung der Lichtintensität auch eine Aussage über die Biegerichtung getroffen werden. Befindet sich der sensitive Bereich auf der Innenseite der Biegung, wird weniger Licht detektiert.

Faseroptische Lichtwellenleiter werden entweder in den Energieabsorptionsschaum integriert (siehe Bild 3) oder möglichst verdeckt an der Außenhaut des Stoßfängers angebracht. Da die im Frontende üblicherweise verwendeten Materialien bei zunehmender Temperatur elastischer werden, sind die innerhalb des Sensorelements ermittelten Signalverläufe temperaturabhängig. Um dieses Verhalten zu kompensieren, werden Offset-Regelungen in der Auswertesoftware berücksichtigt.

Ein weiteres, auf optischen Lichtleitern basierendes Sensorprinzip ist der so genannte Hohlraumsensor. Hierbei wird in einem lichtdurchlässigen Schaumstoff ein Sender (Lichtquelle) positioniert, welcher in die Umgebung streut. Der Radius dieses virtuellen Hohlraums entspricht in etwa der charakteristischen Streulänge C_{SL} . Dieser Wert hängt vom Streu- und Absorptionsverhalten des Werkstoffs ab.

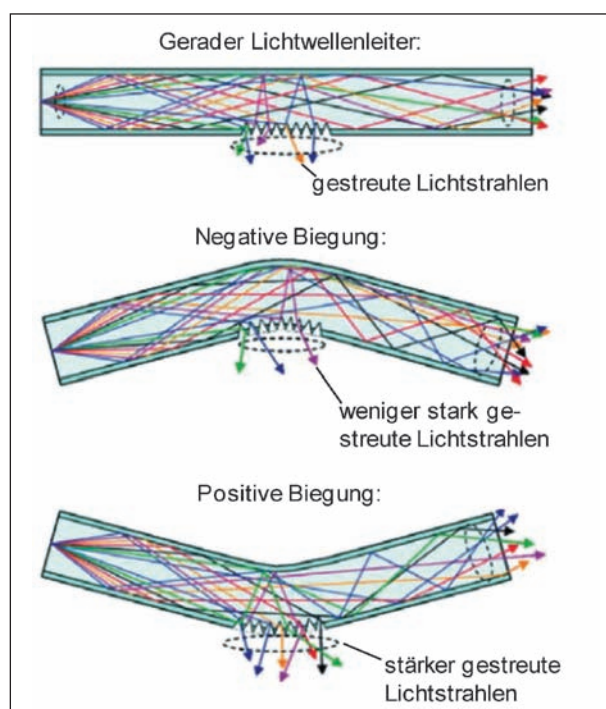


Bild 2: Physikalischer Effekt der Laser-Perforation an einem Lichtwellenleiter (MIEDREICH, 2005)

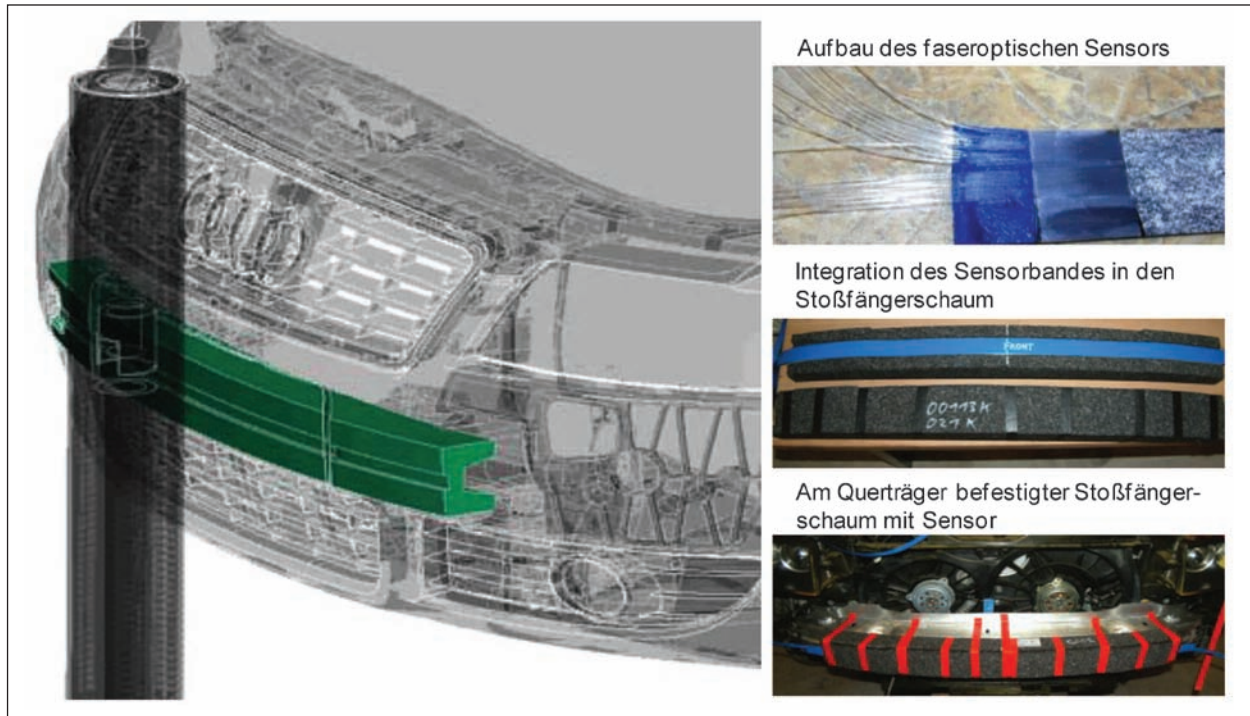


Bild 3: Aufbau und Fahrzeugintegration eines Lichtwellenleiters (SCHERF, 2005)

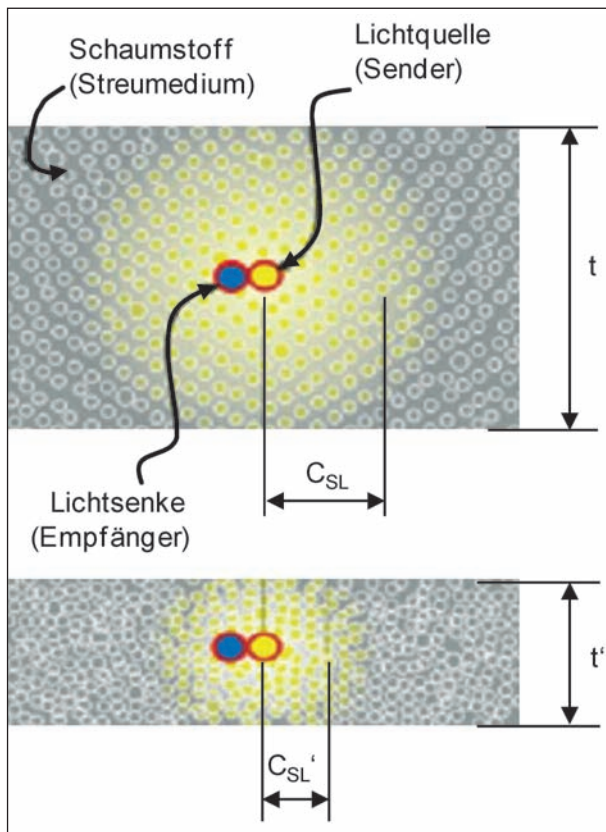


Bild 4: Prinzip des Hohlraumsensors (BACH, 2006)

In unmittelbarer Nähe des Senders ist ein Empfänger (Lichtsenke) platziert, der die gestreute Strahlungsenergie erfasst. Wird der Schaumstoff mit der

Dicke t von außen durch einen Druck auf die Dicke t' gestaucht, so ändert sich das Streuverhalten (siehe Bild 4). Der Empfänger im Inneren des Hohlraums registriert somit eine höhere Lichtintensität. Ist zudem die Stauchhärte des Schaumstoffs bekannt, so können die ausgeübte Kraft bzw. der Druck bestimmt werden.

Beschleunigungen können mit verschiedenen Verfahren bestimmt werden. Bei Feder-Masse-Systemen werden bspw. die auf eine seismische Masse wirkenden Kräfte anhand des ersten Newton'schen Axioms bestimmt. Bei einem weiteren Prinzip wird die gemessene Geschwindigkeit mithilfe der Differenzialrechnung in eine Beschleunigung umgewandelt. Verschiedene Bauformen von Beschleunigungssensoren sind beispielhaft in Bild 5 dargestellt.

Durch Auswertungen der auf ein Fahrzeug wirkenden Beschleunigungen können schnelle Richtungsänderungen eines Fahrzeuges analysiert werden. Beschleunigungssensoren werden daher bereits zur Erfassung der Längs- und Querdynamik bspw. in Form von mikromechanischen Beschleunigungssensoren zur Aktivierung von Airbagsystemen oder piezoelektrischen Beschleunigungssensoren zur Kontrolle der Querbeschleunigung eingesetzt. In der Regel werden diese Beschleunigungssensoren an Strukturbauteilen angebracht, da somit die Bewegung der gesamten Karosserie berücksichtigt wird.

Beschleunigungssensoren können auch zur Erkennung eines Fußgängeranpralls eingesetzt werden. Hierfür werden meist mehrere (zwei bis drei) dieser Sensoren in die Fahrzeugfront integriert. Die Positionierung erfolgt hierbei entweder im Bereich des Energieabsorptionsschaums, da hier die größten Verformungen zu erwarten sind, oder, wie in Bild 6 dargestellt, am vorderen Querträger zur Beobachtung der in diesem Bereich auftretenden hochfrequenten Schwingungen (TILP, 2005).

Die Klassifizierung des Anprallobjekts erfolgt beim Einsatz von Beschleunigungssensoren mithilfe verschiedener Prinzipien. Zum einen kann die maximale Beschleunigung herangezogen werden, welche, kombiniert mit dem Beschleunigungsverlauf, einen Aufschluss über die Steifigkeit des Anprallgegners in Form eines gewichtsäquivalenten Signals gibt (NAGATOMI, 2005). Zum anderen können komplexe Algorithmen, wie in Bild 8 dargestellt, zur Fußgängererkennung eingesetzt werden.



Bild 5: Bauformen verschiedener Beschleunigungssensoren

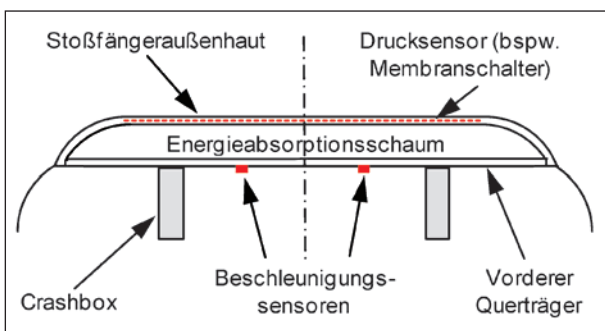


Bild 6: Integration von Beschleunigungssensoren und Membranschalter (FREDRIKSSON, 2001)

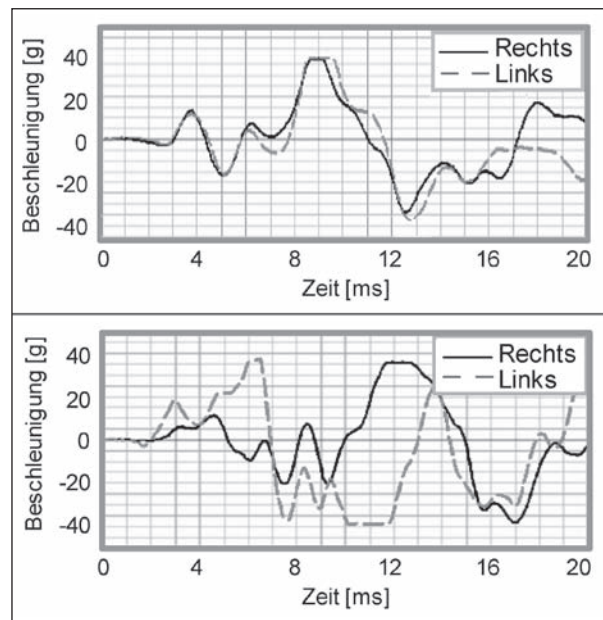


Bild 7: Verlauf des Beschleunigungssignals für einen Beinprall an der Fahrzeugmitte (oben) und am linken Ende des Stoßfängers (unten) (LEE, 2007)

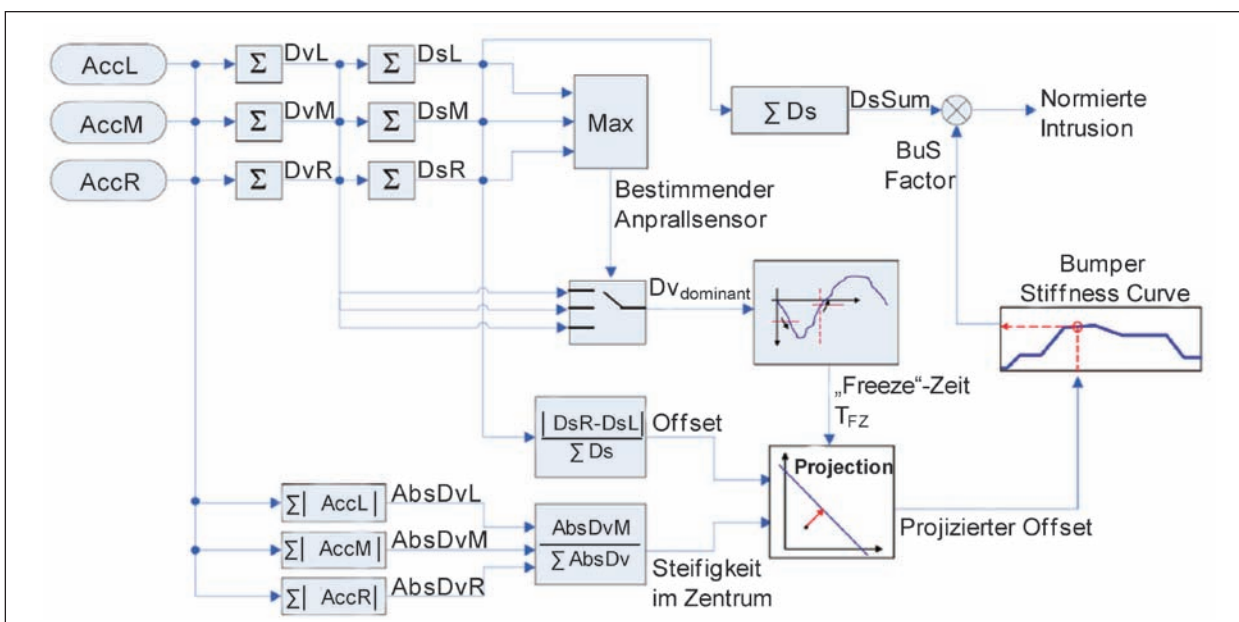


Bild 8: Erkennungsalgorithmus (PARK, 2011)

In beiden Fällen werden nur zwei bis drei über der Fahrzeugbreite verteilte Sensoren in das Fahrzeug integriert. Da das aufgezeichnete Anprallsignal hierbei sehr stark vom Anprallort abhängt (siehe Bild 7), müssen entsprechende Korrekturfaktoren berücksichtigt werden. Zur Bestimmung dieser Korrekturfaktoren können Beschleunigungssensoren mit Kontaktsensoren (wie bspw. Membranschaltern) kombiniert werden (LEE, 2007). Durch Integration eines komplexeren Auswertalgorithmus (siehe bspw. Bild 8) können diese Korrekturfaktoren auch ohne Kontaktsensoren ermittelt werden. In diesem Fall werden die Beschleunigungsverläufe sowie die durch Integration bestimmten Geschwin-

digkeits- und Intrusionsverläufe miteinander verglichen und ausgewertet. Der in PARK (2011) beschriebene, am Stoßfänger ermittelte Steifigkeitsverlauf (engl. „Bumper Stiffness Curve“) dient bspw. zur Abschätzung der Masse und daher der Charakterisierung des Anprallobjekts.

Drucksensoren existieren in verschiedenen Komplexitätsgraden. Sehr einfache Lösungen, wie bspw. Membranschalter, registrieren lediglich den eigentlichen Kontakt zur Bestimmung der Anpralldimension. Komplexere Systeme können auch die Kontaktkraft bestimmen und somit eine Klassifizierung durchführen.

So genannte Force-Sensing-Resistor-Sensoren (engl. kraftabhängiger Widerstand), die im Folgenden als FSR-Sensoren bezeichnet werden, registrieren Widerstandsänderungen in mit Druck bzw. Kraft belasteten Bereichen (siehe Bild 9). Bei Kräfteinleitung werden zwischen den Elektroden Widerstandsbrücken aufgebaut. Je höher die eingeleitete Kraft ist, desto mehr Widerstandsbrücken werden geschlossen. Dadurch verringert sich der an den Anschlüssen gemessene Widerstand, der umgekehrt proportional zur aufgetragenen Kraft ist. FSR-Sensoren werden bereits serienmäßig in der Sitzbelegungserkennung eingesetzt. Grundlegende Erfahrungen aus diesem Bereich können daher für die Anwendung der Fußgängererkennung übertragen werden (KÜHN, 2007). Eine Alterungsbeständigkeit im Fahrzeugfrontbereich ist jedoch noch zu prüfen.

Polyvinylidenfluorid- (PVDF-)Sensoren zählen zur Gruppe der piezoelektrischen Drucksensoren und bestehen aus einer speziellen Kunststoffolie (siehe Bild 10). Mithilfe des piezoelektrischen Effekts kann hiermit eine auf einer Fläche wirkende Kraft gemessen werden, wobei die gemessene Spannung mit der Geschwindigkeit und der Masse des stoßenden Körpers korreliert. Eine Kontaktsensierung ist bereits nach 2 ms möglich, eine Bestimmung von Energie und Masse des Kollisionspartners nach ca. 8 ms, sofern die eigene Geschwindigkeit bekannt ist (HOFFMANN, 2001). Die Anforderungen hinsichtlich Temperatur- und Alterungsbeständigkeit erfüllen PVDF-Folien für die automobilen Serienfertigung zur Zeit der Projektdurchführung noch nicht. Ein Einsatz temperaturstabilerer Copolymere kann zukünftig zu Verbesserungen führen (ZANDER, 2003; KÜHN, 2007).



Bild 9: FSR-Sensoren: Prinzipdarstellung (oben), Ausführungsbeispiele (unten) (FSR, 2010)

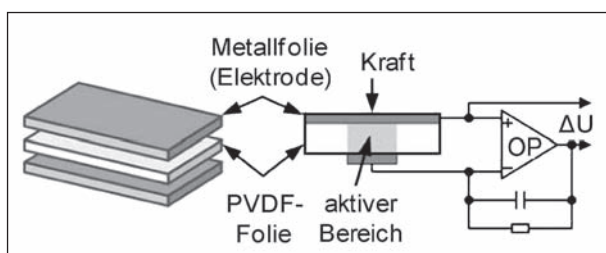


Bild 10: Prinzipdarstellung eines PVDF-Sensors (FISCHER, 2002)

2.1.3 Relevante Anforderungen für Prüfverfahren sensorischer Systeme

Aus den verschiedenen Funktionsweisen der einzelnen Sensorsysteme ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Bewertung innerhalb eines Prüfverfahrens, welche im Folgenden zusammenfassend aufgezählt werden:

- Optische Lichtleiter sind über die gesamte Fahrzeugbreite angebracht, weshalb hier keine lokalen Unterschiede des Anprallsignals zu erwarten sind. Da sie jedoch üblicherweise im Energieabsorptionsschaum integriert sind, welcher bei zunehmenden Temperaturen ein elastischeres Verhalten aufweist, sollte die Temperaturabhängigkeit in einem Prüfverfahren berücksichtigt werden.
- Beschleunigungssensoren werden lokal verteilt in die Fahrzeugfront integriert. Aus einer sensor-nahen Anprallposition resultiert daher im Vergleich zu einem sensorfernen Anprall ein unterschiedlicher Signalverlauf. Unterschiedliche Anprallpositionen sollten daher in einem Prüfverfahren berücksichtigt werden.
- Innerhalb des Auswertungsalgorithmus für Beschleunigungssensoren wird die Steifigkeitsverteilung der Fahrzeugfront berücksichtigt. Eine Prüfung bei möglichen Steifigkeitsveränderungen, bspw. durch Vorschädigungen aus Bagatellunfällen, sollte in einem Prüfverfahren berücksichtigt werden.

- Drucksensoren besitzen ähnliche Eigenschaften wie optische Lichtleiter, weshalb bei einer Bewertung dieser Sensoren ebenfalls die Temperaturabhängigkeit berücksichtigt werden sollte.

2.1.4 Aktuatorik

Um die Eigenschaften aktuatorischer Systeme zu charakterisieren, werden folgende Teilfunktionen der crash-aktiven Systeme getrennt voneinander betrachtet:

- Art der Auslöseaktuatorik,
- Art der Aufstellaktuatorik,
- Krafteinleitung zur Aufstellung,
- Art der Aufstellkinematik,
- zusätzliche Maßnahmen.

Die Auslöseaktuatorik crash-aktiver Motorhauben definiert, wie die für die Aufstellung des Systems erforderlichen Kräfte bereitgestellt werden. In Bild 11 sind beispielhaft drei verschiedene, auch bereits umgesetzte Lösungen beschrieben. Demnach kann die Auslöseaktuatorik auf einem pneumatischen, hydraulischen, pyrotechnischen oder elektromagnetischen Verfahren basieren. Eine pyrotechnische Auslösung ist i. d. R. nicht reversibel. Bei der elektromagnetischen Auslösung betätigt der Magnet im Falle einer Aktivierung ein Entriegelungssystem, wodurch bspw. die Kraft einer vorgespannten Feder freigegeben wird. Diese Art der Auslöseaktuatorik ist

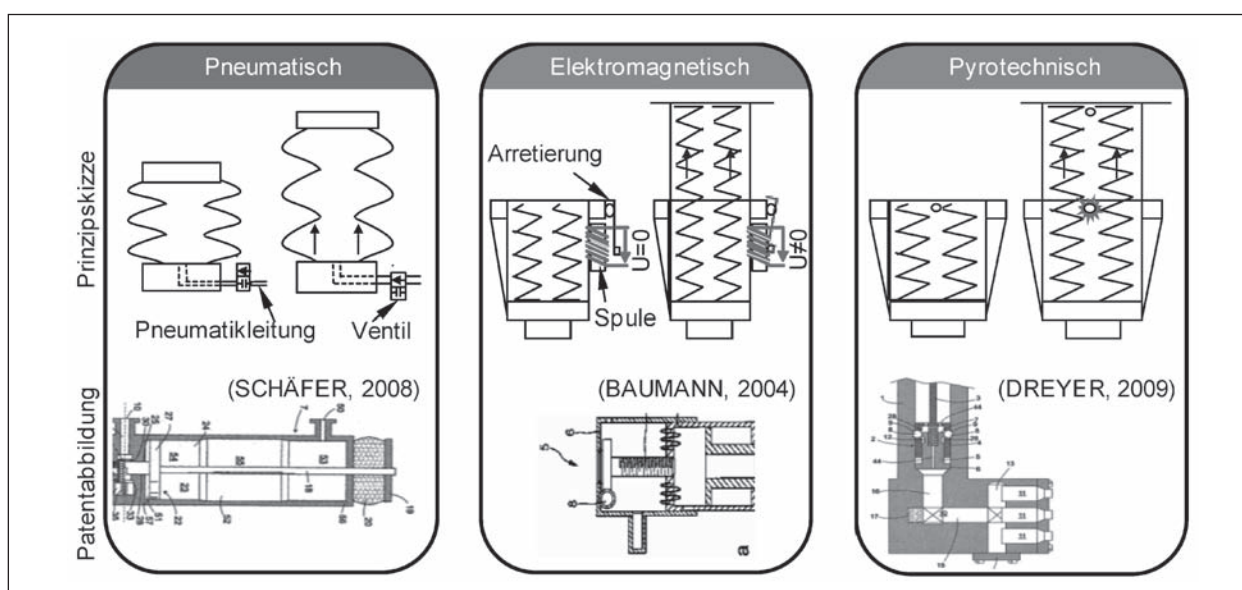


Bild 11: Auslösemechanismen aktuatorischer Systeme

reversibel und kann bspw. durch eine externe Betätigung zurückgestellt werden.

Fahrzeugseitige Fußgängerschutzvorrichtungen können mithilfe verschiedener aktorischer Komponenten aufgestellt werden. Die Einteilung der Komponenten erfolgt hierbei aufgrund ihrer physikalischen Funktionsweise (siehe Bild 12). Mechanische Aufstellsysteme, wie bspw. Feder- und Blattfederaktuatoren, verwenden meist vorgespannte Federn, die durch Lösen einer Arretierung aktiviert werden. Bei den pneumatischen Konzepten wird der Zugang zu einer Druckleitung mithilfe eines Magnetventils geöffnet, wodurch ein Kolben oder Fluidmuskel angehoben wird. Bei den pyrotechnischen

Actuatoren, wie z. B. dem Faltenbalgaktuator oder bei externen Airbagsystemen, wird das Schutzsystem mithilfe eines Gasgenerators aufgestellt bzw. entfaltet.

Die Art der Kräfteinleitung bei der Aufstellung bzw. Entfaltung der Schutzvorrichtung kann gemäß KÜHN (2007) in punktuelle Kräfteinleitung jeweils mit und ohne Dämpfung sowie flächenhafte Kräfteinleitung mit Dämpfung eingeteilt werden (siehe Bild 13). Bei der punktuellen Kräfteinleitung kommen Stoßkolben zum Einsatz, während bei der flächenhaften Kräfteinleitung Airbagsysteme verwendet werden. Aufstellmechanismen mit einer punktuellen Kräfteinleitung können mithilfe geeigneter Auf-

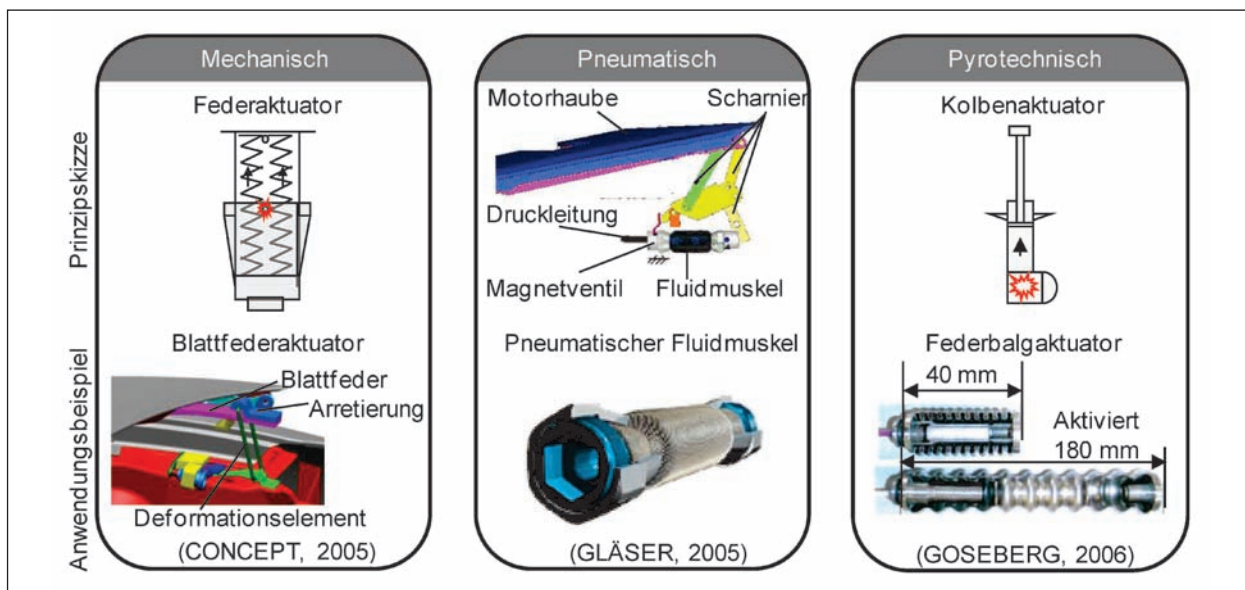


Bild 12: Aufstellvarianten aktuatorischer Systeme

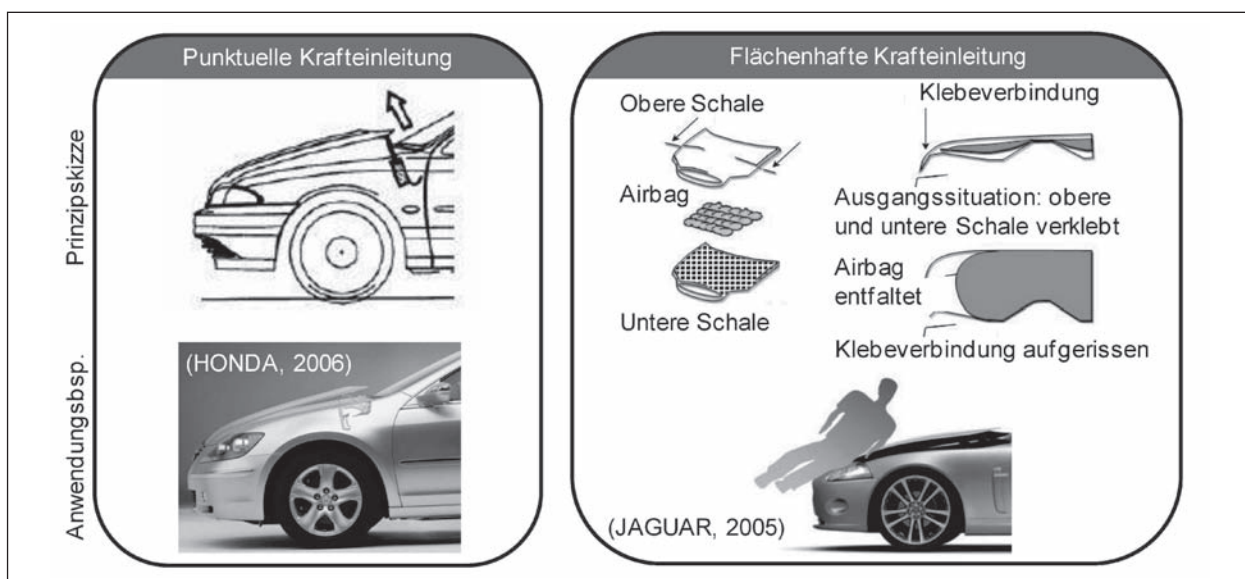


Bild 13: Kräfteinleitung bei aktuatorischen Systemen

stellkomponenten reversibel ausgeführt werden, benötigen hierfür aber laut KÜHN (2007) eine längere Aufstellzeit. Die Aufstellung mithilfe eines Airbagsystems erfolgt aufgrund des flächenhaften Energieeintrags innerhalb einer kürzeren Zeit (KÜHN, 2007).

In Bezug auf die Kinematik der Motorhaubenaufstellung existieren unterschiedlich komplexe Konzepte (siehe Bild 14). Eine vertikale Anhebung der hinteren Haubenkante wird derzeit am häufigsten eingesetzt. Darüber hinaus kann auch die gesamte Haube vertikal angehoben werden. Eine zusätzliche horizontale Verschiebung der Haube in Fahr-

zeuglängsrichtung nach hinten verringert den entstehenden Spalt zwischen Kante und Frontscheibe. Hierfür werden Vierpunktscharniere eingesetzt, die sowohl eine vertikale als auch horizontale Verschiebung ermöglichen. Zur Vermeidung des Abrutschens des Fußgängers kann die vordere Haubenkante zusätzlich mit einer gewissen Verzögerung angehoben werden.

Durch zusätzliche Maßnahmen können weitere Bereiche der Fahrzeugfront für den Fußgängerschutz optimiert werden (siehe Bild 15). Neben der reinen Anhebung der Haubenfläche kann der Haubenspalt sowie der Scheibenwurzelbereich bspw. durch Ein-

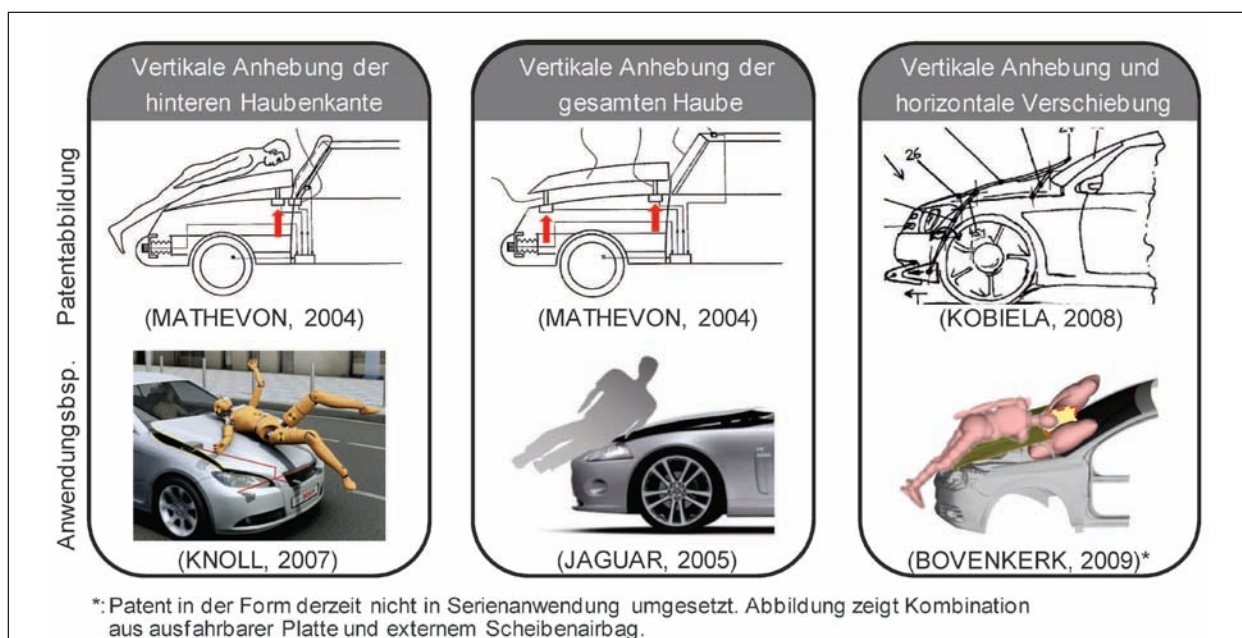


Bild 14: Haubenaufstellkinematik aktuatorischer Systeme

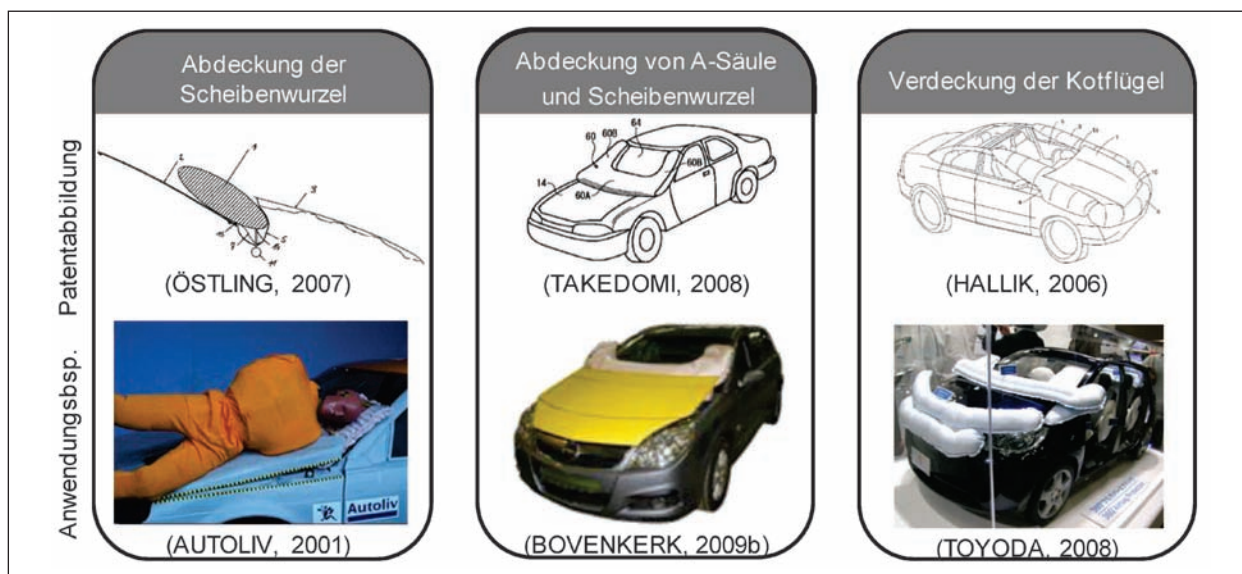


Bild 15: Erweiterung der Systemgrenzen aktuatorischer Systeme

satz eines geeigneten Airbags abgedeckt werden, wie es bereits im Vorprojekt beispielhaft durchgeführt wurde (vgl. BOVENKERK, 2009c). U-förmige Airbags zur Abdeckung der unteren A-Säulenregion und seitlich aus dem Haubenspalt herausragende Airbags zur Abdeckung des Kotflügels sind weitere Konzepte für zusätzliche Maßnahmen. In den gegenwärtig auf dem Markt verfügbaren Fahrzeugen sind ausschließlich aufstellende Motorhauben integriert (siehe Tabelle 1). Es ist jedoch davon auszugehen, dass in Zukunft weitere Airbagsysteme auf dem Markt eingeführt werden.

2.1.5 Relevante Anforderungen für Prüfverfahren aktuatorischer Systeme

Innerhalb der in diesem Arbeitspunkt durchgeführten Untersuchungen werden die Teilfunktionen der aktuatorischen Systeme getrennt voneinander betrachtet. Hierbei ergeben sich verschiedene Anforderungen, welche im Rahmen eines Bewertungsverfahrens zu berücksichtigen sind. Diese Anforderungen werden im Folgenden zusammenfassend aufgezählt:

- Zur Bewertung der Auslösung sollten mögliche Prüfungen der Worst-Case-Szenarien durchgeführt werden. Hydraulische, pneumatische und pyrotechnische Ansätze besitzen ein sehr autarkes, gegen äußere Einflüsse unabhängiges Verhalten, weshalb hier normalerweise keine für das System schädlichen Bedingungen auftreten. Der Einfluss äußerer Magnetfelder auf elektromagnetische Auslösemechanismen kann bestehen, wird aber aufgrund des langjährigen Einsatzes und des guten Kenntnisstands solcher Systeme als sehr gering eingeschätzt.
- An die Aufstellkomponenten werden verschiedene Anforderungen gestellt, welche zum Teil auch das Schutzpotenzial der ungeschützten Unfallgegner beeinflussen. Hierzu zählen neben einer möglichst geringen Aufstellzeit auch eine gute Dämpfung des Nachschwingverhaltens sowie eine hohe Energieaufnahme während des Kopfaufpralls. Prinzipiell können bei jeder Aufstellvariante eine geeignete Dämpfung und Energieaufnahme integriert werden. Lediglich bei der Aufstellzeit sind i. d. R. die pyrotechnischen Ansätze im Vorteil. Einzelne Anforderungen können sich jedoch gegenseitig beeinflussen. Daher ist innerhalb eines Prüfverfahrens eine ganzheitliche Bewertung des Systems sinnvoll.

- Die bei der punktuellen Krafteinleitung im Bereich des Energieeintrages notwendigen Haubenstrukturverstärkungen ergeben lokale Steifigkeitserhöhungen, die sich negativ auf das Verletzungsrisiko auswirken. Die Lage der Verstärkungen sollte innerhalb einer Prüfprozedur berücksichtigt werden.
- Primäres Ziel der Konzepte zur Haubenaufstellkinematik stellt die Verringerung des Verletzungsrisikos und der Verletzungsschwere beim Kopfaufprall eines Fußgängers dar. Eine alleinige Anhebung der hinteren Haubenkante kann jedoch in einen nicht bündigen Übergang zwischen Haube und Scheibe resultieren und ein zusätzliches Verletzungsrisiko für bestimmte Fußgängergrößen darstellen, da der Kopf aufgrund der Pendelbewegung um die Schulter gegen die hintere Haubenkante prallen kann (vgl. Bild 5-63 in BOVENKERK, 2009c). Dieser Effekt sollte in einem Bewertungsverfahren berücksichtigt werden.
- Im Falle einer vertikalen Anhebung der gesamten Motorhaube kann ein Spalt zwischen vorderer Haubenkante und Stoßfänger bzw. Kühlergrill entstehen, worin sich äußere Extremitäten des in den Unfall beteiligten Fußgängers verfangen können.
- Der mögliche Einsatz von Airbags ist bei der Auslegung eines Prüfverfahrens zu berücksichtigen. Im Gegensatz zu aufstellenden Motorhauben kann bei Airbags kein stabiler aktivierter Zustand erreicht werden, da das Gas nach der Befüllung nur wenige Millisekunden im Luftsack verbleibt, bevor es über die Abströmöffnungen oder das durchlässige Gewebe entweicht. Aufgrund dieses dynamischen Vorgangs kann eine rein statische Bewertung nicht durchgeführt werden.

2.1.6 Sensorische und aktuatorische Systeme in Serienfahrzeugen

Crash-aktive Systeme zur Erhöhung der Fußgängersicherheit wurden erstmals 2005 in ein Serienfahrzeug (Jaguar XK) integriert und sind seitdem noch in weiteren Fahrzeugen verfügbar. Neun dieser Fahrzeuge sind in Tabelle 1 dargestellt. Auffallend hierbei ist, dass crash-aktive Systeme vornehmlich in Fahrzeugen mit einer vergleichsweise langen Motorhaube der oberen Mittelklasse oder der Oberklasse verbaut werden.

Fahrzeugmodell	Sensorik (Hersteller)	Aktuatorik (Hersteller)
BMW 5er (F10) 	Faseroptische Lichtwellenleiter (Magna) (WALLNER, 2010)	Pyrotechnisch (nicht bekannt) (WALLNER, 2010)
BMW 7er (F01,F02, nur Japan) 	3 Beschleunigungssensoren (nicht bekannt) (WALLNER, 2010)	Federaktuator (nicht bekannt) (WALLNER, 2010)
Cadillac CTS 	Beschleunigungssensoren und faseroptischer Lichtwellenleiter (Magna) (KINSKY, 2009)	Pyrotechnisch (Magna) (KINSKY, 2009)
Citroën C6 	Beschleunigungssensoren und faseroptischer Lichtwellenleiter (Magna) (JUNGMANN, 2008) (PINECKI, 2007)	Federaktuator mit pyrotechnischer Auslösung (TRW) (GOSEBERG, 2007)
Mercedes-Benz E-Klasse 	3 Beschleunigungssensoren (nicht bekannt) (RATHJE, 2009)	Federaktuator mit elektro-magnetischer Auslösung (nicht bekannt) (RATHJE, 2009)
Honda Legend 	3 Beschleunigungssensoren (Keihin) (GOSEBERG, 2007)	Pyrotechnischer Hubzylinder (TAKATA) (GOSEBERG, 2007)
Jaguar XF 	Beschleunigungssensoren (Bosch) (AUTOMOBIL-PRODUKTION, 2008)	Pyrotechnisch entfaltete Airbags zur Haubenanhebung (Autoliv) (GOSEBERG, 2007)
Jaguar XK/XKR 	Faseroptischer Lichtwellenleiter (Magna) (JUNGMANN, 2008) (JAGUAR, 2007)	Pyrotechnisch entfaltete Airbags zur Haubenanhebung (Autoliv) (GOSEBERG, 2007)
Nissan Skyline, 370Z 	Beschleunigungssensoren (Bosch) (NISSAN, 2010)	Federaktuator mit pyrotechnischer Auslösung (Bosch) (JUNGMANN, 2007)

Tab. 1: Gegenwärtig auf dem Markt verfügbare Fahrzeuge mit crash-aktiven Fußgängerschutzsystemen

Bei einem Großteil der Fahrzeuge werden zur Charakterisierung und Erkennung des Unfallgegners in der Fahrzeugfront implementierte Beschleunigungssensoren verwendet. Bei zwei Fahrzeugen kommen zusätzlich zu den Beschleunigungssensoren faseroptische Lichtwellenleiter zum Einsatz (Cadillac CTS und Citroën C6), während bei zwei anderen Fahrzeugen ausschließlich faseroptische Lichtleiter integriert sind (BMW 5er und Jaguar XK).

Bei den zur Zeit der Projektbearbeitung auf dem Markt verfügbaren Fahrzeugen sind innerhalb der Aktuatorik sowohl pyrotechnische als auch elektromagnetische Auslösungen integriert. Die Aufstellung erfolgt hierbei entweder durch Hubzylinder, durch Federaktuatoren oder durch pyrotechnisch entfaltete Airbags. Bei diesen Fahrzeugen wird fast ausschließlich die hintere Haubenkante angehoben. Lediglich beim BMW 5er wird auch die vordere Motorhaubenkante angehoben (WALLNER, 2010). Der zwischen der hinteren Motorhaubenkante und der Windschutzscheibe entstehende Spalt wird bisher bei keinem Fahrzeug durch zusätzliche Maßnahmen geschützt. Weitere Erweiterungen der Systemgrenzen bspw. zur Abdeckung der A-Säule oder des Kotflügels sind ebenfalls bisher noch nicht umgesetzt.

2.2 Analyse der Methodik und Eignung veröffentlichter Testverfahren

Testverfahren zur Bewertung crash-aktiver Fußgängerschutzsysteme, wie bspw. aufstellende Motorhauben, werden spätestens seit der Einführung solcher Systeme in Serienfahrzeugen in entsprechenden Gremien (wie "Informal Group on Pedestrian Safety" der UNECE) diskutiert. Verschiedene Ansätze sowie Methoden, die im Rahmen dieser Diskussionen veröffentlicht wurden, werden im Folgenden vorgestellt und analysiert.

2.2.1 Prüfkörper zur Bewertung kontaktbasierter Erkennungssensorik

Innerhalb eines Bewertungsverfahrens zum Nachweis der korrekten Funktionsweise kontaktbasierter Erkennungssensorik ist zu überprüfen, ob das zu bewertende Fahrzeug einen Fußgängeranprall detektiert und die Schutzvorrichtung auslöst. Diese Kollision kann bspw. mithilfe eines Dummys (engl. „Anthropomorphic Test Device“ bzw. ATD) nachgebildet werden.

Für eine ganzheitliche Bewertung solcher Systeme sind mögliche Grenzfälle zu berücksichtigen. Bei kontaktbasierten Sensorsystemen wird der Unfallgegner anhand des in die Fahrzeugfront eingebrachten Lasteintrags charakterisiert, vgl. Kapitel 2.1. Unter Verwendung entsprechender Algorithmen wird entschieden, ob das Schutzsystem auszulösen ist. Um den Kunden vor unnötigen Fehlauslösungen, bspw. einer Kollision mit einem Gegenstand, zu schützen, werden diese Algorithmen innerhalb der Fahrzeugentwicklung mithilfe umfangreicher Vorversuche bestimmt. Eine große Herausforderung besteht hierbei vor allem in der Unterscheidung zwischen Fußgänger mit einem sehr geringen Lasteintrag und anderen Anprallobjekten, bei denen das System nicht auslösen soll (sog. Misuse-Fälle wie bspw. Bälle oder leere Abfallbehälter). Die Erkennung von Fußgängern mit einem geringen Lasteintrag wird daher häufig als Worst-Case-Szenario betrachtet.

Zur Nachbildung eines Anpralls von Fußgängern mit geringen Lasteinträgen können so genannte „Lower-Limit-Impaktoren“ (LLI) eingesetzt werden. LLI werden explizit für die Nachbildung solcher Worst-Case-Szenarien entwickelt, wobei bei der Entwicklung zum Teil wissenschaftlich nicht eindeutig belegbare Annahmen getroffen werden, wie im Folgenden näher beschrieben wird. Zur Zeit der Projektdurchführung sind drei LLI käuflich verfügbar, während sich zwei weitere in der Entwicklung befinden. Derzeit verfügbar sind der PDI der Fa. Concept, der IEE-Impaktor der Fa. IEE sowie das SensorLeg der Fa. TRL (siehe Bild 41). Sowohl Concept (PDI-2) als auch IEE (IEE-G2) arbeiten derzeit an einer Weiterentwicklung ihrer Impaktoren. Die wesentlichen Eigenschaften dieser fünf Impaktoren werden im Folgenden näher beschrieben.

Der so genannte „Pedestrian Detection Impactor“ (PDI) in Bild 16 wurde von der Firma Concept Technologie in Zusammenarbeit mit dem Arbeitskreis Fußgängerschutz-Sensorik im Auftrag der „Partnership for Dummy Technology and Biomechanics“ (PDB) entwickelt. Mit diesem Prüfkörper können sowohl Anfahrtests gegen einen stehenden Impaktor als auch Prüfungen mithilfe einer Abschussvorrichtung durchgeführt werden. Das Gewicht des PDI beträgt ca. 9,8 kg (Concept, 2009). Der PDI besteht aus einem Carbonrohr und einem oben liegenden Bleikern, die mit einem inneren und einem äußeren Schaumteil ummantelt sind. Die Gesamtlänge des Impaktors beträgt 660 mm, wobei er auf einem 70 mm hohen Podest positioniert ist. Die

physikalischen Eigenschaften des PDI sollen den Kraft- und Deformationsenergieverläufen eines 6-jährigen Fußgängerdummys entsprechen, wobei die Auswahl des 6-jährigen Kindes als untere Grenze nicht weiter begründet ist. Zur Analyse der physikalischen Eigenschaften wurde ein Fahrzeuersatzgestell entwickelt (siehe Bild 16). Um kein bestimmtes Sensorprinzip zu bevorzugen, wurden bei der Auslegung hauptsächlich physikalische Grundgrößen wie Kräfteintrag, absorbierte Energie oder Intrusion berücksichtigt. Die umfangreichste den Autoren bekannte Beschreibung der Entwicklung des PDI ist in ROTH (2007) veröffentlicht.

Der „Lower Limit Impactor“ (siehe Bild 17) der Firma IEE, im Folgenden als IEE-Impaktor bezeichnet,

wurde anhand der Anthropometrie eines so genannten 5%-Mannes entwickelt. Die Prozentangabe steht hierbei für das Gewicht und die Größe der Person, die in Abhängigkeit einer statistischen Untersuchung ermittelt wurde. In diesem Fall besitzen nur 5 % der Grundgesamtheit aller Männer der entsprechenden Studie eine geringere Größe und ein geringeres Gewicht als dieser 5%-Mann. Wie Untersuchungen zeigen, kann der Lasteintrag eines 5%-Manns aufgrund des sehr hoch gelegenen Schwerpunktes und des daraus resultierenden größeren rotatorischen Anteils unter dem eines 6-jährigen Kindes liegen (MOUSEL, 2008). Der wesentliche Aufbau dieses Impaktors besteht aus einem Stahlkern und einer Ummantelung aus Polyurethan-Schaum zur Generierung eines möglichst

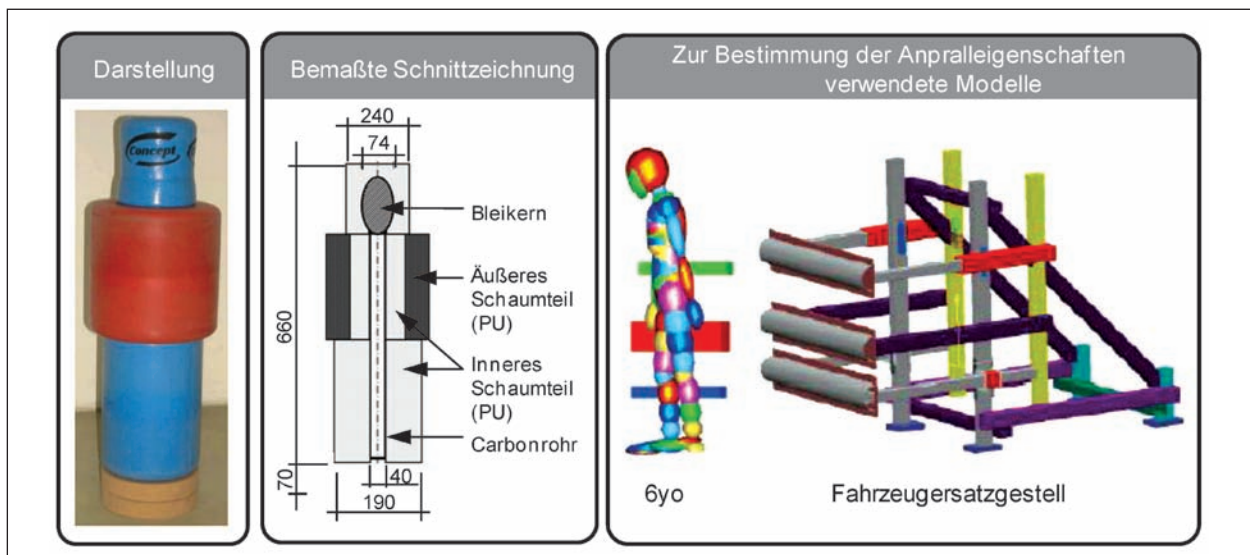


Bild 16: Informationen zum PDI anhand von Concept (2009), ROTH (2007) und RATHJE (2009)

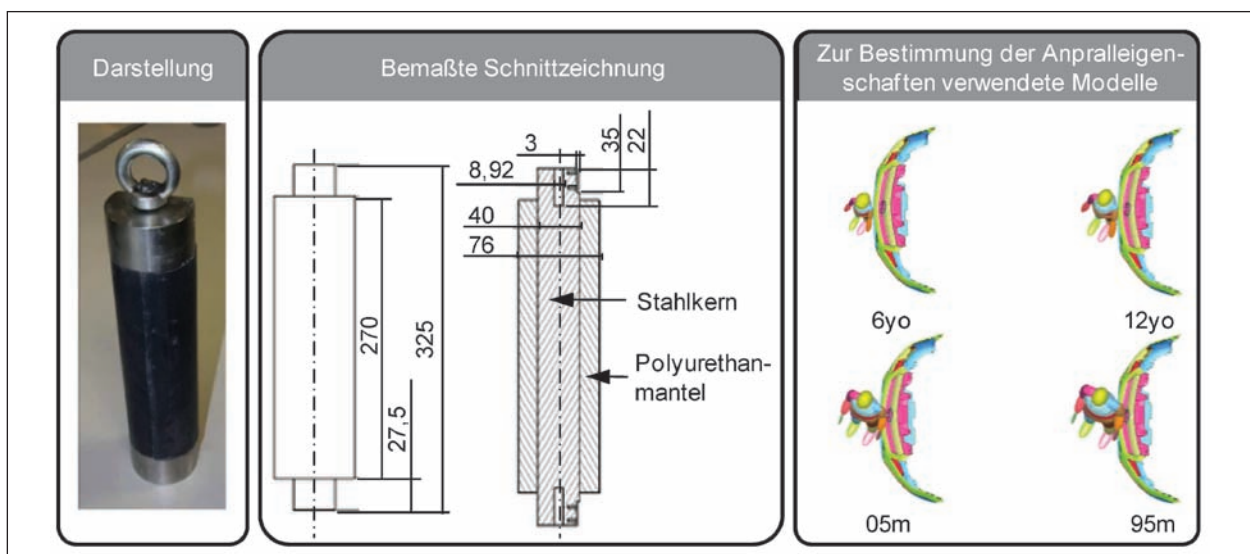


Bild 17: Informationen zum IEE-Impaktor (Variante 2) anhand von IEE (2009), MOUSEL (2008)

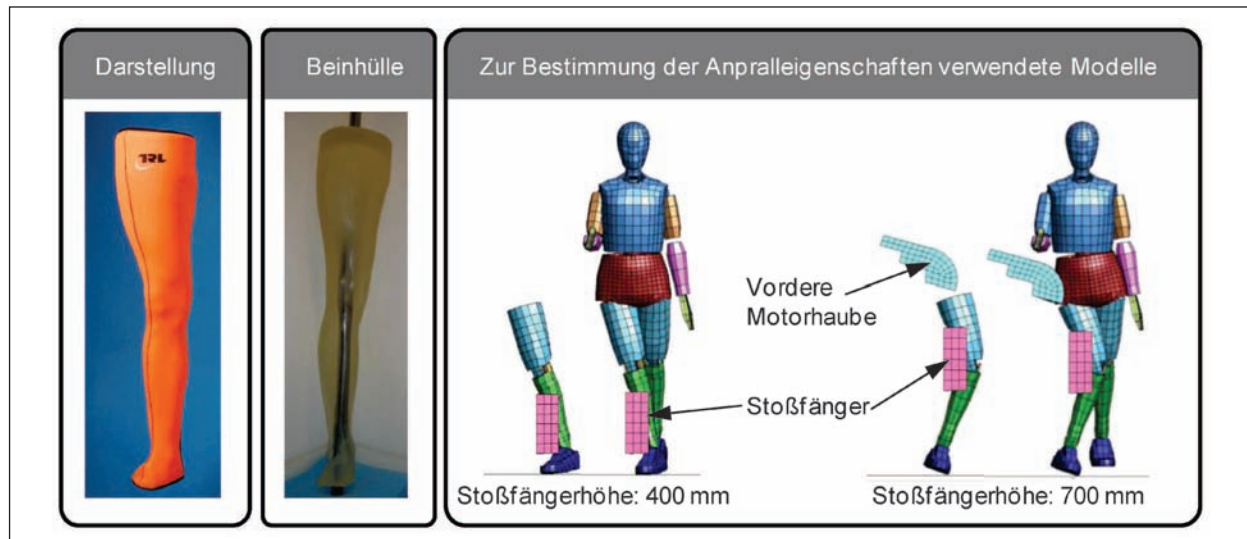


Bild 18: Informationen zum SensorLeg anhand von MANNING (2007) und LAWRENCE (2006)

biofidelen Lasteintrags (BIECK, 2008). Der IEE-Impaktor existiert in zwei Varianten, um sowohl eine Prüfung in einer Abschussvorrichtung (Variante 1) als auch in einem Pendelprüfstand (Variante 2, siehe Bild 17) zu ermöglichen. Basis für die Auswahl des 5%-Manns als untere Grenze stellen Kollisionsberechnungen zwischen einer gegnerischen Front und vier verschiedenen Fußgängern (6- und 12-jähriges Kind (6yo und 12yo) sowie 5%- und 95%-Mann (05m und 95m)) dar (siehe Bild 17), wobei der Anprall des 5%-Manns die geringste Anprallmasse verursachte (MOUSEL, 2008). Nach der Veröffentlichung des IEE-Impaktors wurden von IEE weitere Studien zu dieser Thematik durchgeführt (bspw. BIECK, 2010; MARX, 2010 und MARX, 2011a). Hierbei wurde der Einfluss verschiedener Schrittstellungen, Menschmodelle sowie Fahrzeuge untersucht.

TRL verfolgte bei der Entwicklung des SensorLegs (Bild 18) im Vergleich zu Concept und IEE einen anderen Ansatz. Während sich Concept und IEE auf die generische Abbildung des physikalischen Anprallverhaltens konzentrieren, strebt TRL die Abbildung einer möglichst exakten Kontaktbiofidelität an. Hierzu bildet TRL die Form eines männlichen rechten Beins detailliert ab. Wesentlicher Antrieb für die Entwicklung des SensorLegs stellte eine von TRL im Auftrag der Europäischen Kommission durchgeführte Machbarkeitsstudie dar, nach welcher die physikalischen Eigenschaften des in der derzeitigen Prüfvorschrift für passive Systeme verwendeten EEVC-WG17-Prüfkörpers nicht mit einem menschlichen Beinanprall vergleichbar sind (LAWRENCE, 2006). Das SensorLeg besteht aus

einem komplexen Kniegelenk, einem Oberschenkel- und einem Schienbeinknochen aus Glasfaser sowie einer Beinmoulage zur Modellierung von Muskeln und Haut. Es besitzt ein Gewicht von 13,4 kg (MANNING, 2007). Ausgelegt ist das SensorLeg anhand der Eigenschaften eines 50%-Mannes, da keine zuverlässige Aussage über den Worst-Case getroffen werden konnte. Personen mit einem geringeren Gewicht besitzen laut TRL meist auch eine geringere Körpergröße. Da auch andere Körperteile wie Oberschenkel und Oberkörper einen zusätzlichen Lasteintrag verursachen können, ist eine alleinige Abbildung des Unterschenkels hier nicht ausreichend. Außerdem ist auch eine Knochenfraktur zu berücksichtigen. Senioren, die ein erhöhtes Frakturrisiko aufweisen, könnten somit den unteren Grenzwert darstellen. Daher wurde ein „Durchschnittsmensch“ ausgewählt, um damit den Großteil der Bevölkerung abdecken zu können (MANNING, 2007). Des Weiteren soll mittels Skalierung eine Impaktor-Familie entwickelt werden, um zu verhindern, dass crash-aktive Systeme anhand der Anforderungen eines einzigen Prüfkörpers optimiert werden können.

Da Euro NCAP Zweifel äußerte, ob der PDI zur Repräsentation des Worst-Case-Szenarios geeignet ist, beauftragte 2011 der europäische Automobilherstellerverband ACEA („Association des Constructeurs Européens d’Automobiles“) die Firma Concept mit der Entwicklung einer zweiten Generation des PDI, dem so genannten PDI-2 (siehe Bild 19). Ziel der ACEA bzw. von Concept ist die Entwicklung eines einzigen Impaktors, mit dem eine größtmögliche Bandbreite an Worst-Case-

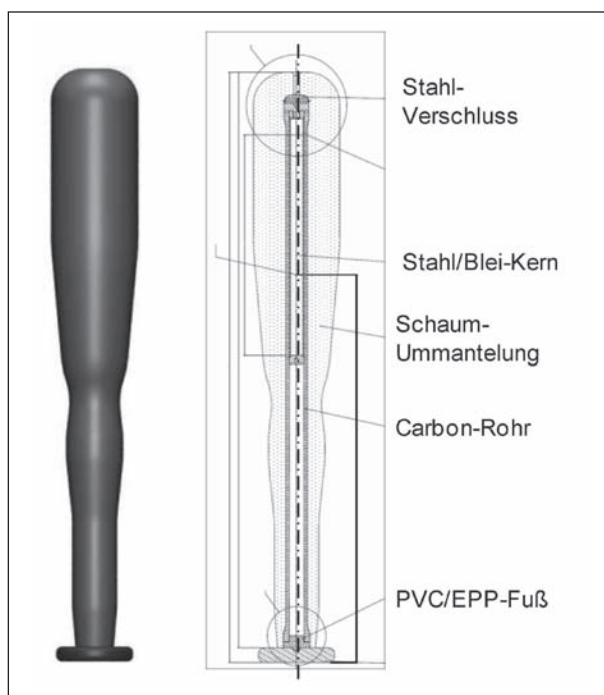


Bild 19: Aufbau des PDI-2 (OTUBUSHIN, 2012)

Szenarien sämtlicher Fahrzeugkategorien abgebildet werden kann. Für die Entwicklung des Impaktors werden drei Fahrzeugklassen mithilfe von Lastpfaden abgebildet (OTUBUSHIN, 2012). Außerdem werden vier Fußgängerklassen, zwei Menschmodelle, zwei Schrittpositionen, vier Anprallgeschwindigkeiten sowie drei Parameter zur Charakterisierung der jeweiligen Worst-Case-Szenarien herangezogen (KINSKY, 2011). Der Impaktor besteht aus einem Stahl-Blei-Kern, der in einem Carbon-Rohr integriert und von einer Schaum-Ummantelung umgeben ist. Zur Gewährleistung eines sicheren Stands wird er auf einem PVC-EPP-Fuß montiert. Der PDI-2 besitzt eine Masse von 6,85 kg bei einer Länge von 1,00 m. Innerhalb des vorliegenden Projektes konnte der PDI-2 leider nicht berücksichtigt werden, da zur Zeit der Projektbearbeitung noch kein Prototyp des Impaktors verfügbar war.

Nach MARX (2011b) leitet der IEE-Impaktor etwas zu hohe Lasteinträge in die Fahrzeugfront ein und erzeugt aufgrund der geringen Impaktorlänge verbunden mit einem fehlenden Anprall gegen die untere Fahrzeugabstützung (den so genannten „Lower Stiffener“) nicht realitätsgetreue Rotationsbewegungen. Daher veröffentlichte IEE im Jahr 2011 Forschungsaktivitäten zu einem weiterentwickelten Prüfkörper, dem so genannten IEE-G2-Impaktor (siehe Bild 20). Der IEE-G2-Impaktor besteht aus einem kohlefaserverstärkten Rohr mit

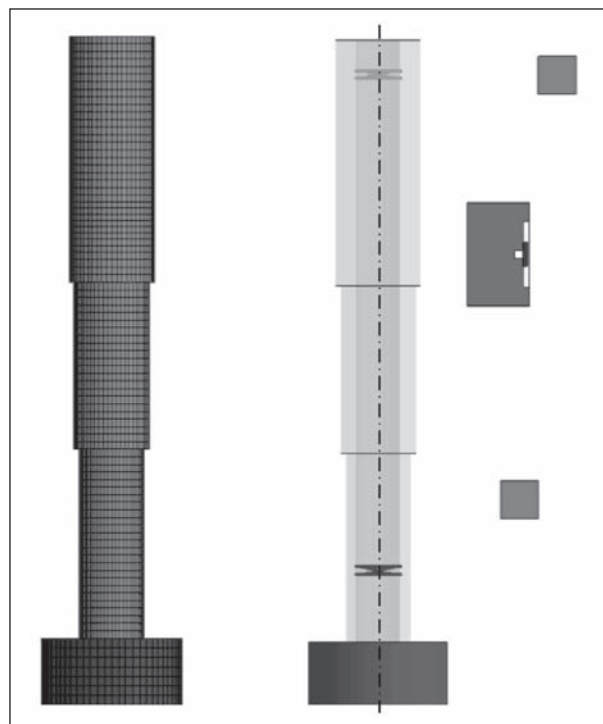


Bild 20: FE-Modell des IEE-G2-Impaktors (MARX, 2011b)

zwei konzentrierten Massen, welches mit einem Polyurethan-Schaum ummantelt ist. Das Gewicht des Impaktors beträgt 6,6 kg bei einer Gesamthöhe von 700 mm (inkl. eines 70-mm-Podests). Zur Untersuchung eines möglichst realen Fußgängeranpralls entwickelte IEE ein hybrides Fußgängermodell basierend auf einem Finite-Elemente-Modell der unteren Extremitäten des Worcester Polytechnic Institutes (SILVESTRI, 2009). IEE veränderte die Positionierung dieses FE-Modells und integrierte einige Anpassungen zur Abbildung einer verbesserten Biofidelität. Zusätzlich fügte IEE einen Oberkörper aus starren Mehrkörperelementen hinzu. Neben einem 50%-Mann entwickelte IEE auch eine 5%-Frau des hybriden Fußgängermodells. Innerhalb des vorliegenden Projektes konnte der IEE-G2 leider nicht berücksichtigt werden, da zur Zeit der Projektbearbeitung noch kein Prototyp des Impaktors verfügbar war.

2.2.2 Prüfmethode zur Bewertung des Kopfverletzungsminderungspotenzials crash-aktiver Systeme

Crash-aktive Fußgängerschutzsysteme, wie bspw. aufstellende Motorhauben, sollen das Verletzungsrisiko beim Kopfaufprall eines Fußgängers auf das Fahrzeug verringern. In einem Verfahren zur Bewertung dieser Systeme sollte daher das Kopfver-

letzungsrisiko berücksichtigt werden. Der wesentliche Unterschied zu rein passiven Schutzvorrichtungen besteht in der dynamischen Auslösung der crash-aktiven Systeme, weshalb ein sinnvolles Bewertungsverfahren an diese Veränderung angepasst werden sollte. Verschiedene Prüfmethode zur Bewertung dieser Systeme wurden bereits veröffentlicht und werden innerhalb dieses Kapitels dargestellt.

In europäischen Testeinrichtungen werden experimentelle Bewertungen aus pragmatischen Gründen sowie aufgrund ihrer objektiven Analyse gegenüber realen Testobjekten bevorzugt. Rein passive Systeme werden überwiegend, mithilfe entsprechender Komponentenversuche bewertet. Diese Komponentenversuche sollen die Körperteile abbilden, die während einer Fahrzeug-Fußgänger-Kollision am häufigsten bzw. am schwerwiegendsten betroffen sind.

Neben den in Bild 21 dargestellten Kopffimpaktoren kommen hierbei auch Bein- und Hüftimpaktoren zum Einsatz. Komponentenversuche mithilfe entsprechender Kopffimpaktoren eignen sich zur Bewertung des überwiegenden Teils des Kopfaufprallbereichs. Da die Impaktoren hierbei jedoch gegen ein stehendes Fahrzeug prallen, können die während der Haubenaufstellung auftretenden dynamischen Vorgänge nur angenähert abgebildet werden.

Zur Untersuchung des Kopfverletzungsrisikos bei crash-aktiven Fußgängerschutzsystemen können statische sowie dynamische Kopffimpaktoranprallversuche durchgeführt werden. Bei statischen Anprallversuchen wird das aufzustellende bzw. zu entfaltende Schutzsystem deutlich vor dem Anprallver-



Bild 21: Darstellung und Aufbau eines Kopffimpaktors (Humanetics, 2011)

such aktiviert. Dynamische Vorgänge wie bspw. Nachschwingeffekte der Haube werden hierbei vernachlässigt. Im Falle dynamischer Anprallversuche wird der Kopffimpaktoranprall entsprechend der realen Unfallkinematik zeitlich mit der Aktivierung des Schutzsystems gekoppelt. Hierfür muss im Vorfeld des Versuchs die Kopfanprallzeit bspw. mithilfe entsprechender Simulationen bestimmt werden.

Mithilfe von Anprallversuchen mit Kopffimpaktoren kann zwar der überwiegende Teil des Anprallbereichs untersucht werden, der Einfluss des Oberkörpers des Fußgängers wird hierbei jedoch vernachlässigt. Bei Anprallversuchen mit entsprechenden Crash-Dummys, wie bspw. dem in Bild 22 von Honda entwickelten Polar-II-Dummy, wird der Einfluss des Oberkörpers berücksichtigt. Da die Entwicklung und Produktion dieser Dummys jedoch sehr kostspielig sind, können nicht sämtliche Körpergrößen realisiert werden, wodurch der zu überprüfende Anprallbereich nicht komplett abgedeckt wird.

Wie in Kapitel 2.1.5 beschrieben, kann eine Anhebung des hinteren Bereichs der Motorhaube aufgrund eines möglichen Kopfanpralls gegen die hintere Motorhaubenkante in einem zusätzlichen Verletzungsrisiko für den Fußgänger resultieren. Die bei einem solchen Anprall zu erwartende Verlet-



Bild 22: Polar-II-Dummy von Honda (Honda, 2004; TAKAHASHI, 2007)

zung hängt sowohl von der Größe der Kontaktfläche als auch von der Höhe der Kraft ab. Eine alleinige Messung der Beschleunigung im Kopfschwerpunkt ist hier nicht ausreichend. Zur vereinfachten Abbildung dieses zusätzlichen Verletzungsrisikos können bspw. so genannte Pendelimpaktoren eingesetzt werden, wie sie bereits im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes APROSYS untersucht wurden (BOVENKERK, 2008c).

Für eine mögliche Umsetzung eines Prüfstands zur Bestimmung dieser zusätzlichen Belastungswerte wie z. B. Kontaktkräfte sind verschiedene Ansätze denkbar. Zum einen kann der bereits existierende ECE-R21-Insassenschutz-Prüfstand (ECE, 2007a) angepasst werden, zum anderen können bestehende Prüfstände um ein Rotationselement ergänzt werden. Aktuelle Prüfstände kombinieren bereits die Möglichkeit zur Durchführung beider Versuche durch einen Aufsatz am Prüfstand (siehe BOVENKERK, 2009c, Bild 5-65).

Neben den rein experimentellen Bewertungen können innerhalb eines Bewertungsverfahrens auch numerische Berechnungsmodelle integriert werden. Aufgrund der Vielzahl existierender Berechnungsverfahren (bspw. Finite-Elemente-Methode oder Mehrkörpersysteme), möglicher Solver (bspw. LS-DYNA, ABAQUS oder Nastran) sowie fehlender globaler Validierungsrichtlinien können Testeinrichtungen derzeit eine objektive Bewertung nicht gewährleisten. Innerhalb eines parallel laufenden, von der Europäischen Kommission geförderten Forschungsprojektes werden derzeit solche Validierungsrichtlinien erarbeitet (vgl. IMVITER, 2012). Mithilfe numerischer Berechnungsmodelle können sämtliche bereits genannten Prüfmethode wie statische und dynamische Impaktoranprallversuche gegen ruhende Fahrzeuge sowie Anfahrversuche

gegen stehende Crash-Dummys deutlich kostengünstiger nachgebildet werden. Die Anerkennung globaler Validierungsrichtlinien stellt daher zukünftig eine wesentliche Weiterentwicklung der Bewertungsverfahren dar.

2.2.3 Analyse existierender Ansätze zur Bewertung crash-aktiver Systeme

Die Bewertung crash-aktiver Systeme bleibt bei der bisherigen Entwicklung von Prüfverfahren zum Fußgängerschutz weitgehend unberücksichtigt. Lediglich zwei Ansätze sowie eine ausgearbeitete Prüfprozedur konnten im Rahmen der innerhalb des vorliegenden Projekts durchgeführten Literaturrecherche gefunden werden. So wurde im Rahmen der Entwicklung einer „Globalen Technischen Regelung“ (GTR) ein Vorschlag für ein Zertifizierungsprotokoll für derartige Systeme entwickelt (ECE, 2005). Des Weiteren wurde im Rahmen des Vorgängerprojekts (FE 82.308/2006) ein Ansatz zur Bewertung crash-aktiver Systeme erarbeitet (BOVENKERK, 2009c). Das einzige komplett ausgearbeitete Prüfverfahren wurde 2011 von der Verbraucherschutzorganisation Euro NCAP veröffentlicht. Vor- und Nachteile der verschiedenen Prüfverfahren bzw. Vorschläge werden im Kapitel 3 näher erläutert.

Für die Entwicklung eines globalen Standards wurde im Rahmen der GTR-Diskussionen ein Zertifizierungsprotokoll für crash-aktive Systeme vorgeschlagen und akzeptiert (vgl. BOVENKERK, 2009c, Bild 2-6). Die Einzeichnung der Prüfbereiche erfolgt hierbei im aktivierten Zustand des Systems. Falls die Systemeigenschaften eine statische Aufstellung nicht ermöglichen, bspw. bei einem externen Airbag, können die Prüfbereiche auch im nicht aktivierten Zustand eingezeichnet werden. Die Kopf-

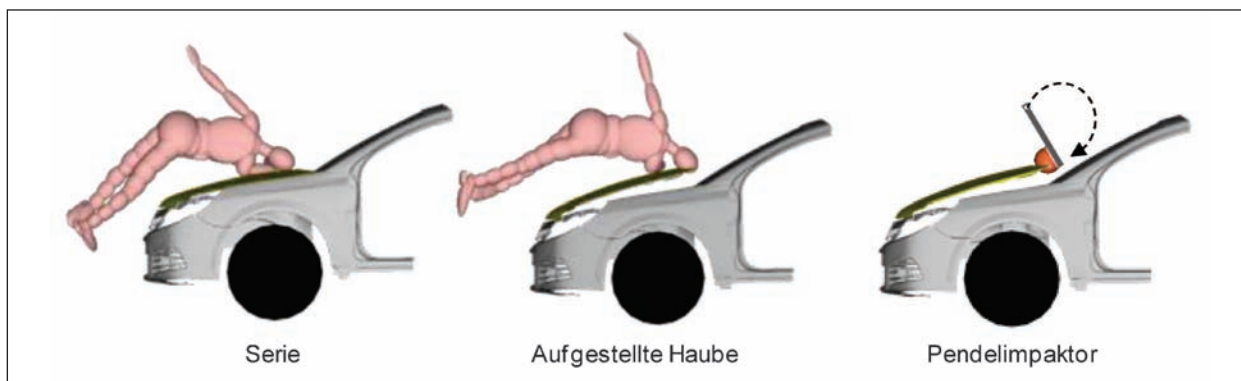


Bild 23: Kopfaufprall 50%-Mann gegen nicht aufgestellte und aufgestellte Haube sowie Abbildung des Kopfaufpralls durch Pendelimpaktor (BOVENKERK, 2009c)

aufprallzeit (Head Impact Time – HIT) verschiedener Fußgängermodelle wird zunächst bei definierter Schrittstellung und einer Kollisionsgeschwindigkeit von 40 km/h ermittelt. Zusätzlich muss die Systemantwortzeit (Total Response Time – TRT) bestimmt werden, die sich aus der Sensierzeit (Sensor Time – ST) des Kontaktsensors und der Aufstellzeit (Deployment Time – DT) des crash-aktiven Systems ergibt (siehe BOVENKERK, 2009c, Bild 4-13). Im Rahmen dieses Vorschlags werden zwei Bedingungen an das crash-aktive System gestellt. Zum einen muss die TRT kleiner sein als die HIT, damit sich das crash-aktive System vor Kopfaufprall bereits in der Endposition befindet, des Weiteren muss das System eine ausreichende Standzeit aufweisen, damit es sich beim Kopfaufprall noch in aktivierter Stellung befindet. Erfüllt das crash-aktive System diese beiden Bedingungen, wird das Kopfverletzungsrisiko anhand von Kopfimpaktoranprallversuchen auf das statische, da in ausgelöster Position befindliche System bestimmt. Falls diese Bedingungen nicht erfüllt werden oder falls in dem zu bewertenden System ein Airbag integriert ist, werden Anprallversuche auf das dynamische, d. h. sich aufstellende System durchgeführt (ECE, 2005). Innerhalb dieses Vorschlags wird eine geeignete Überprüfung der Funktionsweise der Erkennungssensorik vernachlässigt. Des Weiteren erfolgt keine Berücksichtigung der zulässigen Haubendeformation infolge der Belastung durch den Oberkörper (s. Bild 24).

Innerhalb des Vorgängerprojektes FE 82.308/2006 wurde ein Testverfahren für den Frontscheibenbereich erarbeitet (siehe Bild 25). Hierbei wurde auch

eine mögliche Anwendbarkeit für crash-aktive Systeme berücksichtigt. Der wesentliche Unterschied zu dem in ECE (2005) vorgeschlagenen Zertifizierungsprotokoll ist die Einordnung der Fahrzeuge in vier verschiedene Kategorien, wobei für jede Kategorie basierend auf zahlreichen Simulationsergebnissen unterschiedliche Bewertungsrandbedingungen definiert werden. Zu diesen Bewertungsrandbedingungen zählen bspw. Testwinkel, -geschwindigkeit und -bereich sowie der zu verwendende Impaktor. Vergleichbar mit dem Zertifizierungsprotokoll ist der Aufbau eines hybriden Testverfahrens, wobei zur Bewertung des Fahrzeugs neben Versuchs- auch Simulationsergebnisse herangezogen werden. So wird bspw. die Bedingung ($TRT < HIT$) auch mithilfe von Simulationen bestimmt. Neben der Kopfaufprallzeit wird auch der Kopfaufprallort zur Auswahl der Testpunkte verwendet. Neben dem üblichen Kopfverletzungskriterium werden weitere Verletzungsrisiken wie bspw. aus der Rotationsbewegung resultierende Halsbelastungen herangezogen (BOVENKERK, 2009c).

2011 veröffentlichte Euro NCAP mit der Version 5.3 des Bewertungsprotokolls der fahrzeugseitigen Fußgängersicherheit auch eine Testprozedur für crash-aktive Systeme (Euro NCAP, 2011). In dieser Testprozedur wird im Vergleich zu den bisher vorgestellten Verfahren zum ersten Mal die Überprüfung einer korrekten Funktionsweise der Sensorik und Aktuatorik fokussiert (siehe Bild 26).

Hierbei soll der Hersteller mithilfe von Simulationen den Nachweis erbringen, welche von vier vorgegebenen Fußgängerklassen (6-jähriges Kind,

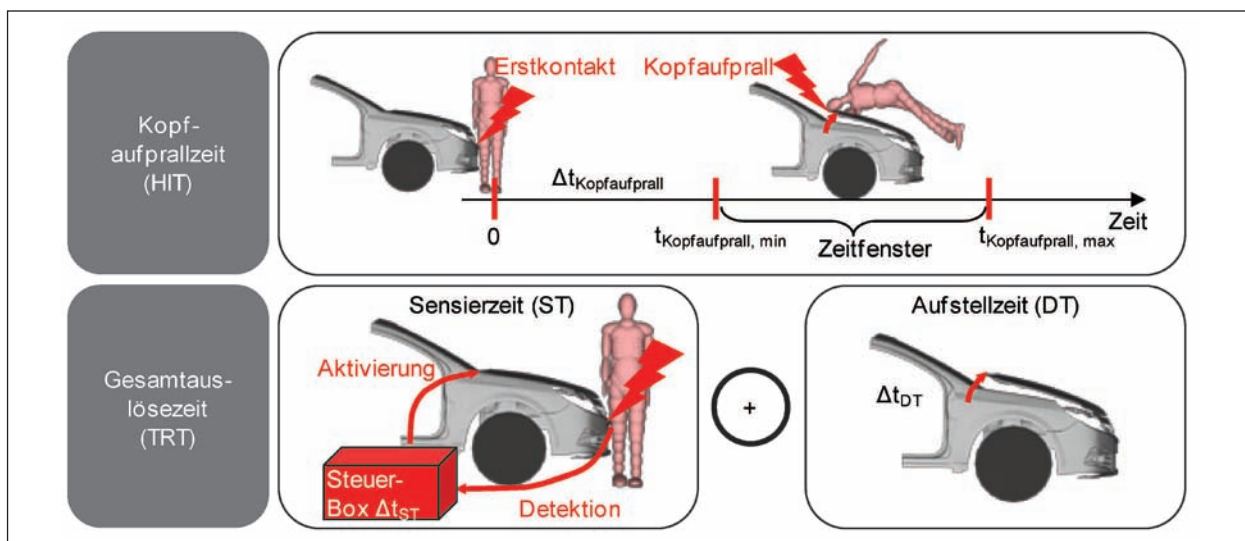


Bild 24: Funktionsbedingung für crash-aktive Systeme (ECE, 2005)

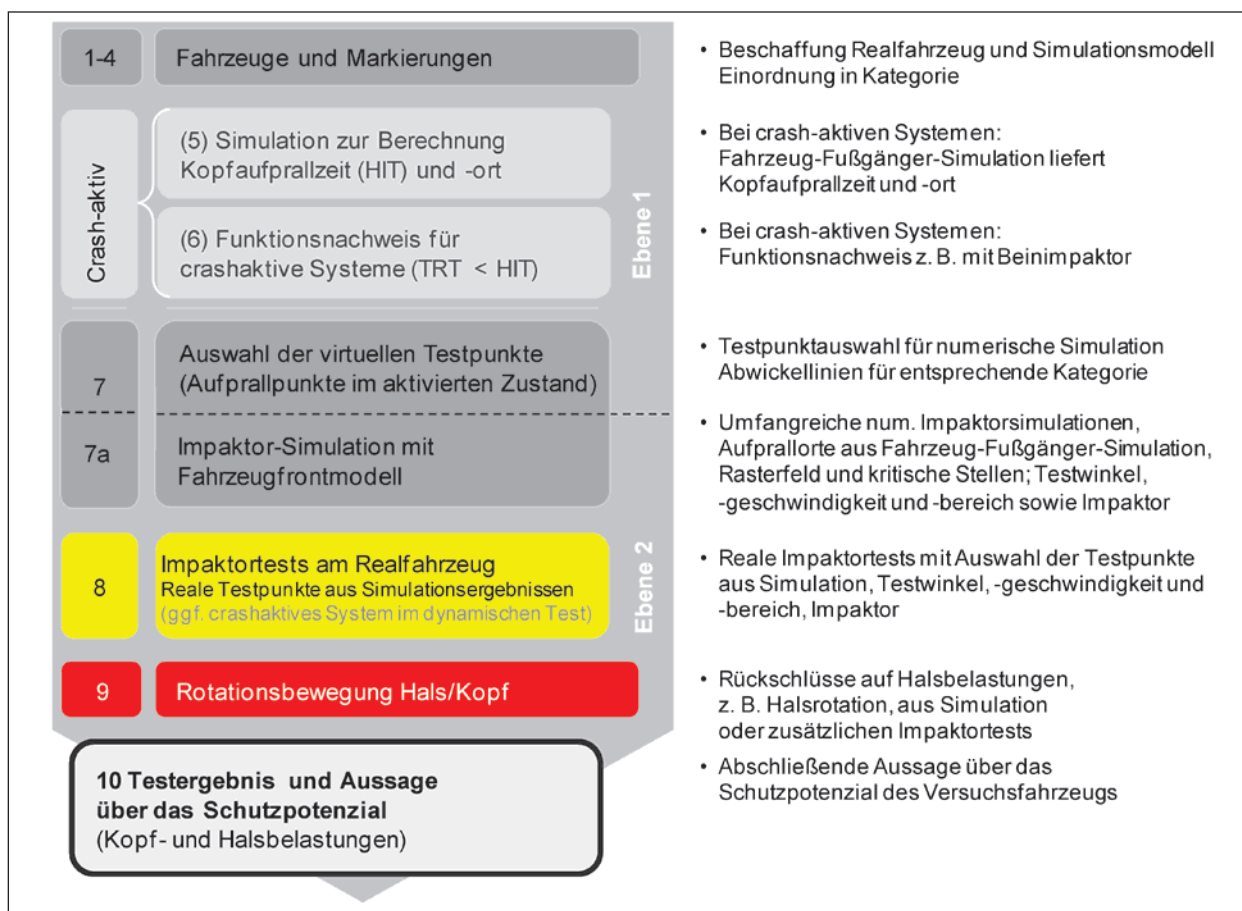


Bild 25: Fußgängerschutz-Testverfahren für den Frontscheibenbereich (BOVENKERK, 2009c)

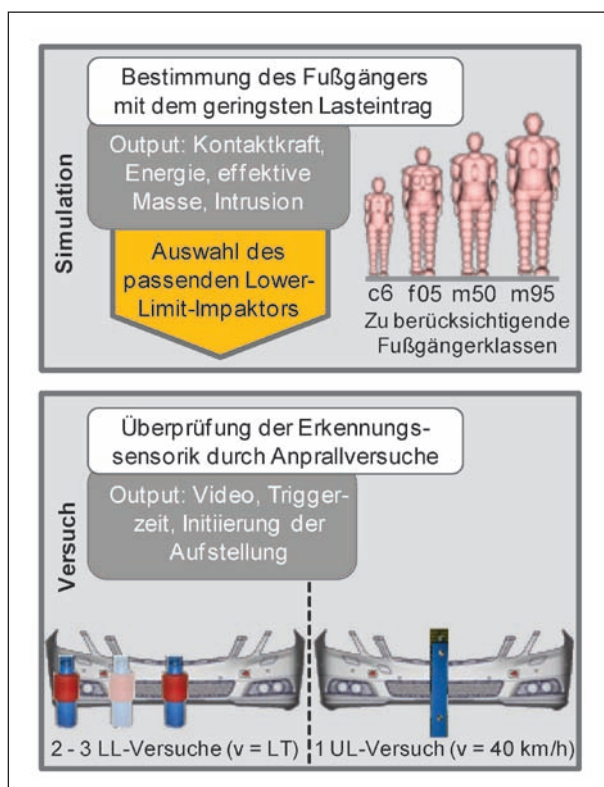


Bild 26: Sensorikbewertung nach (Euro NCAP, 2011)

5%-Frau, 50%-Mann oder 95%-Mann) den geringsten Lasteintrag in das Fahrzeug einleitet. Hierzu können verschiedene Simulationsmodelle verwendet werden, welche im Anhang des Testprotokolls genauer spezifiziert werden. Basierend auf diesen Ergebnissen wählt Euro NCAP gemeinsam mit dem Hersteller einen passenden Lower-Limit-Impaktor aus, wobei in der derzeitigen Version 5.3.1 kein Lower-Limit-Impaktor direkt genannt wird (vgl. Kapitel 2.2.1). Mit dem ausgewählten Impaktor werden anschließend abhängig von der Sensorposition zwei bis drei Anprallversuche bei der unteren Grenze der vom Hersteller angegebenen Auslösegeschwindigkeit zur Überprüfung der Erkennungssensorik durchgeführt. Zur Überprüfung der oberen Grenze (engl. „Upper Limit“ oder UL) wird zusätzlich ein Anprallversuch mit dem für die Bewertung der biomechanischen Beinbelastungen eingesetzten Prüfkörper bei einer Geschwindigkeit von 40 km/h durchgeführt. Neben der Erkenntnis, ob der Fußgängeranprall in den verschiedenen Anprallversuchen erkannt wurde, wird hierbei die Triggerzeit bestimmt sowie die Initiierung der Aufstellung nachgewiesen.

Innerhalb der von Euro NCAP veröffentlichten Prüfprozedur crash-aktiver Fußgängerschutzsysteme wird das Kopfverletzungskriterium ähnlich wie bei ECE (2005) sowie BOVENKERK (2009c) mithilfe statischer oder ggf. dynamischer Anprallversuche bewertet (siehe Bild 27). Die Versuchsart wird hierbei ebenfalls mithilfe des zeitlichen Kriteriums ($TRT < HIT$) definiert. Zusätzlich wird die Art der Aktuatorik berücksichtigt. Nicht einrastende Systeme können daher nur dynamisch getestet werden. Die Anprallgeschwindigkeit des Kopffimpaktors beträgt bei diesen Versuchen, wie bei der Bewertung passiver Systeme, 40 km/h. Crash-aktive Systeme müssen allerdings zusätzlich unterhalb der unteren Auslösegeschwindigkeit eine ausreichende Leistungsfähigkeit aufweisen. Daher werden weitere Kopffimpaktor-anprallversuche bei geschlossenem Schutzsystem mit einer Geschwindigkeit unterhalb der unteren Auslösegeschwindigkeit durchgeführt (Euro NCAP, 2011).

Zusätzlich wird in Euro NCAP (2011) der Einfluss der Haubenintrusion infolge der Belastung durch den Oberkörper berücksichtigt (Bild 28). Demnach darf der Deformationsfreiraum am Kopfaufprallort zu unter der Haube befindlichen steifen Komponenten durch die Belastung des Oberkörpers zum Zeitpunkt des Kopfaufpralls nicht vollständig redu-

ziert werden (siehe Kapitel 2.6.1.3 in Euro NCAP, 2011). Außerdem darf die Differenz der Eindrückung der aufgestellten Haube zur Eindrückung der geschlossenen Haube nicht mehr als 75 % der Aufstellhöhe betragen. Diese Anforder-

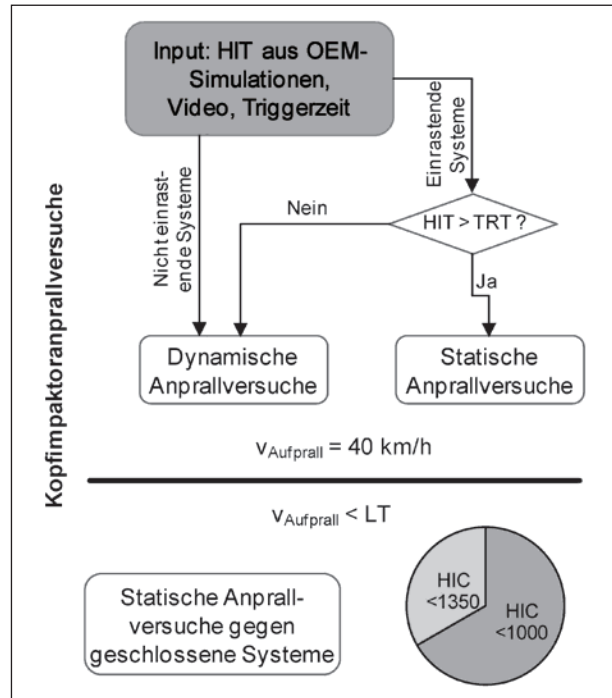


Bild 27: Einordnung der Versuchsrandbedingungen zur Bewertung crash-aktiver Systeme nach Euro NCAP (2011)

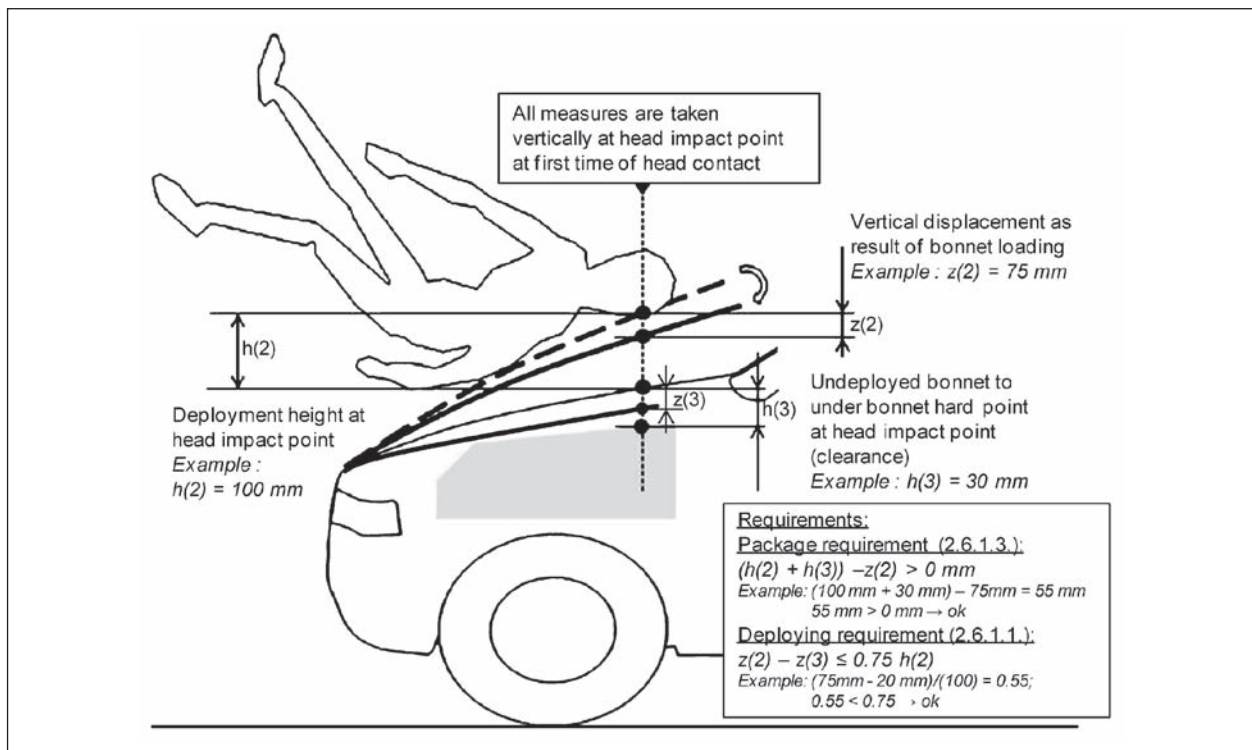


Bild 28: Bewertung der Haubeneindrückung durch die Oberkörperbelastung nach Euro NCAP (2011) inklusive Anmerkungen

zung wird im Prüfprotokoll nicht durch eine Gleichung, sondern nur in Textform beschrieben. Durch diese umständlichen Formulierungen wird die eigentlich erforderliche Transparenz dieser Anforderung nicht gewährleistet. Bei bestimmten Konstellationen (bspw. $h(2) = 110$ mm, $z(2) = 130$ mm, $h(3) = 60$ mm, $z(3) = 50$ mm) wäre demnach eine Reduktion der gesamten Aufstellung zulässig. Simplere, aber klarere Anforderungen erscheinen hier sinnvoll.

3 Anforderungen an Sensorik und Aktuatorik crash-aktiver Systeme

Crash-aktive Systeme zur Erhöhung der Fußgängersicherheit können wie im vorherigen Kapitel beschrieben in sensorische und aktuatorische Komponenten eingeteilt werden. Mithilfe der Sensorik wird der Unfallgegner charakterisiert. Falls es sich hierbei um einen Fußgänger handelt, wird das Schutzsystem aktiviert und mithilfe der Aktuatorik aufgestellt bzw. entfaltet. Nur falls beide Komponenten zuverlässig funktionieren, kann ein sicherer Fußgängerschutz gewährleistet werden. Innerhalb eines entsprechenden Prüfverfahrens ist eine Bewertung beider Komponenten daher sinnvoll.

Zur Bewertung kontaktbasierter Sensorsysteme werden häufig so genannte Lower-Limit-Impaktoren eingesetzt, welche die Fußgänger mit geringen Lasteinträgen in die Fahrzeugfront nachbilden sollen. Unklar ist bisher jedoch, welche Fußgängerklassen bei welchen Fahrzeugkategorien die geringsten Lasteinträge erzeugen. Innerhalb des

Kapitels 3.1 wird eine umfassende Analyse, basierend auf numerischen und experimentellen Untersuchungen, der von den Fußgängern erzeugten Lasteinträge in die Fahrzeugfront beschrieben und mit aktuellen Lower-Limit-Impaktoren verglichen.

In bereits veröffentlichten Ansätzen zu Prüfverfahren crash-aktiver Systeme wird nur zum Teil der Einfluss des Fußgängeroberkörpers auf den Deformationsfreiraum im Kopfanprallbereich berücksichtigt. Die Auswirkung der Motorhaubenintrusion auf das Kopfverletzungskriterium wird im Kapitel 3.2 detailliert analysiert. Des Weiteren wird die Auslegung eines experimentellen Ersatzprüfverfahrens für dieses Anprallszenario beschrieben.

3.1 Entwicklung eines Anforderungskatalogs für kontaktbasierte Fußgängererkennungssysteme

Kontaktbasierte Fußgängererkennungssysteme charakterisieren im Falle eines Unfalls den Unfallgegner anhand des in die Fahrzeugfront eingeleiteten Lasteintrags. Im Rahmen eines Bewertungsverfahrens durch eine Testeinrichtung ist daher nachzuweisen, dass diese Systeme bei realistischen Lasteinträgen stets eine Aktivierung des Schutzsystems einleiten. Crash-aktive Systeme werden erst im Falle einer von der Sensorik erkannten Kollision aktiviert und dienen vornehmlich zur Verringerung des Kopfverletzungsrisikos. Der Kopf eines Fußgängers prallt innerhalb der ersten 170 ms nach Erstkontakt gegen das Fahrzeug (vgl. Tabelle 2). Daher sollte sich das Schutzsystem bereits zu diesem Zeitpunkt in der endgültigen Position befinden.

	A*	B**	C***	D****	Tran*****	Lit*****	Δ_{max}
6yo	54 bis 60	24 bis 43	28 bis 61	69 bis 87	21 bis 32	35 bis 59	21 bis 87
05f	91 bis 107	71 bis 98	63 bis 107	109 bis 116	71 bis 74	61 bis 111	61 bis 116
50m	122 bis 139	94 bis 100	80 bis 121	127 bis 139	77 bis 134	101 bis 123	77 bis 139
95m	132 bis 146	115 bis 140	97 bis 145	146 bis 169	91 bis 105	120 bis 150	91 bis 169

*: Sedan: BMW 3er 1999, Opel Vectra 2003, Renault Megane 2004 (BREUER, 2007)
 **: SUV: Opel Frontera 1996, Suzuki Grand Vitara 2004, Jeep Grand Cherokee 1999 (BREUER, 2007)
 ***: OneBox: Smart 1998, Nissan Serena 1996, Honda Civic 2006, VW Sharan 2000 (BREUER, 2007)
 ****: Sportwagen: Smart Roadster 2003, Mazda MX5 1994, Opel Tigra 1997 (BREUER, 2007)
 *****: Transporter: Renault Trafic 2006, Renault Master 2006 (BOVENKERK, 2008)
 *****: Literatur: Fünf weitere Fahrzeugklassen ohne Angabe der einzelnen Fahrzeuge (KÜHN, 2004)

Tab. 2: Kopfanprallzeiten eines Fußgängers in ms im Falle einer Kollision mit verschiedenen Fahrzeugkategorien (Anprallgeschwindigkeit: 40 km/h, Anprallposition: Fahrzeugmitte; Simulationsmethode: MADYMO)

In 63 % aller Fahrzeug-Fußgängerunfälle handelt es sich um einen links- bzw. rechtsseitigen Anstoß des Fußgängers durch die Fahrzeugfront (KÜHN, 2007). Hierbei steht der Fußgänger senkrecht zur Fahrtrichtung und wird zunächst im Bereich des Knies getroffen, gefolgt von einem Anprall im Unterschenkel sowie der Hüfte (siehe Bild 29).

Bei einem solchen Anprall findet üblicherweise ein Erstkontakt im Bereich der unteren Extremitäten des Fußgängers mit der Fahrzeugfront statt. Der während dieses Anpralls in die Fahrzeugfront eingeleitete Lasteintrag hängt u. a. von den folgenden Parametern ab:

- Körpergröße und -gewicht des Fußgängers,
- Schrittstellung des Fußgängers,
- Fahrzeuggeschwindigkeit,
- Fahrzeugkategorie bzw. Höhe relevanter Lastpfade und sich daraus ergebender Anstoßpunkte am Fahrzeug,
- Einfluss von Funktionsweise und Positionierung im Fahrzeug verwendeter Sensoren.

Um realistische Lasteinträge zur Charakterisierung des Fußgängeranpralls zu bestimmen, werden zunächst relevante Lastpfade für vier verschiedene Kategorien definiert. Ein Ersatzfahrzeugmodell zur Abbildung der Lastpfade dieser Fahrzeugkategorien wird sowohl als Hardware- als auch als Simulationsmodell aufgebaut. Anhand verschiedener Versuche und numerischer Berechnungen mit zur Zeit der Projektbearbeitung verfügbaren Lower-Limit-Impaktoren wird eine Validierung des Simulationsmodells durchgeführt. Anschließend erfolgt eine umfangreiche Berechnung verschiedener Fahrzeug-Fußgänger-Konstellationen zur Bestimmung realistischer Lasteinträge sowie entsprechender Worst-Case-Szenarien. Die einzelnen Arbeiten werden im Folgenden umfassend beschrieben.

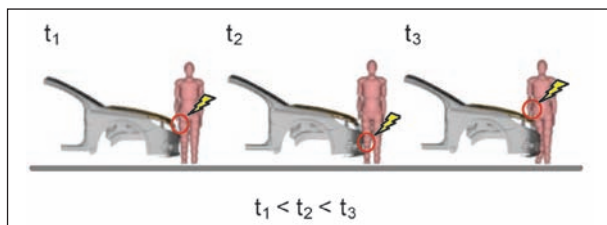


Bild 29: Zeitlicher Ablauf eines Erstkontakts einer Fahrzeug-Fußgänger-Kollision

3.1.1 Entwicklung eines Ersatzfahrzeugmodells zur Abbildung relevanter Fahrzeugkategorien

Zur Berücksichtigung des Einflusses der Fahrzeugfronten aktueller Fahrzeugkategorien wird die im Vorgängerprojekt erarbeitete Datenbank (vgl. BOBENKERK, 2009c) um ca. 60 Fahrzeuge mit einem Baujahr nach 2005 erweitert. Die Fahrzeuge werden hierbei entsprechend dem im Vorgängerprojekt erarbeiteten Klassifizierungsverfahren (vgl. BOBENKERK, 2009c, Bild 4-6) anhand ihrer äußeren Geometrie in die folgenden vier Kategorien eingeteilt:

- Kategorie A: Sedan,
- Kategorie B: SUV,
- Kategorie C: OneBox,
- Kategorie D: Sportwagen.

Da die Fußgängererkennung mit kontaktbasierten Sensoren in einem sehr kurzen Zeitraum erfolgen muss, werden diese Sensoren i. d. R. in die Fahrzeugfront integriert. Im Falle einer Kollision eines 50%-Manns mit einem limousinenförmigen Fahrzeug findet der Erstkontakt zwischen Stoßfänger und Knie statt (vgl. Bild 29). Aufgrund der anschließenden Rotation der Körperteile unterhalb bzw. oberhalb des Knies, respektive Unter- bzw. Oberschenkel, tritt im Folgenden zunächst ein Kontakt mit der Fahrzeugunterkante („Lower Support“) sowie mit der Motorhaubenvorderkante auf. Aufgrund dieses charakteristischen Anprallvorgangs kann die Fahrzeugfront durch drei Lastpfade gemäß Bild 30 generisch abgebildet werden.

Die Position dieser relevanten fahrzeugseitigen Lastpfade wird für sämtliche Fahrzeugkategorien

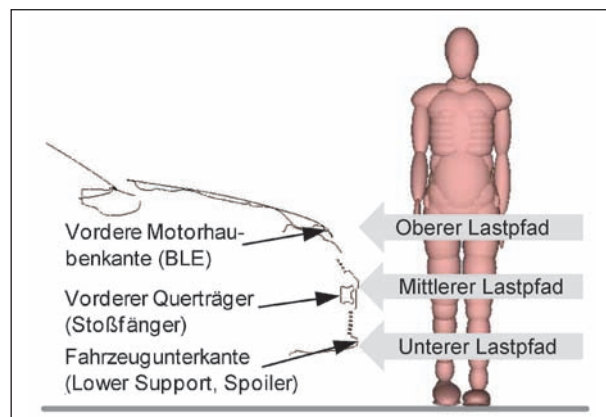


Bild 30: Charakteristische Lastpfade beim Fußgängeranprall

mithilfe von Konturlinien der äußeren Fahrzeuggeometrie bestimmt. Die Konturlinien für die Fahrzeuge der Kategorie A sind beispielhaft in Bild 31 dargestellt.

Um den Einfluss der verschiedenen Fahrzeugkategorien möglichst umfassend analysieren zu können, wird aus jeder Kategorie ein Fahrzeug zur Abbildung des Mittelwerts dieser Fahrzeugklasse definiert. Zusätzlich wird aus der Fahrzeugkategorie D (Sportwagen) ein Fahrzeug mit der niedrigsten Fahrzeugfront und aus der Fahrzeugkategorie B (SUV) ein Fahrzeug mit der höchsten Fahrzeugfront berücksichtigt. Die entsprechenden Konturlinien der anderen Fahrzeugkategorien sind in Bild 96 dargestellt.

Die generische Abbildung einer Fahrzeugfront zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Lastpfadpositionen auf die Unfallkinematik sowie Verletzungsschwere eines Fußgängers bei der Kollision mit einem Fahrzeug wurde, wie in Bild 32 dargestellt, bereits in verschiedenen Studien untersucht (MANNING, 2007; ROTH, 2007; Concept, 2009; RATHJE, 2009; BIECK, 2010; UNTAROIU, 2010).

Das innerhalb des vorliegenden Projektes entwickelte Ersatzfahrzeugmodell wird sowohl als Hardware- als auch als Simulationsmodell aufgebaut, um eine Validierung des Simulationsmodells zu ermöglichen. Innerhalb der hierzu durchzuführenden Versuche kann anhand eines Praxistests die Einsatztauglichkeit verfügbarer Lower-Limit-Impak-

toren zur Zeit der Projektbearbeitung bewertet werden. Daher soll das zu entwickelnde Ersatzfahrzeugmodell auf einen gewöhnlichen Versuchsschlitten montiert werden können. Um diesen Schlitten mithilfe einer Biegeblechbremse verzögern zu können, wird das Ersatzfahrzeugmodell seitlich versetzt auf dem Versuchsschlitten angebracht. Durch einen ausreichend großen Abstand zu den Rädern des Schlittens können eventuelle Beschädigungen der Impaktoren durch ein Überrollen durch den Schlitten vermieden werden. Bild 33 zeigt, dass das entwickelte Ersatz-

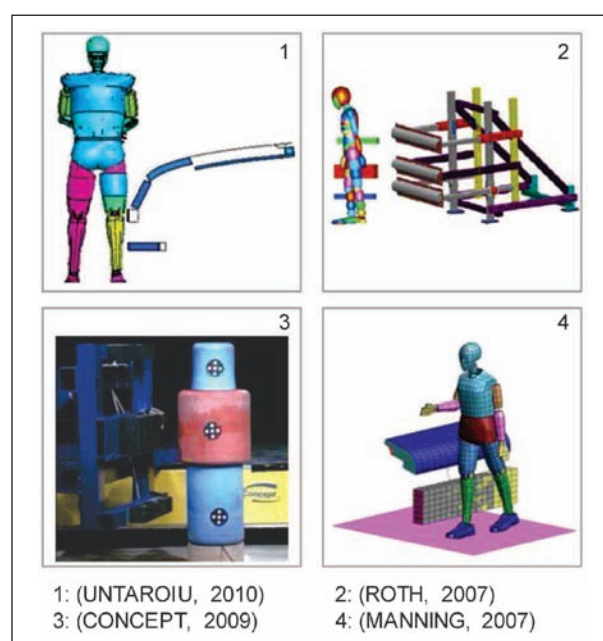


Bild 32: Übersicht bestehender Ersatzfahrzeugmodelle

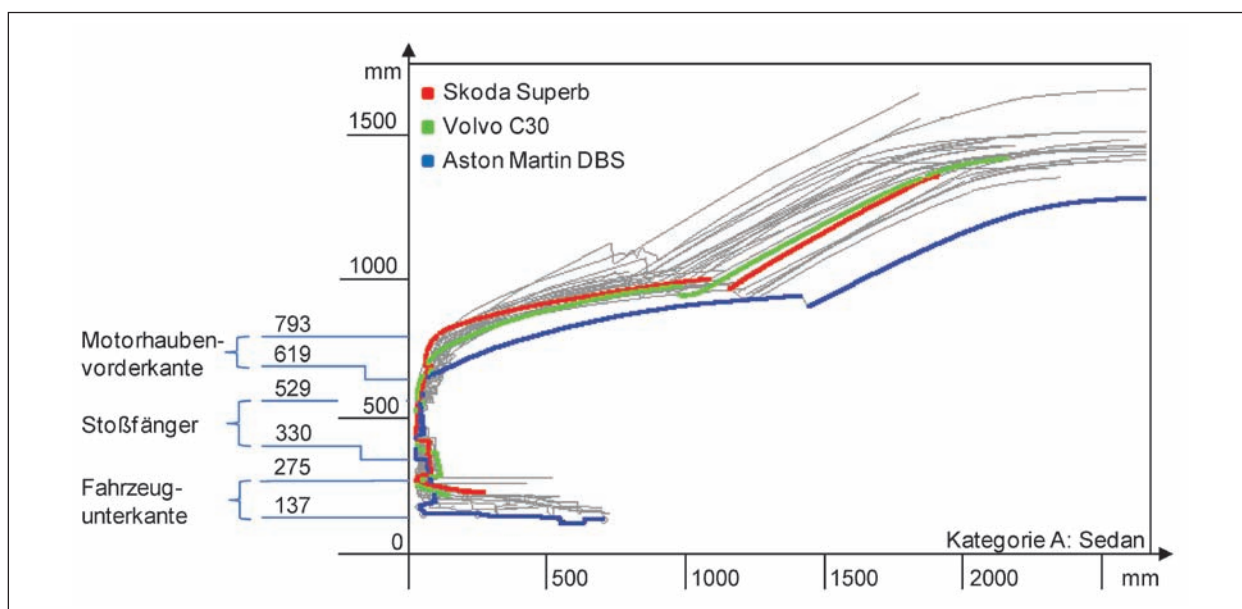


Bild 31: Fahrzeugkonturen der Kategorie A

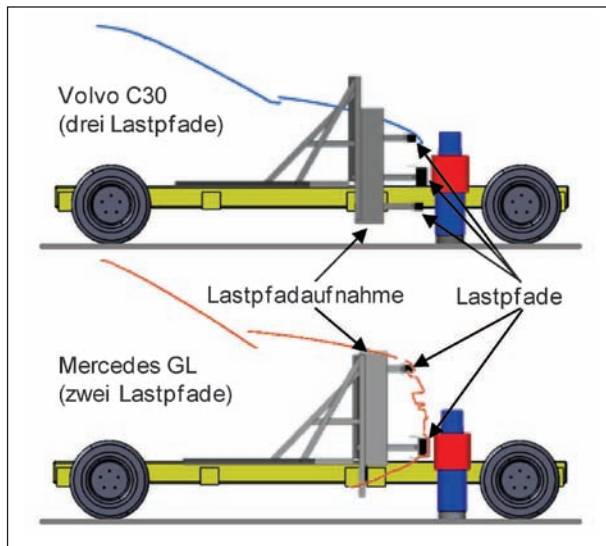


Bild 33: Abbildung der Fahrzeugfront durch Ersatzfahrzeugmodell

fahrzeugmodell die äußere Fahrzeugform der entsprechenden Kategorien hinreichend genau abbilden kann.

Um die relevanten Fahrzeugkategorien (Kategorie A, B, C und D) mithilfe des Ersatzfahrzeugmodells abbilden zu können, sind sowohl die Lastpfadaufnahmen als auch die einzelnen Lastpfade variabel positionierbar (siehe Bild 33). Ein entsprechendes Konstruktionsmodell des Ersatzfahrzeugmodells wird erstellt. Nicht alle betrachteten Fahrzeuge weisen die drei relevanten Lastpfade (Motorhaubenvorderkante, Stoßfänger, Fahrzeugunterkante „Lower Stiffener“) auf, weshalb manche Fahrzeugformen nur mithilfe zweier Lastpfade abgebildet werden (z. B. Mercedes GL in Bild 33).

Aufgrund der sehr hohen Diskrepanz hinsichtlich der Höhe der Motorhaubenvorderkante der verschiedenen Fahrzeugkategorien (v. a. Kategorie B und Kategorie D) muss für das Ersatzfahrzeugmodell der Kategorie D eine angepasste Lastpfadaufnahme entwickelt werden (siehe Bild 34). Andernfalls wäre, wie in Bild 35 dargestellt, bei einem Anprall mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 55 km/h ein Kontakt mit der Lastpfadaufnahme innerhalb von 20 ms nach Erstkontakt nicht auszuschließen. Dieser Kontakt würde aufgrund der hierdurch veränderten Unfallkinematik den Lasteintrag in die Fahrzeugfront beeinflussen.

Zur generischen Abbildung des mittleren Lastpfads wird ein rechteckförmiger Schaumblock mit den Abmaßen 400 x 70 x 120 mm ausgewählt, da diese Geometrie, wie auch anhand Bild 33 sowie Bild 34

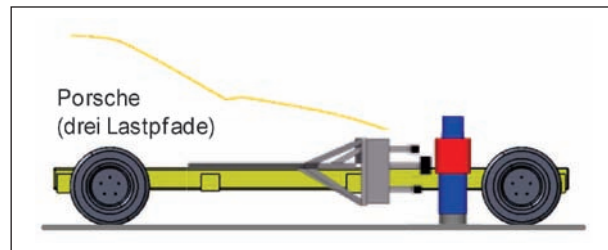


Bild 34: Angepasste Lastpfadaufnahme für Kategorie D

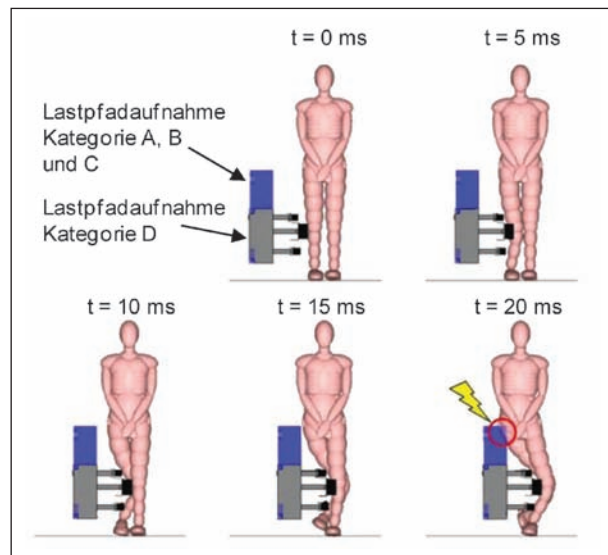


Bild 35: Einfluss der Höhe der Lastpfadaufnahme auf die Unfallkinematik bei einer Anprallgeschwindigkeit von 55 km/h gegen einen 50m-Fußgänger

ersichtlich, der äußeren Form des Stoßfängers annähernd entspricht. Für den oberen und unteren Lastpfad werden kleinere Schaumblocke verwendet (Abmaß 400 x 50 x 50 mm), da die hier abzubildende Fahrzeugform (v. a. der „Lower Stiffener“) im Vergleich zur restlichen Außenhaut deutlich abgegrenzt ist. Die horizontalen und vertikalen Positionen der verschiedenen Lastpfade sind in Tabelle 3 angegeben.

Die Steifigkeit der Schaumblocke wird anhand der in Bild 36 dargestellten Untersuchungen von IEE ausgewählt (MARX, 2011). Hierbei wird der Anprall eines IEE-Impaktors gegen verschiedene Fahrzeugfronten anhand der im Impaktor auftretenden Beschleunigung mithilfe numerischer Berechnungen analysiert. Basis dieser Analyse stellen sieben Gesamtfahrzeugmodelle (Dodge Neon sowie Fahrzeug 1 bis 6) dar. Beim Anprall des IEE-Impaktors gegen die Fahrzeugmodelle 1, 3, 4, 5 und 6 treten eher geringe Beschleunigungen auf, während das Fahrzeug 2 sowie der Dodge Neon deutlich höhere Beschleunigungen verursachen.

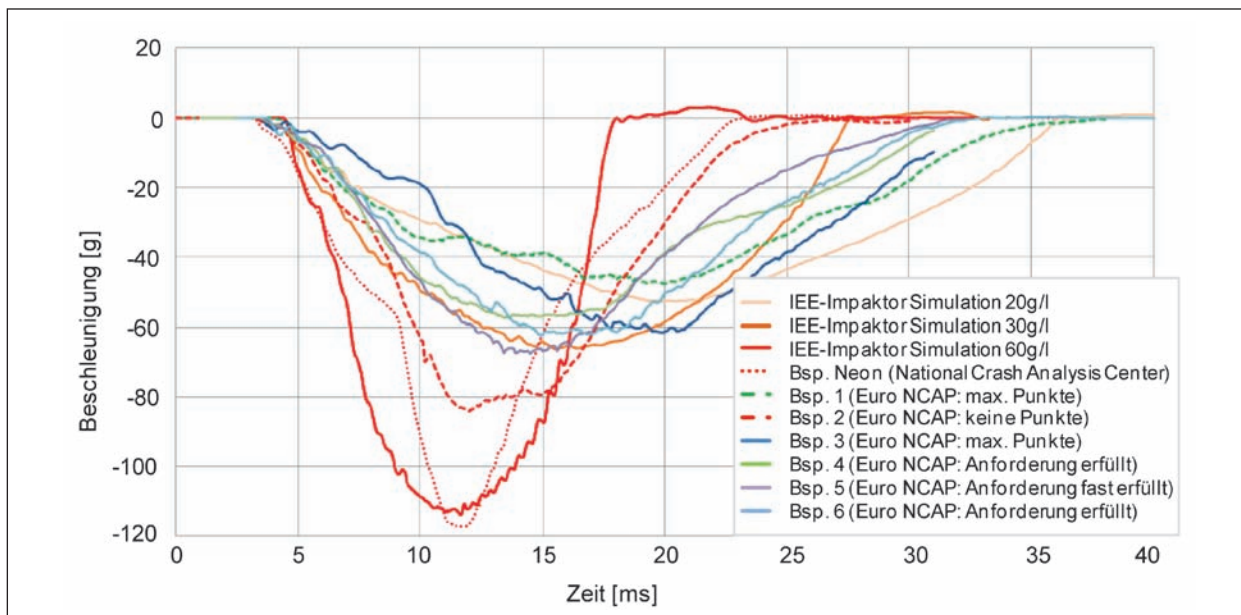
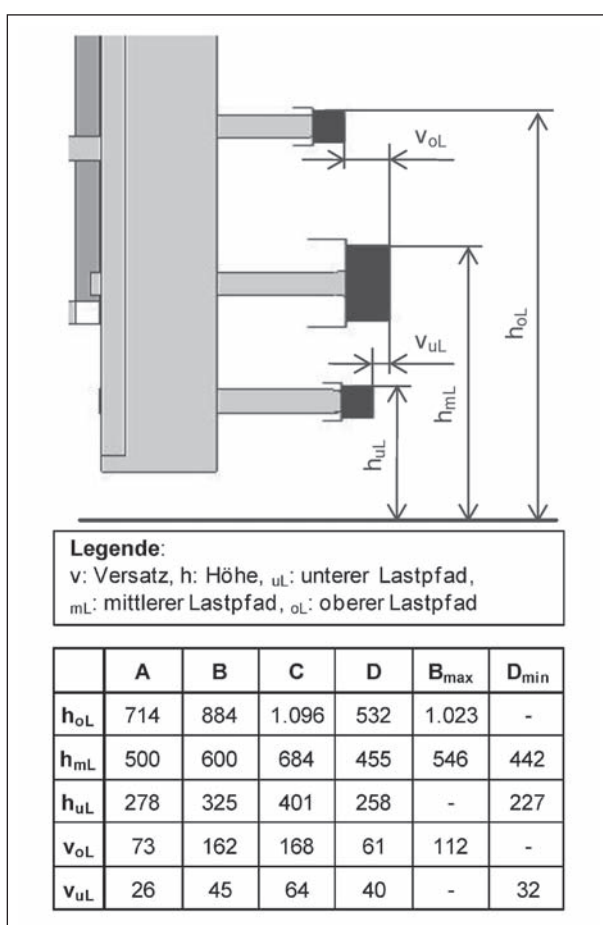


Bild 36: Vergleich des Einflusses verschiedener Frontsteifigkeiten anhand des numerisch ermittelten Beschleunigungsverlaufs des IEE-Impaktors kombiniert mit den Euro-NCAP-Ergebnissen beim LowerLeg-Anprall nach MARX (2011)



Tab. 3: Lastpfadpositionen für relevante Kategorien in [mm]

Neben den Beschleunigungen ist auch das Ergebnis entsprechend der Euro-NCAP-LowerLeg-Bewertung angegeben. Die Angabe variiert hierbei

zwischen max. Punkte (6 Punkte), Anforderungen erfüllt (3 bis 5 Punkte), Anforderungen fast erfüllt (1 bis 2 Punkte) und keine Punkte (0 Punkte). Die auftretenden Beschleunigungen korrelieren mit dem Ergebnis beim LowerLeg-Anprall nach Euro NCAP. Fahrzeug 2 erzeugt bspw. einen sehr hohen Beschleunigungspeak und bekommt keine Punkte bei Euro NCAP, während Fahrzeug 1 geringe Beschleunigungen generiert und die Höchst-Bewertung nach Euro NCAP erreicht.

Des Weiteren führte IEE numerische Berechnungen des Anpralls des IEE-Impaktors mit generischen Fahrzeugfronten bestehend aus drei Lastpfaden durch. Hierbei untersuchte IEE die Auswirkungen des Anpralls gegen Schaumstoffblöcke aus expandiertem Polypropylen (EPP) mit einer Formteildichte von 20, 30 sowie 60 g/l. Eine Fahrzeugfront mit einer guten Bewertung nach Euro NCAP kann demnach mithilfe von EPP-Schaumstoffblöcken von 30 g/l am besten angenähert werden (vgl. Bild 36).

Um innerhalb der vorliegenden Untersuchung zusätzlich auch Fahrzeuge mit einer steiferen Fahrzeugfront berücksichtigen zu können, werden EPP-Schaumstoffblöcke mit einer Formteildichte von 30 g/l und 60 g/l verwendet. In den bereits angesprochenen Validierungsversuchen wird hierfür das Material Neopolen® P eingesetzt.

3.1.2 Aufbau eines Simulationsmodells

Der bei einem Fußgängeranprall erzeugte Lasteintrag in die Fahrzeugfront kann mithilfe von Simulationen bestimmt werden. Zu diesem Zweck können sowohl Simulationen mit Mehrkörpersystemen (MKS) zur Untersuchung der Unfallkinematik als auch mit der Finiten-Elemente-Methode (FEM) zur Analyse auftretender Deformationen durchgeführt werden.

Zum Zeitpunkt der Projektdurchführung sind mehrere Dummy-, Mensch- bzw. Fußgängermodelle erhältlich. Hierzu zählt neben der Mehrkörper-Fußgängerfamilie von TNO (MADYMO, 2008) bspw. auch das „Total Human Model for Safety“ (THUMS) von Toyota (YASUKI, 2011). Obwohl die MADYMO-Fußgängermodelle eventuell ein zu steifes Kniegelenk besitzen und hierdurch die Belastung in den unteren Extremitäten beeinflusst wird (ROOIJ, 2003), sind diese Modelle zur Zeit der Projektbearbeitung die einzig verfügbaren Modelle, mit denen

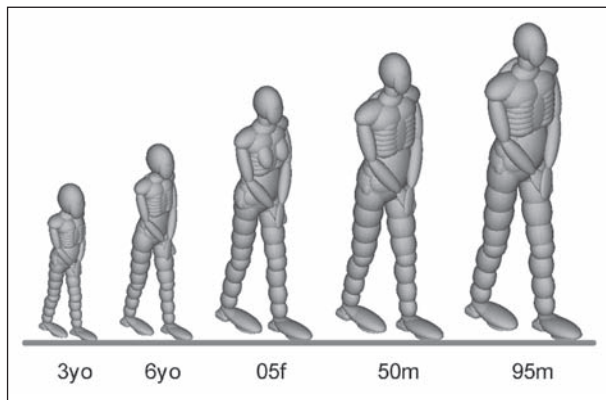


Bild 37: MADYMO-Fußgängerfamilie (MADYMO, 2003)

eine breite Populationsverteilung untersucht werden kann.

Neben den bereits existierenden fünf Fußgängermodellen (siehe Bild 37) können mithilfe der Funktion MADYSCALE bei Bedarf andere Fußgängergrößen durch Skalierung abgeleitet werden. Ansätze zur Verringerung der Kniegelenks-Steifigkeit existieren, sind jedoch zum Teil sehr unterschiedlich. Um eine Vergleichbarkeit mit anderen Studien gewährleisten zu können, werden diese Ansätze nicht implementiert. Zur Untersuchung der fahrzeugseitigen Verformungen bei möglichst realitätsnahem kinematischem Fußgängerverhalten werden daher gekoppelte Simulationen (Fußgänger als MKS- und Fahrzeug als FE-Modell) eingesetzt.

Durch Überführung des Konstruktionsmodells des Ersatzfahrzeugmodells in ein Simulationsmodell können dynamische Untersuchungen verschiedener Unfallkonstellationen durchgeführt werden. Die wesentlichen Bestandteile des im Rahmen dieses Projektes erstellten Simulationsmodells sind in Bild 38 dargestellt.

Die Elemente der aus dünnwandigen Stahlbauteilen bestehenden Rahmenkonstruktion werden hierbei ausschließlich als so genannte Flächenelemente (Shell-Elemente) abgebildet. Der Rahmen besteht aus konventionellem Stahl, wobei notwendige Materialkennwerte aus öffentlich zugänglichen Berechnungsmodellen zusammengestellt werden.

Die Energieabsorptionsschäume zur Darstellung der verschiedenen Lastpfade sind Vollmaterial und werden daher durch würfelförmige Volumenelemente (Solid-Elemente) abgebildet. Das im Simula-

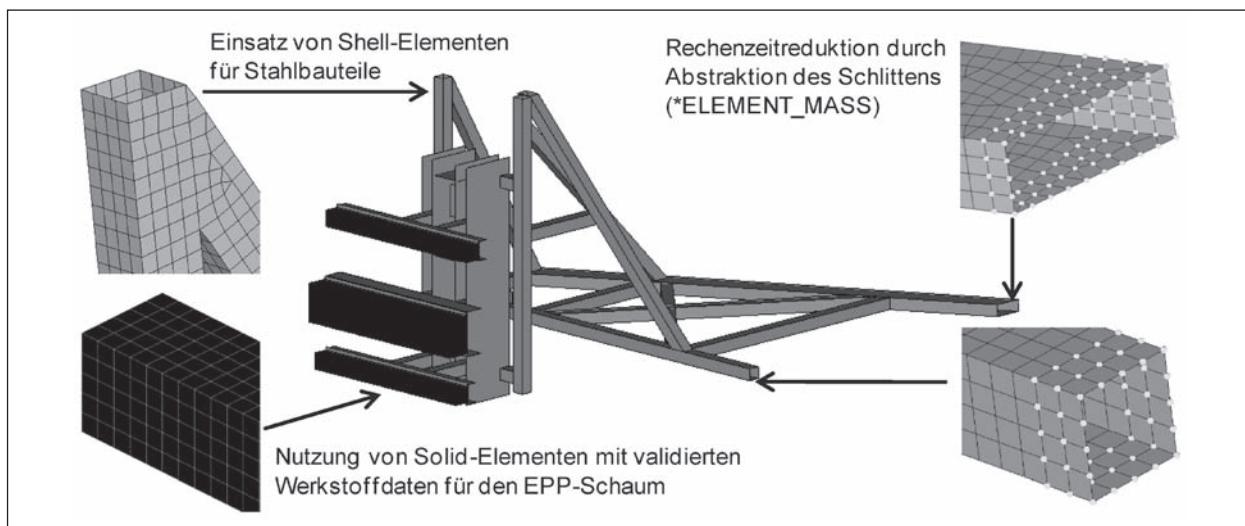


Bild 38: Gewählte Abstraktionsansätze beim Aufbau des Simulationsmodells

tionsmodell verwendete Materialverhalten der EPP-Schäume mit einer Formteildichte von 60 g/l wurde im Rahmen eines DFG-Forschungsprojekts am ika entwickelt (STEINHAEUER, 2007). Zur Untersuchung von EPP-Schäumen mit einer Formteildichte von 30 g/l wird eine validierte Materialkarte von der Fa. IEE bereitgestellt.

Da der in Bild 33 dargestellte Testschlitten das Deformationsverhalten nur durch seine Masse beeinflusst, kann dieser durch so genannte Massenelemente angenähert werden. Zusätzlich werden mögliche Bewegungsfreiheitsgrade des Modells an den Anbindungspunkten zwischen Schlitten und Ersatzfahrzeugmodell durch Zwangsbedingungen, so genannte Constraints, an den realen Anwendungsfall angepasst. Die während der Fußgängeranprallsimulation in das Ersatzfahrzeugmodell eingeleiteten Lasteinträge werden anhand grundlegender physikalischer sensorunabhängiger Messwerte analysiert (siehe Bild 39).

Im Rahmen des vorliegenden Projektes werden auftretende dynamische Deformationen der drei Schaumblöcke, Beschleunigungen hinter den U-profilförmigen Querträgern sowie Kontaktkräfte an den Lastpfadaufnahmen untersucht. In Bild 39 sind das zugrunde liegende Funktionsprinzip der jeweiligen Messsysteme sowie die entsprechende Umsetzung im Simulationsmodell dargestellt.

Zur Bestimmung der Deformationen werden die globalen Bewegungen relevanter Knotenreihen über die Funktion `*DATABASE^NODOUT` aufgezeichnet. Die Knotenreihen für den mittleren und unteren Lastpfad sind im linken Teil von Bild 39 dargestellt. Im mittleren Lastpfad werden drei Knotenreihen dokumentiert, die von oben nach unten mit „mid1“, „mid2“ und „mid3“ bezeichnet werden. Auftretende Beschleunigungen werden im Versuch mithilfe entsprechender Beschleunigungssensoren bestimmt, die in LS-Dyna durch die Funktion `*ELEMENT^SEATBELT^ACCELEROMETER` implementiert werden. Um eine entsprechende Validierung durchführen zu können, werden die Kontaktkräfte an den Lastpfadaufnahmen mit der Funktion `*DATABASE^CROSS^SECTION` bestimmt, da diese Messgröße im Versuchsaufbau an derselben Position durch Dehnmessstreifen (DMS) bestimmt wird.

Zur Bewertung bzw. Analyse des Unfallgegners wird häufig eine so genannte effektive Masse verwendet, die sich nach Gl. 1 (EPPINGER, 1979) bzw. nach Gl. 2 (BIECK, 2010) ermitteln lässt.

$$m_{\text{eff}} = \frac{2 \cdot F_{\text{max}} \cdot t}{\pi \cdot v} \quad \text{Gl. 1}$$

$$m_{\text{eff}} = \frac{\int_0^{t_{\text{max}}} F_{\text{max}}(t) dt}{v} \quad \text{Gl. 2}$$

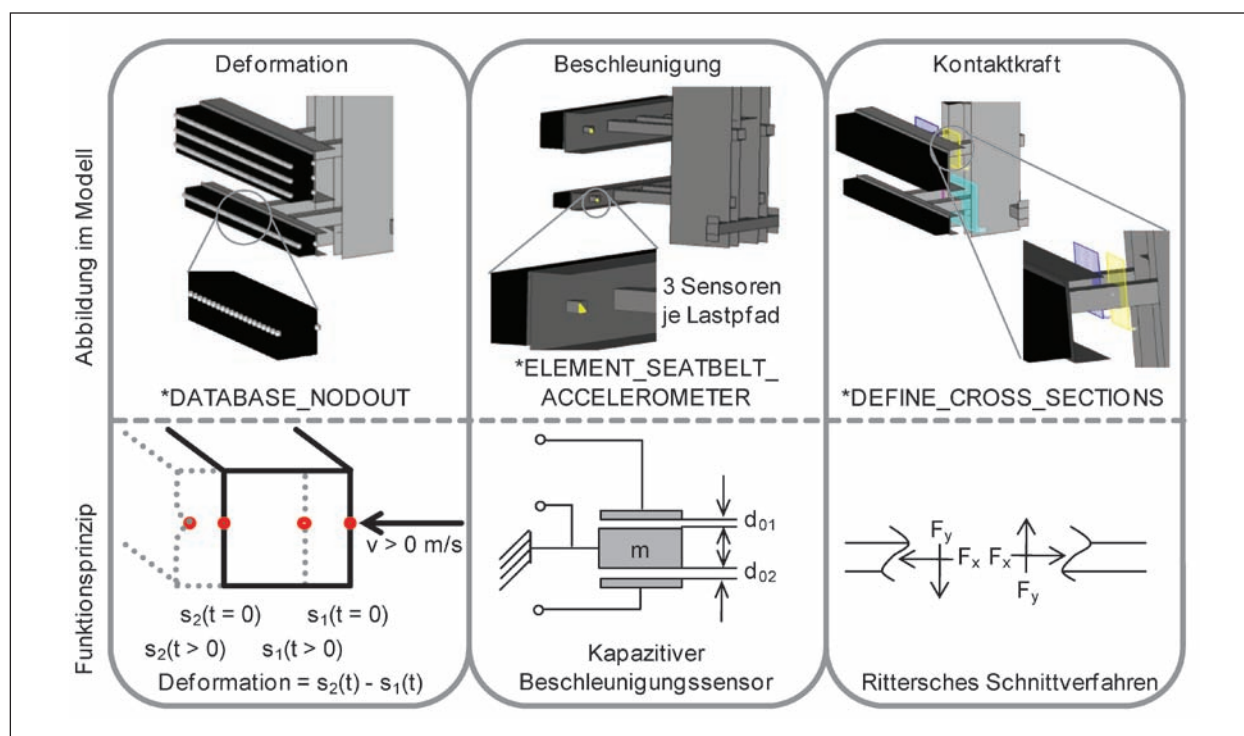


Bild 39: Im Simulationsmodell implementierte Messsysteme und deren Funktionsweise

Durch Berücksichtigung der Fläche unter der Kurve der Kontaktkraft sowie der Anprallgeschwindigkeit können mit der effektiven Masse auch Kollisionen bei verschiedenen Anprallgeschwindigkeiten miteinander verglichen werden.

3.1.3 Vorbereitung entsprechender Validierungsversuche

Simulationsmodelle sind in der Lage, dynamische Effekte innerhalb einer Fahrzeug-Fußgänger-Kollision sehr realitätsgetreu nachzubilden. Verschiedene Fehlerquellen können jedoch die Simulation beeinflussen, weshalb eine Verifizierung der Simulationsmodelle durch einen Abgleich mit Validierungsversuchen zwingend erforderlich ist.

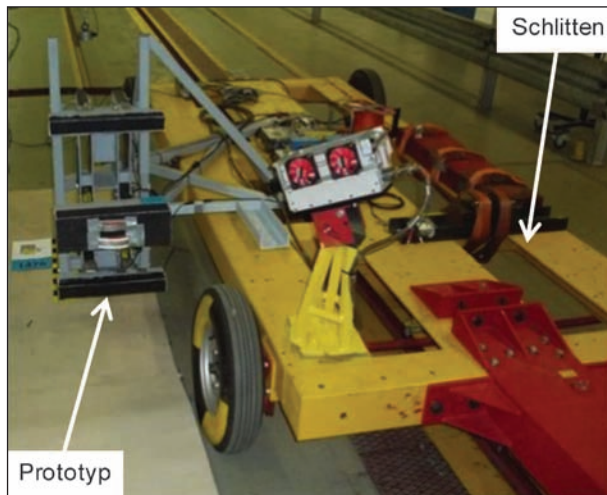


Bild 40: Versuchstechnische Umsetzung des Prototyps

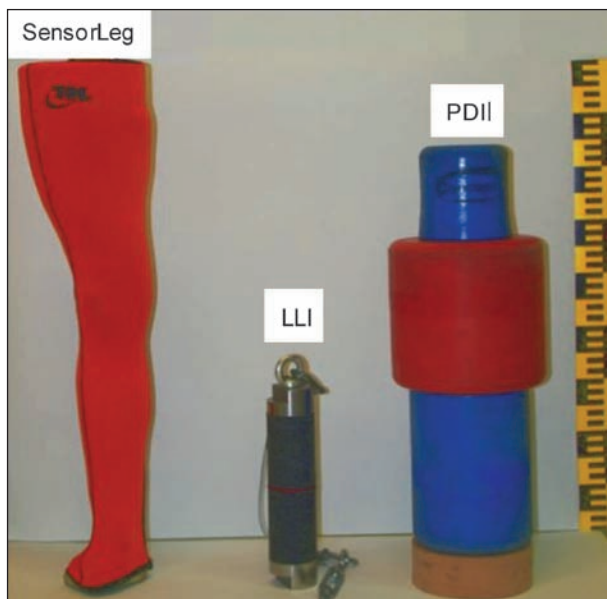


Bild 41: Verwendete Impaktoren

Ein Prototyp des Ersatzfahrzeugmodells wird im Rahmen der vorliegenden Untersuchung zur Durchführung der notwendigen Validierungsschleifen aufgebaut. Hiermit können die Fahrzeugkategorien A, B, C und B_{\max} nachgebildet werden (siehe Bild 40). Innerhalb dieses Prototyps werden Stahlprofile bzw. -platten, Schaumstoffblöcke aus Neopolen® P (60 g/l) sowie Kunststoffkleber verwendet. Feste Fixierungen der einzelnen Komponenten werden durch Schweißverbindungen realisiert. Um die Positionen der verschiedenen Kategorien einstellen zu können, werden entsprechende Anbindungspunkte durch Schraubenverbindungen variabel gestaltet. Das Einzelgewicht des Prototyps beträgt 90 kg, wohingegen der Gesamtaufbau inkl. Schlitten und Messtechnik mit 1.216 kg das Gewicht eines Mittelklassefahrzeugs annähernd widerspiegelt.

Als Anprallobjekte werden zur Zeit der Projektdurchführung erhältliche Impaktoren verwendet (siehe Bild 41). Die Eigenschaften und die Entwicklung dieser Impaktoren werden in Kapitel 2.2.1 beschrieben.

Um auftretende Effekte möglichst detailgetreu zu untersuchen, werden verschiedene Messsysteme in den Prototyp implementiert. Die Auswahl der Messsysteme orientiert sich hierbei an dem Simulationsmodell, damit möglichst vergleichbare Werte analysiert werden können. Eine flächige Bestimmung der auftretenden dynamischen elastischen und plastischen Deformationen ist ohne Beeinflussung der Versuchsergebnisse nicht möglich. Wie in Bild 43 dargestellt, ist pro Lastebene ein uniaxialer Beschleunigungssensor in zentraler Position hinter dem U-förmigen Querträger installiert. Zur Bestimmung der auftretenden Kräfte werden Dehnmessstreifen in Vollbrückenordnung verwendet. Diese sind an jeder Lastpfadaufnahme kurz hinter dem Querträger positioniert. Dadurch wird ein Vergleich von zwei der drei in Bild 39 beschriebenen Messwerte aus Versuch und Simulation ermöglicht.

Zur Visualisierung der dynamischen Effekte und der Flugbahnen der Impaktoren werden drei Hochgeschwindigkeitskamerasysteme in den Versuchsaufbau integriert. Position und entsprechende Bildausschnitte sind in Bild 42 dargestellt. Die Geschwindigkeit des Schlittens kurz vor Anprall wird mithilfe einer Lichtschranke experimentell bestimmt. Sowohl der Aufbau der Lichtschranke als auch die Geschwindigkeiten der verschiedenen Versuche sind in Bild 101 dargestellt.

Die Versuchsanordnung für die Anprallversuche mit den jeweiligen Impaktoren wird nach den Vorgaben der entsprechenden Handbücher durchgeführt (IEE, 2009; Concept, 2009 und MANNING, 2008). Verschiedene Ansichten der Versuchsaufbauten für die Impaktoren sind in den Bildern 97 bis 99 (Kapitel 7) dargestellt. Demnach wird der IEE-Impaktor an einem an der Decke angebrachten Pendel befestigt. Die Länge des Pendelseils wird hierbei so gewählt, dass der Schwerpunkt des IEE-Impaktors

an der Mittelebene des mittleren Lastpfads ausgerichtet ist. Der PDI-Impaktor wird auf einem 70 mm hohen Podest positioniert, welches mitgeliefert wird. Das SensorLeg wird ebenfalls auf einem Podest positioniert, wobei im Handbuch nur die Höhe des Podestes (25 mm) und nicht das Material beschrieben wird. Bei der Ausrichtung des SensorLegs wird darauf geachtet, dass der Impaktor seitlich steht und das Fahrzeuersatzsystem das Bein an der Beinaußenseite zuerst trifft. Da das SensorLeg eine instabile Ruhelage besitzt, wird dieser Impaktor durch ein an der Decke angebrachtes Seil fixiert. Mit einer entsprechenden Triggerschaltung wird diese magnetische Fixierung zum Anprallzeitpunkt gelöst.

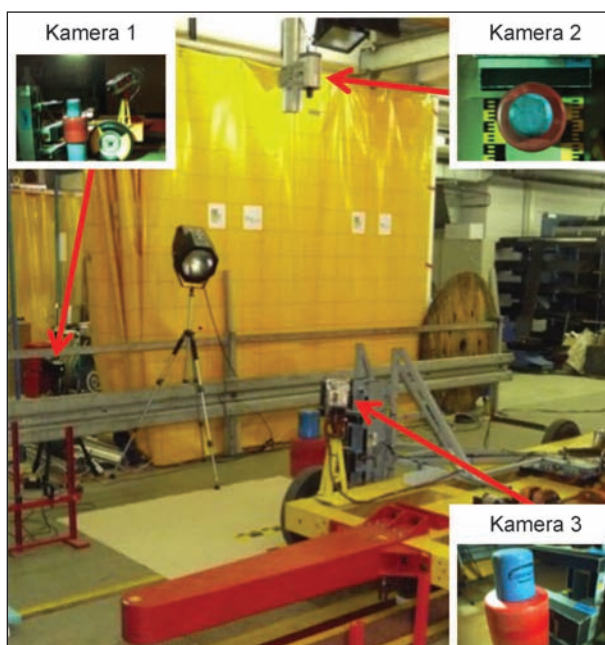


Bild 42: Aufbau der eingesetzten Kamerasysteme und resultierende Bildausschnitte

3.1.4 Versuchsergebnisse

Die Anprallversuche werden nach dem Prinzip der Komponentenprüfung in der Art durchgeführt, dass ein bewegtes Fahrzeug gegen einen ruhenden Impaktor fährt. Insgesamt werden 15 Versuche durchgeführt, wobei hier der Anprall gegen Fahrzeuge der Kategorie A sowie Kategorie B untersucht wird. Die Versuche dienen hauptsächlich zur Validierung der Simulationsmodelle. Aufgrund des ähnlichen Aufbaus der Simulationsmodelle genügen die Ergebnisse der Anprallversuche dieser Kategorien für eine Validierung der Kategorien C und D. Die vertikalen und horizontalen Positionen der verschiedenen Lastpfade für Kategorie A und Kategorie B sind in Bild 100 angegeben. Konstruktionsbedingt kön-

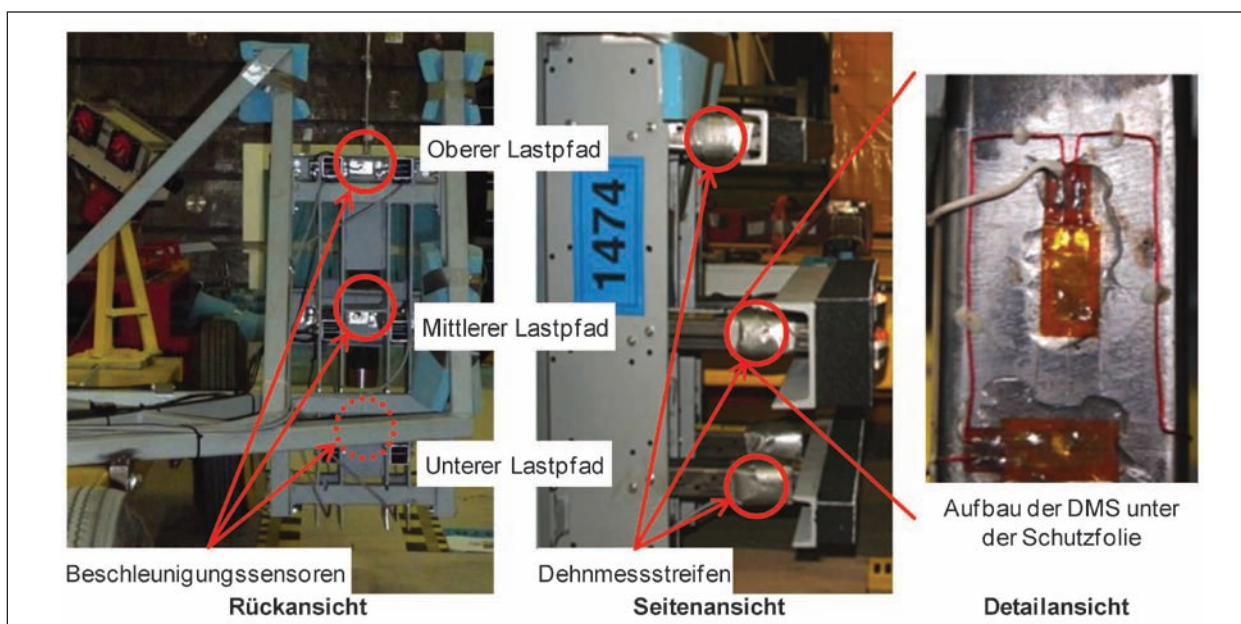


Bild 43: Anordnung der im Prototypen implementierten Messtechnik

nen hierbei geringfügige Unterschiede auftreten. Die Geschwindigkeit des Schlittens kurz vor Anprall beträgt zwischen 19,67 und 21,11 km/h.

Die in Bild 44 dargestellten Verläufe der Kontaktkraft für den mittleren Lastpfad für Versuche gegen das Ersatzfahrzeugmodell der Kategorie A weisen für IEE- und PDI-Impaktor kaum Unterschiede auf. Daher sind die Versuche mit diesen Impaktoren

gut wiederholbar. Neben den geringen Schwingungen sind leichte Abweichungen der Kontaktkraft für einen Anprall mit dem SensorLeg erst 15 ms nach Erstkontakt erkennbar, wobei dies durch den komplexeren Aufbau dieses Impaktors verbunden mit einer möglichen früheren Knochenfraktur erklärt werden kann. Bei einem Vergleich der Kontaktkräfte für die verschiedenen Impaktoren ist auffallend, dass der PDI-Impaktor die

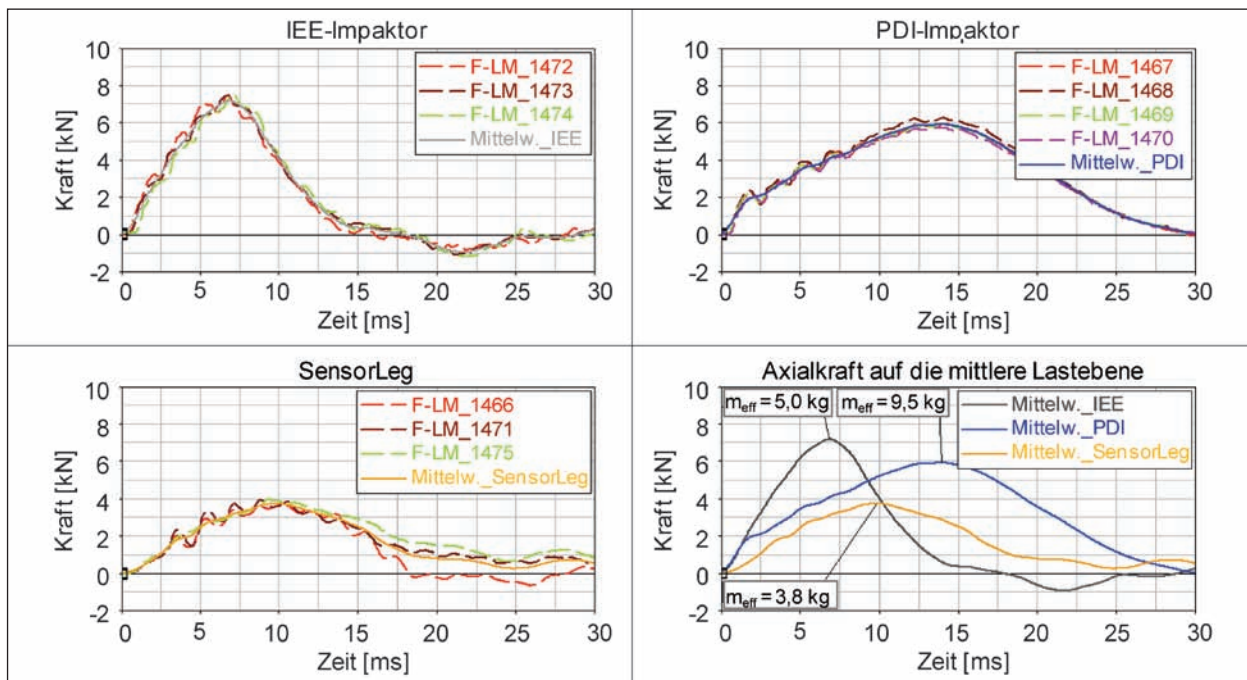


Bild 44: Vergleich der in den mittleren Lastpfad eingeleiteten Kontaktkräfte beim Anprall der verschiedenen Impaktoren gegen den Prototyp des Ersatzfahrzeugmodells der Kategorie A

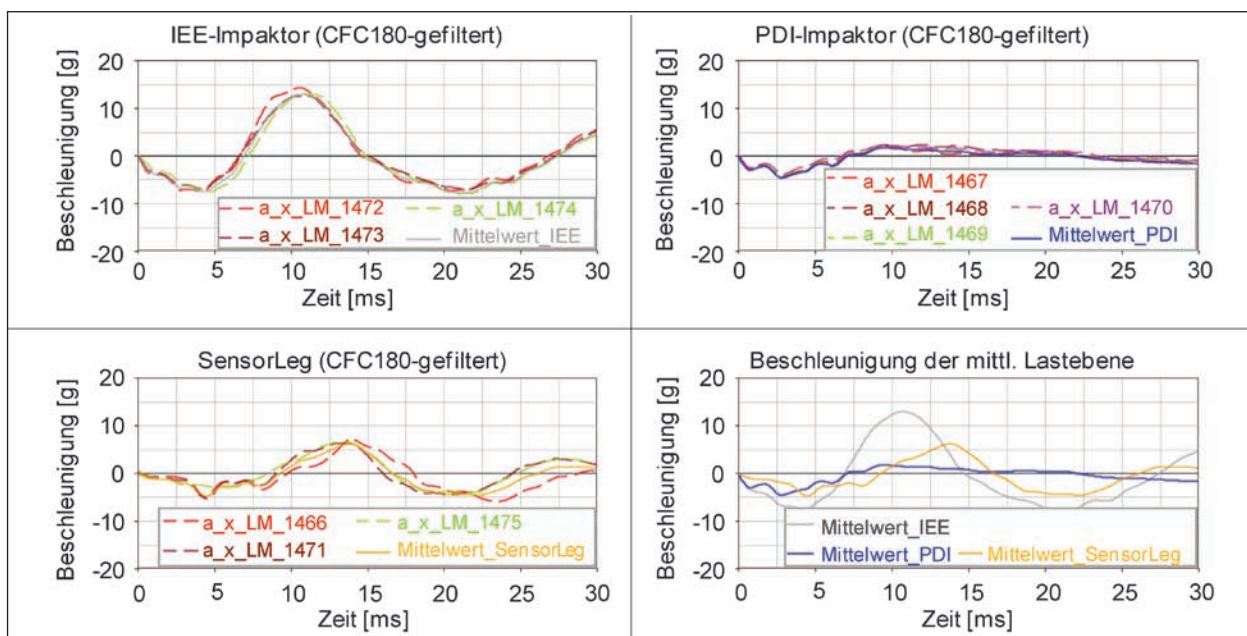


Bild 45: Vergleich der am mittleren Lastpfad auftretenden gefilterten Beschleunigungen beim Anprall der verschiedenen Impaktoren gegen den Prototyp des Ersatzfahrzeugmodells der Kategorie A

höchste effektive Masse ($m_{\text{eff}} = 9,5 \text{ kg}$) aufweist, während der IEE-Impaktor die größte maximale Kontaktkraft erzeugt ($F_{\text{max}} = 7,2 \text{ kN}$). Basierend auf der Annahme, dass Unfallgegner mit besonders geringen Lasteinträgen für kontaktbasierte Sensorsysteme schwer zu erkennen sind, müsste das SensorLeg aufgrund der geringen effektiven Masse ($m_{\text{eff}} = 3,8 \text{ kg}$) sowie der geringen maximalen Kraft ($F_{\text{max}} = 3,7 \text{ kN}$) am schwersten zu detektieren sein. Vergleichbare Erkenntnisse treten auch bei den Versuchen mit der Kategorie B auf (vgl. Bild 102).

Die auftretenden axialen Beschleunigungen für den Anprall der verschiedenen Impaktoren gegen das Ersatzfahrzeugmodell der Kategorie A sind in Bild 104 und Bild 105 für Kategorie B dargestellt. Aufgrund der hochfrequenten Schwingung erscheint eine einfache Bestimmung des Mittelwerts aufgrund der hieraus resultierenden hohen Abweichungen als nicht sinnvoll. Durch den Einsatz eines geeigneten Filters können diese Schwingungen reduziert werden. In Bild 45 sind die mit einem CFC-Filter mit einer Grenzfrequenz von 180 Hz gefilterten Beschleunigungsverläufe dargestellt (vgl. Bild 103 für Kategorie B). Bei den entsprechenden Verläufen des IEE-Impaktors und des SensorLegs ändert sich das Vorzeichen der Beschleunigung nach Erreichen der maximalen Kontaktkraft. Dieses Verhalten kann jedoch für den PDI-Impaktor nicht beobachtet werden.

Der Anprall gegen den IEE-Impaktor resultiert in den höchsten maximalen Beschleunigungen sowie der höchsten maximalen Kontaktkraft. Der PDI-Impaktor, der die zweithöchsten Kontaktkräfte verursacht, steht bei dem Vergleich der maximalen Beschleunigungen an dritter Stelle. Das SensorLeg erzeugt hier höhere Beschleunigungswerte.

Sequenzen zum dynamischen Ablauf der Fahrzeug-Impaktor-Kollisionen und der entsprechenden Impaktorflugbahnen sind in Bild 106, Bild 107 sowie Bild 108 (Kapitel 7) dargestellt. Bei den Versuchen mit IEE- und PDI-Impaktor sind keine besonderen Vorkommnisse zu beobachten. Durch den Anprall des Prototyps gegen das SensorLeg wurden verschiedene Frakturen verursacht. Innerhalb des Versuchs 1466 (vgl. Bild 101) tritt bspw. eine Fraktur des Tibias auf. Entsprechende Detailsequenzen des Anpralls sowie entstehende Frakturstücke sind in Bild 46 dargestellt.

Da im SensorLeg Komponenten enthalten sind, die auch eine mögliche Schädigung der Knochen berücksichtigen, ist der Aufbau, im Vergleich zu den anderen beiden Impaktoren, relativ aufwändig. Die einzelnen Komponenten des SensorLegs vor sowie nach den jeweiligen Versuchen sind in Kapitel 7 dargestellt (vgl. Bild 109, Bild 110 sowie Bild 111). Der zeitliche Aufwand für einen Austausch der entsprechenden Bauteile beträgt ca. 60 Minuten. Bei häufiger Durchführung kann der Aufwand auf 40 Minuten reduziert werden.

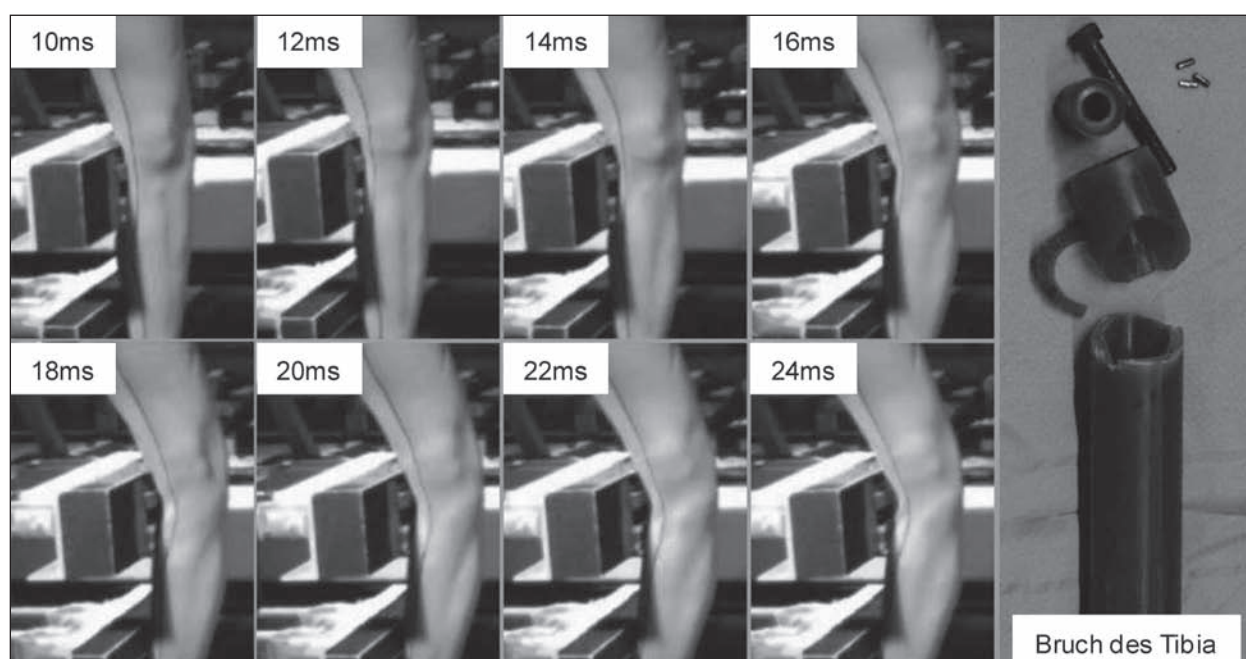


Bild 46: Detailsequenz des Anpralls zwischen SensorLeg und Prototyp des Ersatzfahrzeugmodells (Versuchsnummer 1466) und hierbei erfolgte Tibia-Fraktur

Durch die Filterung der entsprechenden Beschleunigungen wird der Signalverlauf beeinflusst. Da in der Literatur keine Angaben zu Filtereinstellungen bei der Klassifizierung der Unfallgegner durch Beschleunigungssensoren beschrieben sind, erscheint bei der Bewertung der Kollisionsgegner eine Priorisierung der Kontaktkraft als sinnvoll.

3.1.5 Validierung des Simulationsmodells

Zur Verifizierung des Aufbaus des Simulationsmodells werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuche mit den Simulationsergebnissen verglichen. Vom SensorLeg existiert kein Berechnungsmodell, daher können diese Versuchsergebnisse für die Validierung nicht herangezogen werden. Wie bereits beschrieben, ist eine Verwendung des gefilterten Beschleunigungssignals aufgrund möglicher Ungenauigkeiten nicht sinnvoll. Daher werden für die Validierung nur der Kontaktkraftverlauf und die Impaktorflugbahn herangezogen.

Im Rahmen des Validierungsprozesses werden die Auswirkungen verschiedener Einflussfaktoren untersucht. Da sowohl die Impaktoren als auch die Materialarten für den Energieabsorptionsschaum bereits validiert sind, werden Kontaktparameter wie Kontaktalgorithmen (SOFT = 2), Kontaktsteifigkeiten (bspw. abhängig von TSSFAC = 0.6), Reibungskoeffizienten ($f = 0.4$) sowie Kontaktdämpfungsfaktoren (VDC = 0.1) angepasst. In Bild 47 werden die Kontaktkräfte zwischen Versuch und der finalen Version des Simulationsmodells verglei-

chend gegenübergestellt. Sowohl der Betrag der maximalen Kontaktkraft als auch der Verlauf des -

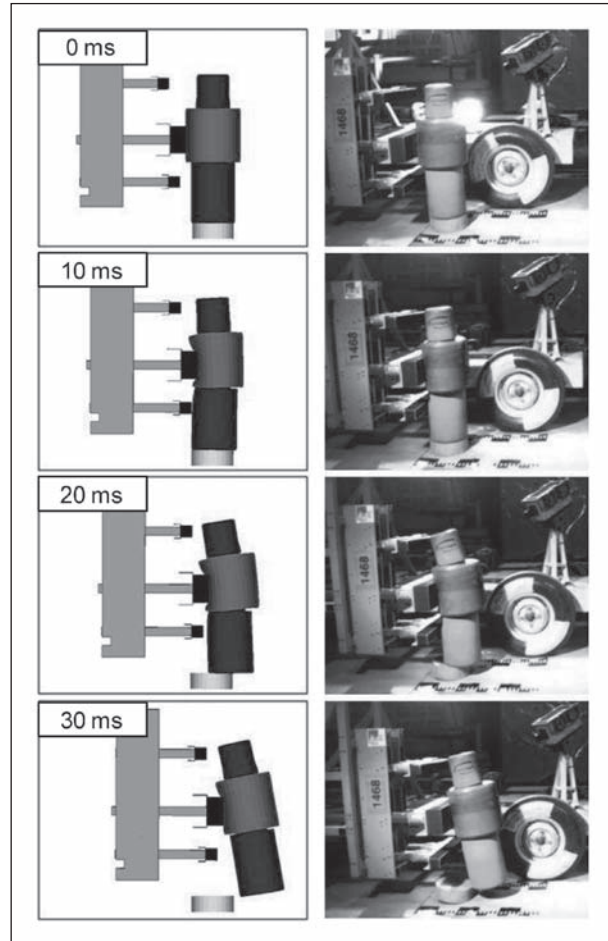


Bild 48: Vergleich der Impaktorflugbahn aus Versuch und Simulation für PDI

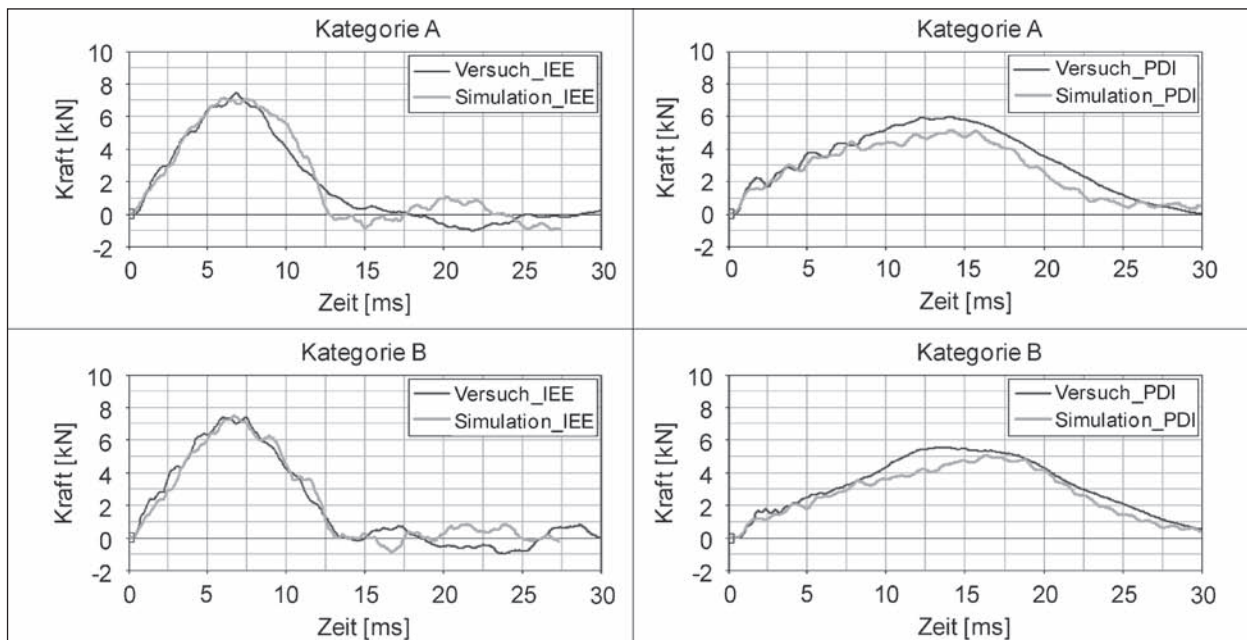


Bild 47: Vergleich der im mittleren Lastpfad auftretenden Kontaktkräfte in Versuch und Simulation

Kraftsignals stimmen für Kategorie A und B für beide Impaktoren sehr gut überein.

Beim PDI treten im Vergleich zum IEE-Impaktor geringfügig höhere Abweichungen auf. Eine mögliche Ursache hierfür können Modellierungsschwächen des Berechnungsmodells des PDI sein. Bei der Simulation mit diesem Berechnungsmodell treten so genannte Hourglass-Energien auf. Diese deuten auf Verformungen und Spannungen hin, die aufgrund unzureichend integrierter Elemente nicht in der Berechnung des Spannungszustands der entsprechenden Komponenten berücksichtigt werden können. Die Hourglass-Energien können bspw. durch eine Anpassung des Integrationstyps verringert bzw. eliminiert werden. Darüber hinaus sind im Simulationsmodell des PDI so genannte Anfangsdurchdringungen enthalten. Sie entstehen, wenn Flächenelemente sich bereits im Initialisierungsschritt durchdringen. Hierdurch werden bereits zu Beginn Kontaktkräfte aufgebaut, die in der Realität nicht vorhanden sind. Durch eine Anpassung des Abstandes der Flächenelemente können Anfangsdurchdringungen behoben werden. Da jedoch durch beide Anpassungen das bereits validierte Berechnungsmodell verändert wird, wird hier von der Notwendigkeit einer weiteren Optimierung zunächst abgesehen.

Ein Vergleich der Impaktorflugbahnen aus Versuch und Simulation belegt zusätzlich zu den geringen Abweichungen des Kontaktkraftverlaufs, dass Simulation und Versuch sehr gut übereinstimmen (vgl. Bild 48 für PDI sowie Bild 112 für IEE-Impaktor).

3.1.6 Einfluss verschiedener Frontsteifigkeiten

Bei den bisher beschriebenen Versuchen werden EPP-Schäume mit einer Formteildichte von 60 g/l verwendet. Wie in Bild 36 dargestellt, existieren auch Fahrzeuge mit geringeren Frontsteifigkeiten.

In der vorliegenden Untersuchung wird daher der Einfluss verschiedener Schaumsteifigkeiten auf die Lasteinträge der entsprechenden Impaktoren analysiert. Die für die numerische Berechnung benötigten Materialkarten für den 30-g/l-Schaum werden, von der Firma IEE bereitgestellt.

Zur Untersuchung des Einflusses der Frontsteifigkeiten auf die in das Ersatzfahrzeugmodell eingebrachten Lasteinträge wird der Anprall der beiden Impaktoren (PDI- und IEE-Impaktor) gegen zwei Fahrzeugkategorien (A und B) mit unterschiedlichen Formteildichten (30 g/l und 60 g/l) analysiert. Die Verläufe der Kontaktkraft sind in Bild 49 darge-

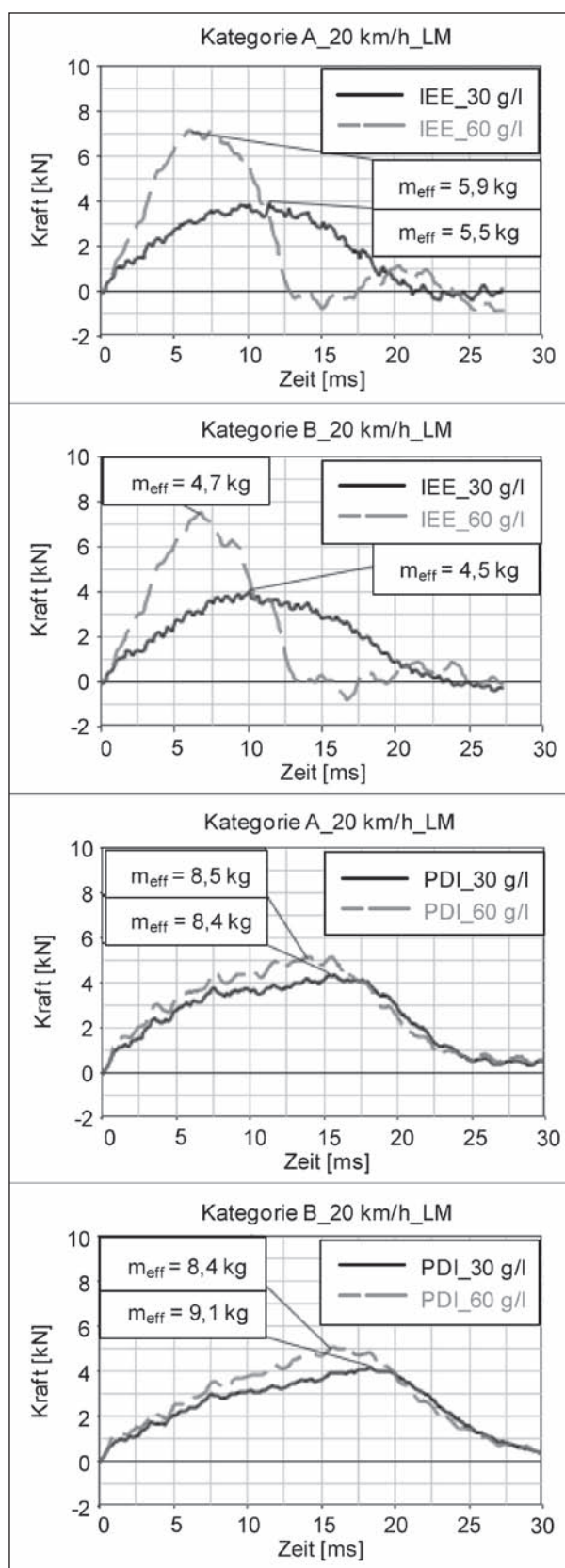


Bild 49: Kontaktkraft und effektive Masse für verschiedene Schaumsteifigkeiten

stellt. Die unterschiedlichen Werte für den IEE-Impaktor beim Anprall gegen Kategorie A und B resul-

tieren aus vereinzelt überschwingern, die durch eine Filterung der Verläufe verringert werden können.

Eine Verringerung der Schaumsteifigkeit resultiert demnach in einer geringeren maximalen Kontaktkraft. Vor allem für den IEE-Impaktor, der im Vergleich zum PDI eine wesentlich dünnere Schaummantelung besitzt, wird dieses Verhalten deutlich.

Die Kraftspitze tritt beim Anprall gegen das Ersatzfahrzeugmodell mit der geringeren Schaumsteifig-

keit zudem später auf. Daher hat die Verringerung der Schaumsteifigkeit kaum Auswirkungen auf die ermittelten effektiven Massen. Dieses Verhalten kann sowohl für beide Fahrzeugkategorien als auch für beide Impaktoren beobachtet werden.

In der vorliegenden Untersuchung wird auch der Einfluss verschiedener Schaumsteifigkeiten auf einen Anprall eines Impaktors zur Bewertung der biomechanischen Verletzungskriterien gegen das Ersatzfahrzeugmodell untersucht. Hierfür wird der EEVC-WG17-LowerLeg-Impaktor verwendet, der in der aktuellen Gesetzgebung (ECE, 2009) und im aktuellen Euro-NCAP-Testprotokoll (Euro NCAP, 2011) verwendet wird. Hierbei wird der Impaktor mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h gegen das Ersatzfahrzeugmodell geschossen (siehe Bild 50).

Die Ergebnisse für einen Anprall dieses Impaktors gegen ein Ersatzfahrzeugmodell der Kategorie A sind in Bild 51 dargestellt. Für eine optimale Bewertung nach Euro NCAP müssen folgende Grenzwerte eingehalten werden:

- Tibia-Beschleunigung unter 150 g,
- Biegewinkel unter 15°,
- Scherweg unter 6 mm.

Die Tibia-Beschleunigung liegt in beiden Fällen über 150 g. Beim Anprall gegen das Ersatzfahrzeugmodell mit einer Formteildichte von 30 g/l kommt es zu einem Kontakt zwischen Impaktor und dem hinter dem Schaum befindlichen Querträger. Die gesamte Energieabsorptionskapazität des Schaums wird in diesem Fall genutzt.

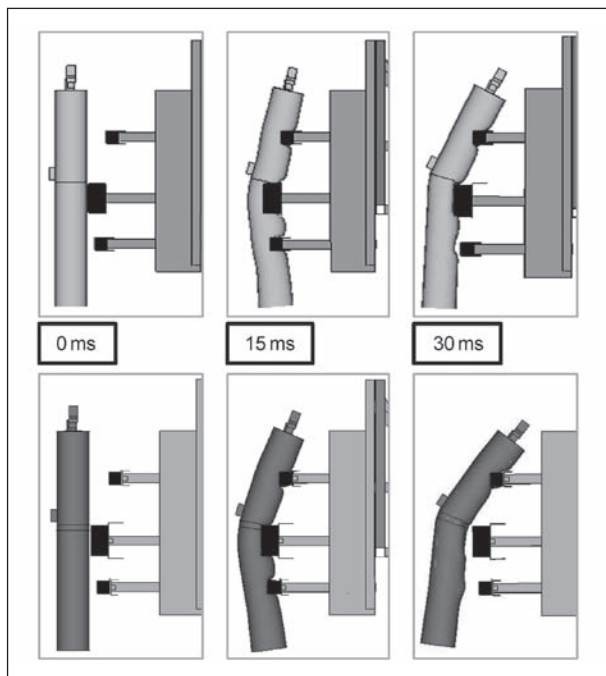


Bild 50: Vergleich der Impaktorflugbahn aus Versuch und Simulation für EEVC-WG17-Impaktor

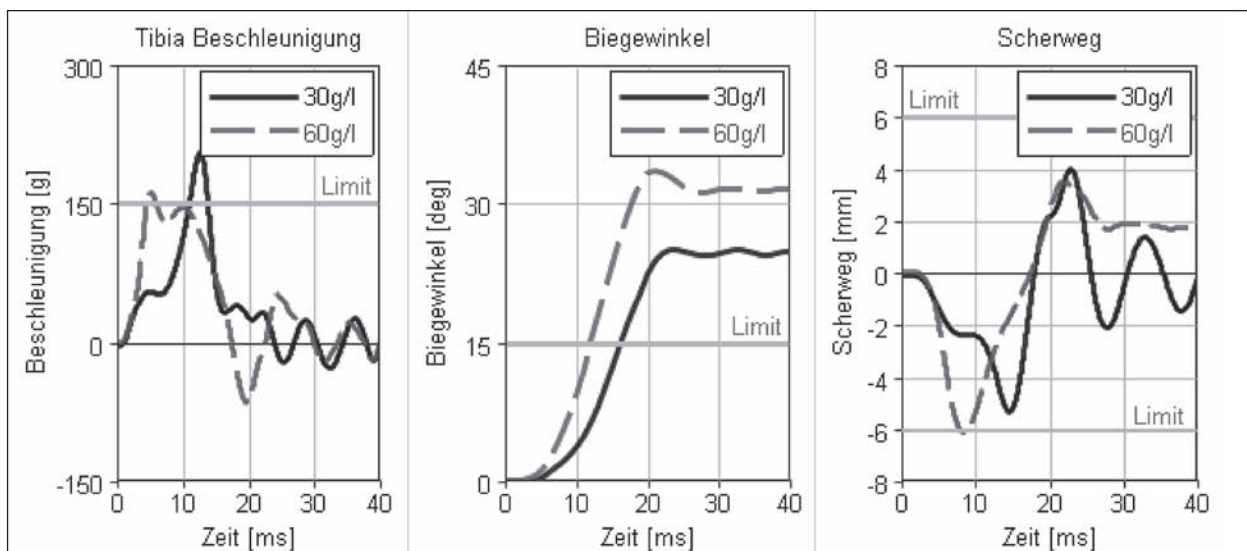


Bild 51: Einfluss verschiedener Schaumsteifigkeiten auf EEVC-WG17-LowerLeg-Anprall

Die beiden Parameter Biegewinkel und Scherweg werden hauptsächlich durch die geometrische Anordnung der Anprallfläche und nicht durch die Steifigkeit der im Anprall befindlichen Bauteile beeinflusst. Obwohl sich die Anordnung der Lastpfade an aktuellen Fahrzeugfronten orientiert, werden die vorgegebenen Grenzwerte des Biegewinkels in beiden Fällen überschritten. Der Energieabsorptionsschaum mit einer Formteildichte von 30 g/l weist jedoch etwas geringere Werte auf. Auch bei der Bewertung des Schwerwegs schneidet der 30-g/l-Schaum etwas besser ab.

Falls das Ersatzfahrzeugsystem mit einer Formteildichte von 30 g/l eine größere Aufstandsfläche sowie einen größeren Deformationsraum im mittleren Lastpfad zur Verfügung stellen würde, wäre für diesen Anwendungsfall eine geringere Verletzungsgefahr im Bereich der unteren Extremitäten zu erwarten. Die vorgegebenen Grenzwerte könnten in diesem Fall mit großer Wahrscheinlichkeit eingehalten werden.

3.1.7 Auswahl relevanter Fußgängerklassen

Neben der Betrachtung geeigneter Fahrzeugfronten ist für die Erarbeitung kritischer Unfallszenarien auch eine Auswahl relevanter Fußgängerklassen von Bedeutung. Bei dieser Auswahl müssen zum einen Fußgängerklassen berücksichtigt werden, die anteilmäßig relativ häufig Unfallgegner bei Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen sind, zum anderen sollten auch Fußgängerklassen in die Untersuchung aufgenommen werden, die aus Sicht der Kollisionsmechanik aufgrund ihrer anthropometrischen Eigenschaften für geringe Lasteinträge in die Fahrzeugfront prädestiniert und damit vergleichsweise schwierig zu erkennen sind.

Fußgängerklassen, die relativ häufig in Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen verwickelt sind, können bspw. anhand von Unfallstatistiken, bei denen die Unfallgegner nach Alter erfasst sind, ermittelt werden. 18- bis 64-jährige Fußgänger sind nach ECE (2007) und der hier gewählten Alterseinteilung im Jahr 2003 in Europa (51 %), Russland (72 %) und USA (70 %) an den meisten Verkehrsunfällen beteiligt (vgl. Bild 52). Kinder unter 18 Jahren nehmen demnach mit ca. 10 % einen verhältnismäßig geringen Anteil an in Verkehrsunfällen tödlich verletzten Fußgängern ein. Diese Beobachtung wird auch durch FARS (2010) bestätigt (siehe Bild 53).

Anhand dieser Alterseinteilung können die Körpergrößen und -massen für die zu berücksichtigenden Fußgängerklassen definiert werden. Da 18- bis 64-jährige Personen einen Großteil der in Fußgängerunfällen verwickelten Personen ausmachen, erscheint eine Einbeziehung von in der Fahrzeugentwicklung allgemein anerkannter Dummygrößen, wie 5%-Frau (05f), 50%-Mann (50m) und 95%-Mann (95m), sinnvoll.

Zur Berücksichtigung zusätzlicher Fußgängerklassen, die einen möglichst geringen Lasteintrag in die Fahrzeugfront erzeugen, werden außerdem Kinder mit einem besonders geringen Körperge-

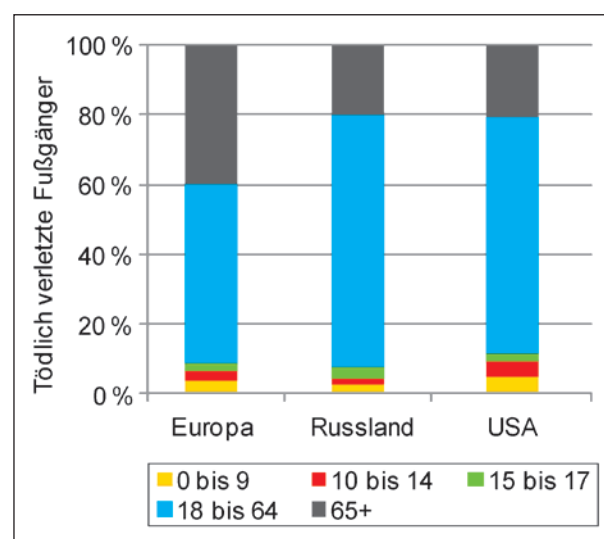


Bild 52: 2003 in Verkehrsunfällen tödlich verletzte Fußgänger für verschiedene Länder nach Alter unterteilt (ECE, 2007)

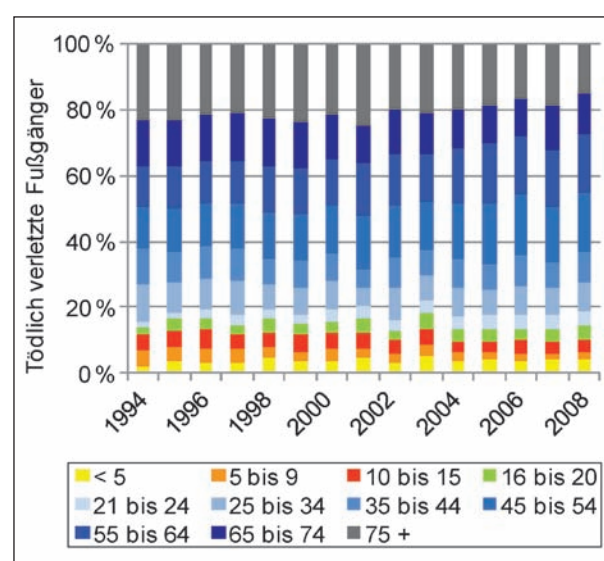









Bild 53: In den USA in Verkehrsunfällen tödlich verletzte Fußgänger für die Jahre 1994 bis 2008 (FARS, 2010)

Dummy	3yo	6yo	05f	05m	50m	95m	TeenM
Schwerpunkthöhe [m]	0,572	0,675	0,853	0,974	0,966	1,092	1,101
Masse [kg]	14,7	23,4	50,9	62,6	75,6	102,8	66,5
Größe [m]	0,960	1,190	1,543	1,680	1,738	1,946	1,908
Abbildung							

Tab. 4: Anthropometrische Eigenschaften verwendeter Fußgängermodelle

wicht (3-jähriges (3yo) sowie 6-jähriges Kind (6yo)) in die Untersuchung aufgenommen. Darüber hinaus sollten zusätzliche Fußgängerklassen berücksichtigt werden, die Personen mit geringem Gewicht bei gleichzeitig großem Abstand zwischen Schwerpunkt und Bereich des Erstkontakts abbilden. Hierfür können bspw. ein so genannter 5%-Mann (05m) sowie ein Mann mit großer Körperlänge (1,90 m) bei geringem Körpergewicht (65 kg) eingesetzt werden. Der Letztere wird im Folgenden als männlicher Teenager (TeenM) bezeichnet.

Wie bereits beschrieben, werden die Berechnungen mithilfe von gekoppelten Simulationen mit den MADYMO-Fußgängermodellen durchgeführt.

Neben den bereits in MADYMO verfügbaren Fußgängermodellen werden zusätzlich zwei zu untersuchende Modelle (05m und TeenM) mit der Funktion MADYSCALE generiert. Die verschiedenen Fußgängermodelle und ihre anthropometrischen Daten sind in Tabelle 4 dargestellt.

Bei MADYSCALE wird basierend auf der gewünschten Anthropometrie eine Skalierung der Geometrie, der Massen- und Trägheitsmomente, der Gelenksteifigkeit, -reibung und -dämpfung, der Kontaktparameter sowie der Brucheigenschaften vorgenommen. Grundlage für die Skalierung sind Informationen der anthropometrischen Datenbanken GEBOD und RAMSIS. Die Skalierung wird mithilfe eines entsprechenden Algorithmus vorgenommen (siehe MADYMO, 2008a).

3.1.8 Bestimmung der Fußgängerklassen mit den geringsten Lasteinträgen im Falle eines Anpralls

Zur Bewertung der Auswirkungen verschiedener Unfallkonstellationen auf die in das Fahrzeug eingebrachten Lasteinträge werden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung 70 Simulationen mit dem Ersatzfahrzeugmodell durchgeführt und ausgewertet. Die Simulationsmatrix setzt sich hierbei wie folgt zusammen:

- fünf Fahrzeugkategorien: A, B, C, D und B_{max} ,
- sieben Fußgängerklassen: 3yo, 6yo, 05f, 05m, 50m, 95m und TeenM,
- zwei Frontsteifigkeiten (bzw. Formteildichten): 30 g/l und 60 g/l,
- eine Fahrzeuggeschwindigkeit: 20 km/h.

Eine Untersuchung der Kategorie D_{min} ist aufgrund des geringen Unterschieds zu Kategorie D nicht notwendig. Darüber hinaus ist eine Berücksichtigung einer höheren Geschwindigkeit nicht erforderlich, da die Fußgängerklasse mit dem geringsten Energieeintrag in das Fahrzeug charakterisiert werden soll und diese vor allem bei geringen Geschwindigkeiten zu erwarten ist.

Nach verschiedenen Studien, z. B. BIECK (2010), resultieren die geringsten Lasteinträge aus dem so genannten Einbein-Anprall. Hierbei tritt zunächst nur das dem Fahrzeug zugewandte Bein in Kontakt

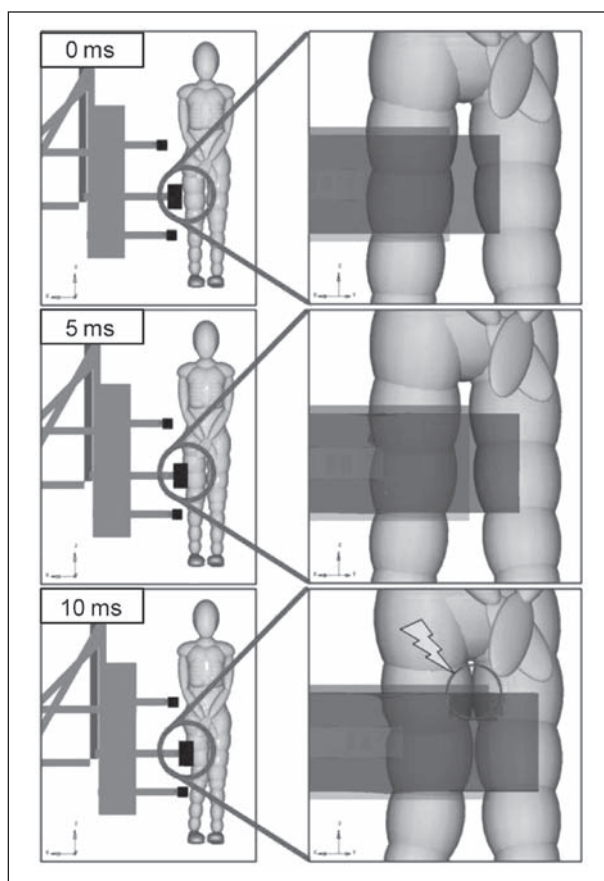


Bild 54: Bestimmung der Zeiträume für den Einbein-Anprall

mit dem Fahrzeug, während das dem Fahrzeug abgewandte Bein keinen Lasteintrag in die Fahrzeugfront erzeugt. Innerhalb der vorliegenden Untersuchung wird die in SAE (2007) definierte Schrittstellung des Polar-II-Dummys verwendet (vgl. BOVEMKERK, 2009c, Abschlussbericht FE 82.308/2006). Die Zeitspanne für den Einbein-Anprall wird anhand einer optischen Auswertung ermittelt (siehe Bild 54).

Hierbei gilt der Einbein-Anprall als beendet, sobald das zuerst angestoßene Bein das zweite Bein berührt. Die entsprechende Zeitspanne für drei der sieben Fußgängerklassen beträgt gemäß Bild 55 zwischen 7 ms und 24 ms.

Im Folgenden werden die numerisch ermittelten Deformationen und Kontaktkräfte bzw. effektiven Massen zusammengefasst und anhand verschiedener Bewertungskriterien miteinander verglichen. Da für eine Charakterisierung der auftretenden Beschleunigungen aufgrund der hochfrequenten Schwingungen entsprechende Filter verwendet werden müssen, welche das Ergebnis beeinflussen können, werden die Beschleunigungen im Folgenden vernachlässigt.

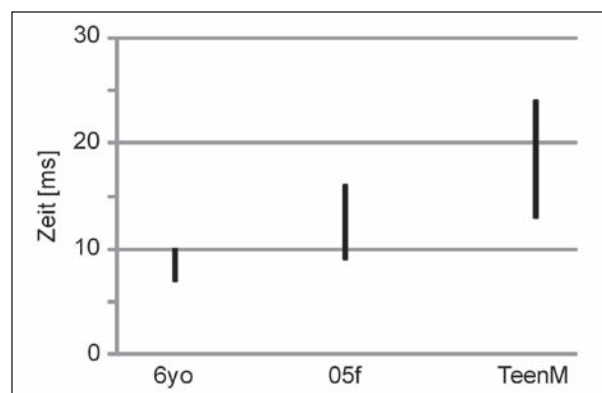


Bild 55: Zeitspanne für den Einbein-Anprall gegen ein Fahrzeuersatzsystem der Kategorie A

Die während des Fußgängeranpralls auftretenden dynamischen Deformationen der jeweiligen Schaumblöcke werden durch dreidimensionale Oberflächendiagramme dargestellt (für Kategorie A vgl. Bild 56 sowie Bild 113). Diese Diagramme eignen sich zur Darstellung des jeweiligen Verlaufs der Intrusion des Fußgängers in das Ersatzfahrzeugmodell. Eine Charakterisierung des Lasteintrags sollte jedoch anhand eines klar definierten Parameters erfolgen. Ein rein optischer und damit relativ subjektiver Vergleich der Oberflächendiagramme ist hierfür ungeeignet. Bild 56 sowie Bild 113 sind daher nur beispielhaft für den mittleren Lastpfad der Kategorie A bei einer Formteildichte von 30 g/l bzw. 60 g/l dargestellt.

Eine objektive Charakterisierungsmöglichkeit wäre ein Vergleich der maximal auftretenden Deformationen. Da die in den jeweiligen Knotenreihen lokal auftretenden Deformationen jedoch sehr stark von der Form der Bein- bzw. Beinsegmentellipsoide abhängen, ist dieser Vergleich nicht sinnvoll. Hierdurch können Fußgängerklassen mit geringeren Kontaktkräften lokal größere Deformationen hervorrufen. Wie in Bild 57 beispielhaft dargestellt ist, befindet sich bei der hier gezeigten Anprallkonstellation die mittlere Knotenreihe des mittleren Lastpfades auf Höhe der Mittelebene des Beinellipsoids des 3-jährigen Kindes. Bei der gleichen Fahrzeugkategorie liegt die mittlere Knotenreihe des mittleren Lastpfades zwischen zwei Ellipsoiden des 95%-Mannes. Während das 3-jährige Kind den mittleren Lastpfad auf der Mittelebene (mid2, siehe Kapitel 3.1.2) sehr stark deformiert, stützt sich der 95%-Mann bei diesem Anprall deutlich mehr im oberen und unteren Bereich des mittleren Lastpfades ab. Die auftretenden Deformationen auf der Mittelebene des mittleren Lastpfades entsprechen daher nicht den im mittleren Lastpfad eingeleiteten Kontaktkräften.

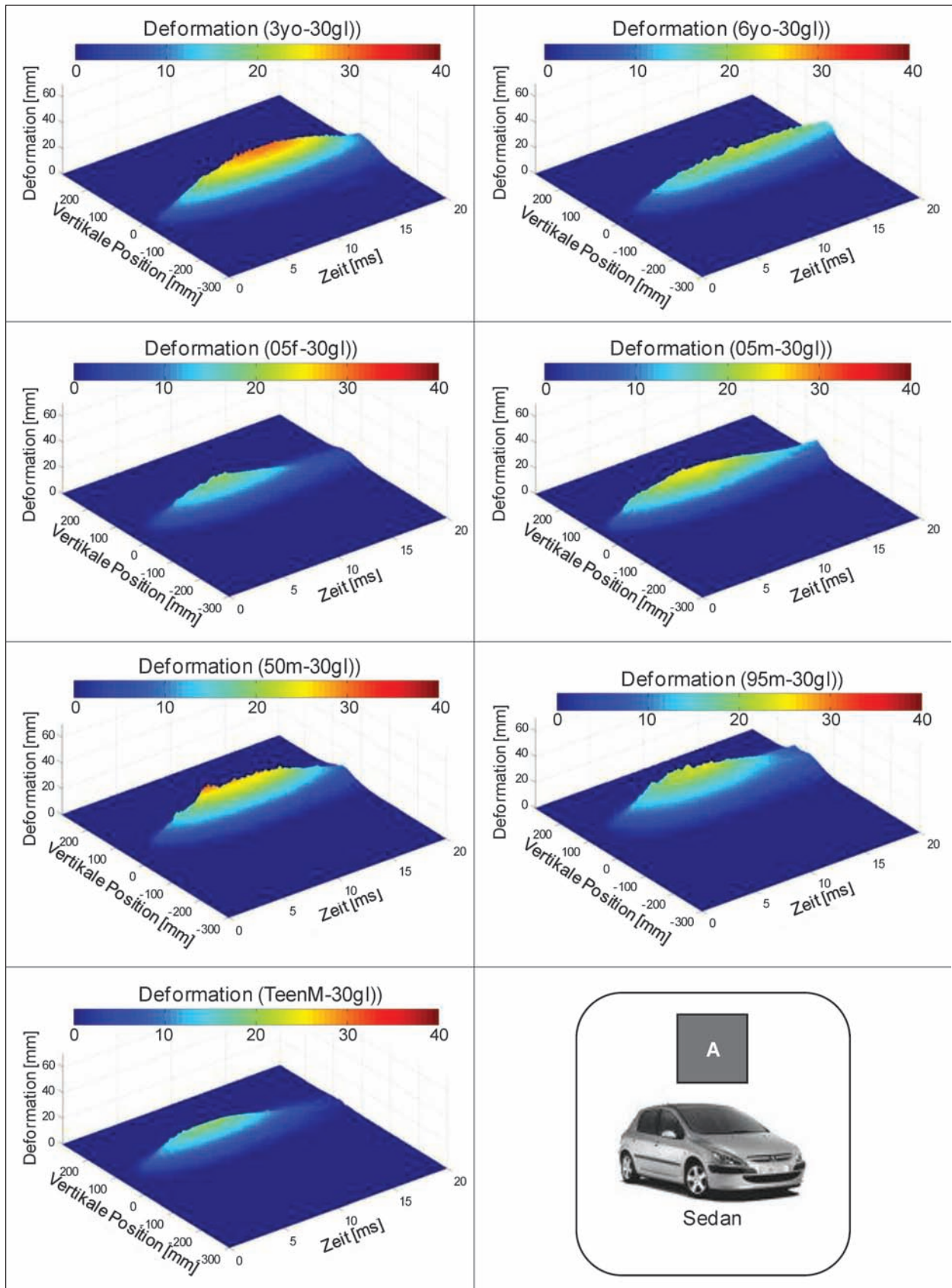


Bild 56: Deformation der mittleren Knotenreihe des mittleren Lastpfads der Kategorie A bei einer Formteildichte von 30 g/l

Um den Einfluss der elliptischen Beinsegmente zu verringern, können die Deformationen der drei Kno-

tenreihen des mittleren Lastpfads aufsummiert werden. Hierdurch kann eine objektive Gegenüberstel-

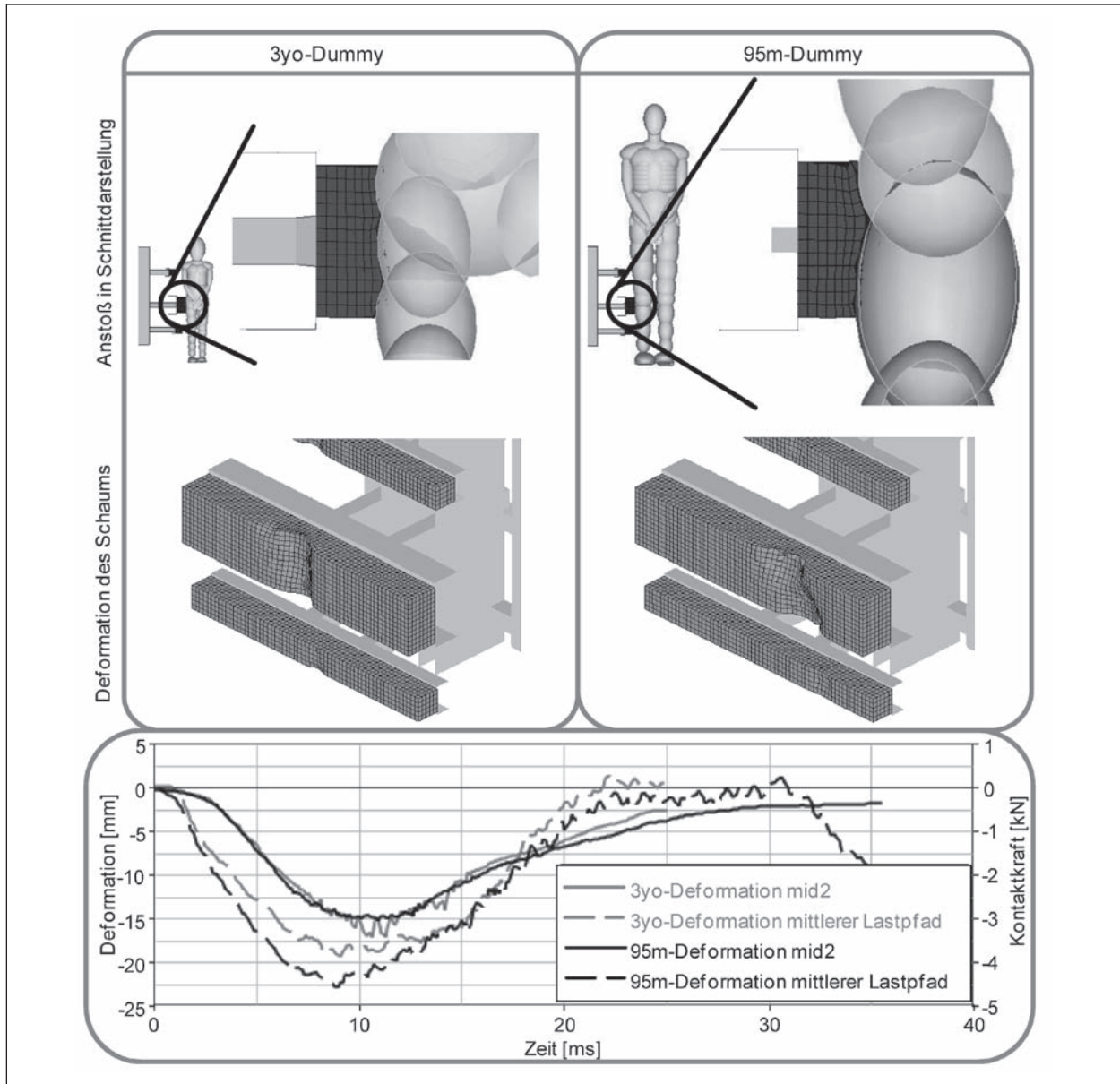


Bild 57: Auswirkung der elliptischen Beingeometrie auf das Deformationsverhalten

lung der auftretenden Intrusionen infolge des Anpralls der verschiedenen Fußgängerklassen gegen die vier Kategorien in einer Abbildung gewährleistet werden (vgl. Bild 58).

Demnach verursachen der 6yo-, der 05f-, der 05m- und der TeenM-Dummy bei Kategorie A die geringsten Deformationen, während der 3yo- und der 95m-Dummy große Intrusionen erzeugen. Bei Kategorie B stellen der 3yo-, der 05f- und der TeenM-Dummy die untere Grenze dar. Der 3yo-Dummy ist bei dieser Kategorie aufgrund der geringen Körperhöhe im Vergleich zur hohen Motorhaubenvorderkante für die Verringerung des Verletzungsrisikos beim Kopfanprall durch aufstellende Motorhauben kein relevanter Anwendungsfall, sodass diese Fuß-

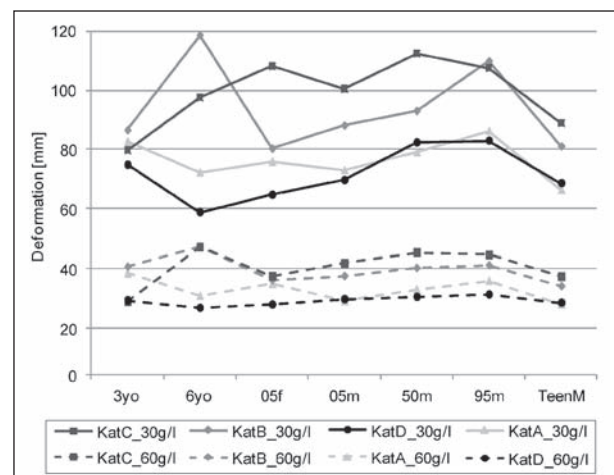


Bild 58: Summierte Deformationen des mittleren Lastpfads für sämtliche Kategorien

gängerklasse hier vernachlässigt wird. Der 6yo-Dummy besitzt bei Kategorie B den höchsten Eindringweg in den Schaumblock. Bei Kategorie C erzeugen der 3yo- und der TeenM-Dummy die geringsten Deformationen, während der 6yo-Dummy v. a. beim 60-g/l-Schaum die obere Grenze darstellt. Die Deformationen bei einem Anprall gegen Kategorie D sind mit dem Anprall gegen Kategorie A vergleichbar. Hierbei deformiert sich der Schaumblock bei einem Anprall gegen den 6yo-, den 05f-, den 05m- sowie den TeenM-Dummy am wenigsten, während der 3yo-, der 50m- und der 95m-Dummy sehr große Deformationen hervorrufen.

Bei einem Vergleich der Schwerpunktöhe der Fußgängerklassen (vgl. Tabelle 4) mit den entsprechenden Lastpfadpositionen (vgl. Tabelle 3) fällt auf, dass im Schwerpunkt angestoßene Fußgänger verhältnismäßig große Eindringwege erzeugen (wie bspw. das 3-jährige Kind bei Kategorie A und Kategorie D). Der TeenM-Dummy stellt aufgrund seines geringen Gewichts bei seiner relativ großen Körpergröße nahezu ein globales Minimum dar.

Zur Klassifizierung des Anprallgegners wird in der Fahrzeugentwicklung die effektive Masse häufig als Bewertungskriterium eingesetzt. Sie soll hierbei ein möglichst objektives Kriterium darstellen und berücksichtigt neben der maximal auftretenden Kontaktkraft auch die Anprallgeschwindigkeit sowie die Zeitdauer zwischen Erstkontakt und maximaler Kontaktkraft (EPPINGER, 1979). Durch dieses Verfahren können Kollisionen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten sowie verschiedenen Fahrzeugfrontsteifigkeiten in guter Näherung miteinander verglichen werden.

Wie in Bild 59 dargestellt, werden die entsprechenden Kontaktkräfte in der numerischen Simulation an den Lastpfadaufnahmen ermittelt, während die effektiven Massen in Matlab bestimmt werden. Die hierbei ermittelten Diagramme sind für Kategorie A in Bild 114 (Formteildichte 30 g/l) und in Bild 115 (Formteildichte 60 g/l) dargestellt. Neben dem Kraftverlauf ist in der Legende die jeweilige effektive Masse angegeben, wobei die Fußgängerklassen nach der Höhe der effektiven Masse aufgelistet werden.

Der 6yo- und der TeenM-Dummy erzeugen nach Bild 114 bei einem Anprall gegen ein Ersatzfahrzeugsystem der Kategorie A mit einer Formteildichte von 30 g/l die geringsten Kontaktkräfte und be-

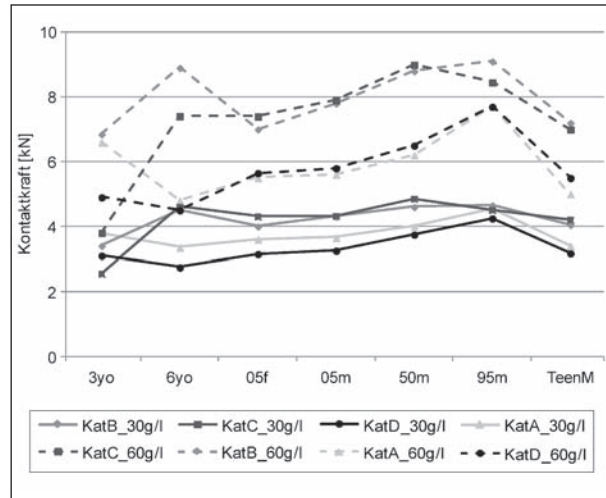


Bild 59: Kontaktkräfte des mittleren Lastpfads für sämtliche Kategorien

sitzen die kleinsten effektiven Massen. Bei einem Anprall gegen ein Ersatzfahrzeugsystem mit einer Formteildichte von 60 g/l bewirken diese beiden Fußgängerklassen ebenfalls die geringsten Kontaktkräfte. Der 05f- und der 05m-Dummy ergeben zwar eine höhere Kontaktkraft, da die Zeitdauer zwischen Erstkontakt und maximaler Kontaktkraft jedoch deutlich geringer ist, werden bei diesen Fußgängerklassen die geringeren effektiven Massen beobachtet. Bei beiden Schaumdichten stellt der 95m-Dummy hinsichtlich Kontaktkraft sowie effektiver Masse die obere Grenze dar.

Bei Fahrzeugen mit einer geringen Stoßfängerhöhe (wie Kategorie A und D) stellen bezüglich der Kontaktkraft bei beiden Frontsteifigkeiten der 6yo- und der TeenM-Dummy die untere Grenze dar (vgl. Bild 59). Bei der Kombination 60-g/l-Schaum und Kategorie D erzeugt zwar der 3yo-Dummy etwas geringere Kontaktkräfte als der TeenM-Dummy, global gesehen genügt jedoch die Kombination der beiden vorgeschlagenen Dummies, da der 6yo-Dummy bei dieser Kombination die global geringsten Werte erzeugt. Der 6yo-Dummy verursacht bei Fahrzeugen mit einer höheren Stoßfängerhöhe (bspw. Kategorie B und C) vergleichsweise hohe Kontaktkräfte. Einzige Ausnahme ist das Ersatzfahrzeugmodell für Kategorie C bei einer Formteildichte von 30 g/l, da der 6yo-Dummy bei dieser Konstellation hinter dem 3yo- und dem TeenM-Dummy die drittniedrigsten Kontaktkräfte in das Fahrzeug einbringt. Für Fahrzeugkategorien mit hoher Stoßfängerhöhe erzeugen der 3yo- und der TeenM-Dummy die geringsten Kontaktkräfte, wenn keine Berücksichtigung des 3yo-Dummy erfolgt.

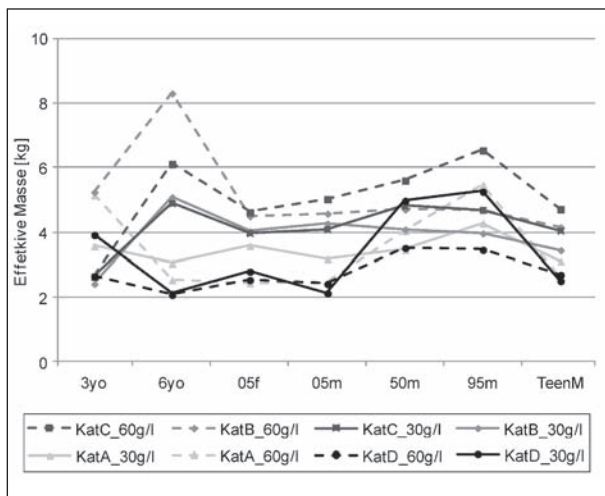


Bild 60: Ermittelte effektive Massen für sämtliche Kategorien

In Bild 60 sind die effektiven Massen für den Anprall der verschiedenen Fußgängerklassen gegen die verschiedenen Kategorien bei unterschiedlichen Formteildichten dargestellt. Bei Kategorie A und D repräsentieren der 6yo- und der 05m-Dummy die untere Grenze. Nach Vernachlässigung des 3yo-Dummys bei Kategorie B und Kategorie C stellen hier der 05f- und der TeenM-Dummy die untere Grenze dar. Durch Berücksichtigung des zeitlichen Kraftverlaufs innerhalb der Berechnung der effektiven Masse ergeben sich daher leichte Unterschiede im Vergleich zur Kontaktkraft. Die Unterschiede betragen jedoch nur wenige Prozent, sodass eine weitere Analyse der Verläufe nicht notwendig erscheint.

Steifere Fahrzeugfronten verursachen prinzipiell höhere Kontaktkräfte, während die effektive Masse hierdurch kaum beeinflusst wird.

Zusammenfassend gilt, dass der TeenM-Dummy kategorieübergreifend sehr geringe Lasteinträge in die Fahrzeugfront erzeugt. Lediglich bei Fahrzeugen mit einer geringen Stoßfängerhöhe erzeugt der Anprall mit einem 6yo-Dummy geringere Lasteinträge.

3.1.9 Vergleich von Fußgängerklassen mit geringen Lasteinträgen mit Lower-Limit-Impaktoren

Mithilfe der in Kapitel 3.1.6 und 3.1.8 durchgeführten Berechnungen können die Lasteinträge der Fußgängerklassen mit geringen Lasteinträgen (6yo, TeenM, 05f) mit denen der Lower-Limit-Impaktoren verglichen werden. Eine entsprechende

Gegenüberstellung für den Verlauf der Kontaktkraft ist in Bild 61 beispielhaft dargestellt.

Demnach kann mit dem IEE-Impaktor die Kontaktkraft bei einem Anprall gegen Kategorie B für den TeenM- sowie den 05f-Dummy bei einer Formteildichte von 30 g/l und 60 g/l hinreichend genau abgebildet werden. Des Weiteren eignet sich der IEE-Impaktor zur Abbildung des TeenM- und des 6yo-Dummys bei einem Anprall gegen das Fahrzeugersatzmodell der Kategorie C bei einer Formteildichte von 30 g/l und 60 g/l. Mit dem IEE-Impaktor können daher die Fußgängerklassen mit den geringsten Lasteinträgen bei einem Anprall gegen Fahrzeuge mit einer vergleichsweise hohen Stoßfängerhöhe abgebildet werden. Basierend auf den in der vorliegenden Untersuchung durchgeführten Analysen eignet sich der PDI hingegen bei keiner der vier Fahrzeugkategorien zur Abbildung der Fußgängerklassen mit den geringsten Lasteinträgen hinsichtlich der maximalen Kontaktkraft sowie des Kraftverlaufs.

3.2 Notwendige Anforderungen zur Verringerung des Verletzungsrisikos beim Kopfanprall

Crash-aktive Fußgängerschutzsysteme zum Schutz ungeschützter Verkehrsteilnehmer werden nahezu ausschließlich zur Verringerung des Verletzungsrisikos bei deren Kopfanprall gegen die Motorhaube entwickelt. Wesentliche Gründe für die Integration einer aufstellenden Haube sind Designfreiheit sowie flexiblere Packageauslegung. Für den im Unfall beteiligten Fußgänger können crash-aktive Hauben auch in zusätzlichen Risiken resultieren, bspw. aufgrund der verbundenen dynamischen Effekte. Diese zusätzlichen Risiken sind im Rahmen eines Bewertungsverfahrens für diese Systeme zu berücksichtigen.

Innerhalb des Kapitels 3.2 wird untersucht, inwieweit der Oberkörper des Fußgängers beim Anprall auf der Haube den Deformationsraum und hierdurch das Verletzungsrisiko beeinflusst. Hierzu wird der Gesamtanprall umfassend analysiert. Des Weiteren wird der minimal notwendige Deformationsraum durch eine theoretische Untersuchung ermittelt, der als Mindestanforderung in ein entsprechendes Bewertungsverfahren übernommen werden sollte. Für eine objektive Bewertung der Haubenintrusion infolge der Oberkörperbelastung wird abschließend in Kapitel 3.2.4 ein entsprechendes experimentelles Ersatzprüfverfahren ausgelegt.

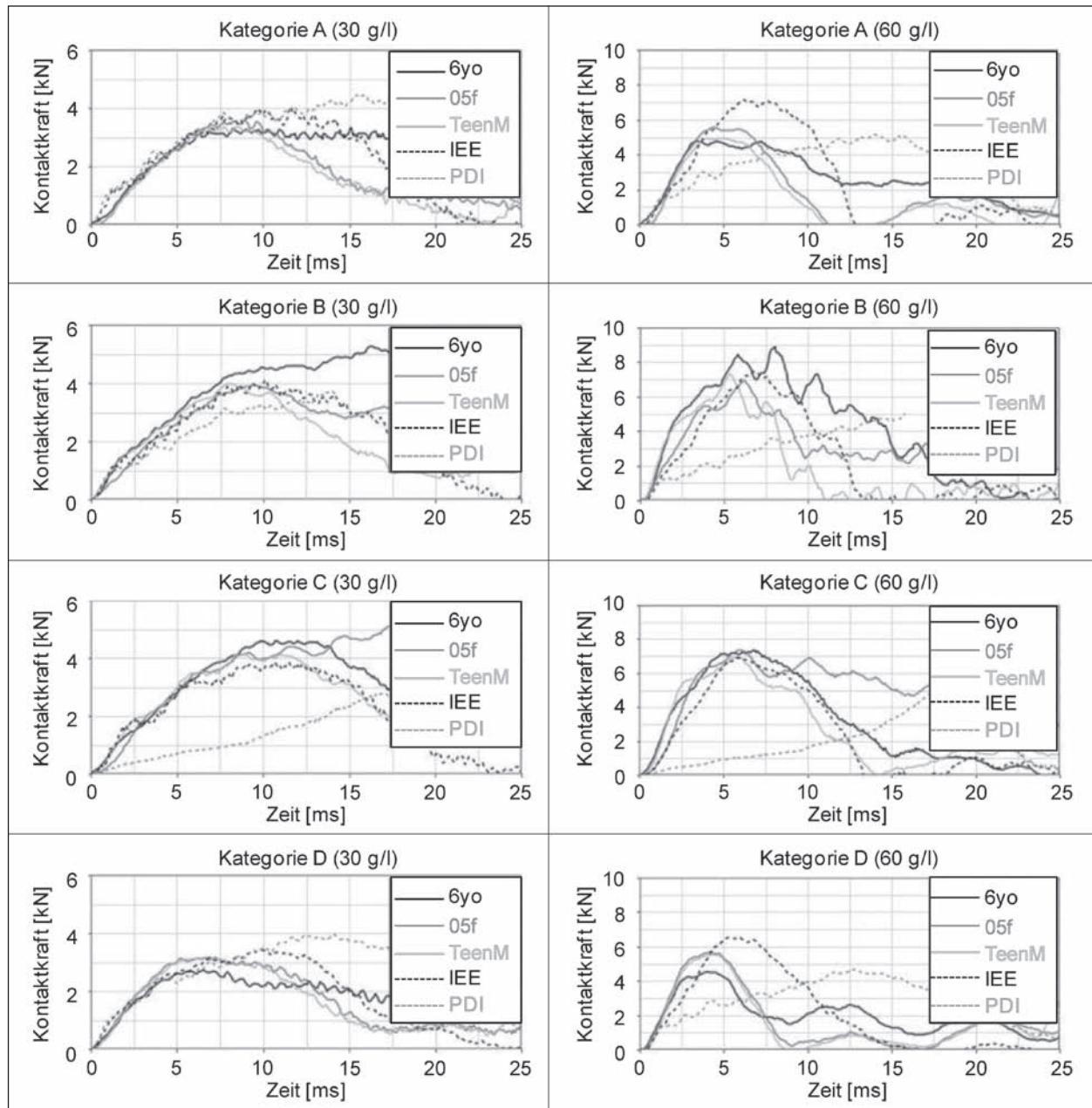


Bild 61: Kontaktkraftverlauf der Fußgängerklassen mit geringen Lasteinträgen im Vergleich zu Lower-Limit-Impaktoren

3.2.1 Einfluss des Fußgängeroberkörpers auf das Schutzpotenzial crash-aktiver Hauben

Die im November 2011 von Euro NCAP veröffentlichte Version 5.3.1 des Fußgängerschutzprotokolls beschreibt bereits ein Testverfahren für die Bewertung crash-aktiver Systeme (vgl. Kapitel 2.2.3). Innerhalb dieses Verfahrens wird auch der Einfluss des Oberkörpers des Fußgängers auf den zur Verfügung gestellten Deformationsraum berücksichtigt. Wie in Bild 28 dargestellt, darf demnach der Abstand zwischen der Haubenunterseite und steifen Fahrzeugkomponenten unterhalb der Haube in-

ge der Oberkörperbelastung zum Zeitpunkt des Kopfanpralls im Bereich des Kopfanpralls nicht kleiner oder gleich 0 mm sein. Basierend auf numerischen Berechnungen wird im Folgenden analysiert, welche Auswirkungen eine Belastung der Haube durch den Oberkörper auf das weitere Deformationsvermögen der Haube sowie das Verletzungsrisiko hat.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird eine Kollision eines 6-jährigen Kindes gegen ein Referenzfahrzeug – Opel Signum (vgl. BOVENKERK, 2009c) – berechnet. Hierbei wird die durch die Belastung mit dem Oberkörper des Fußgängers

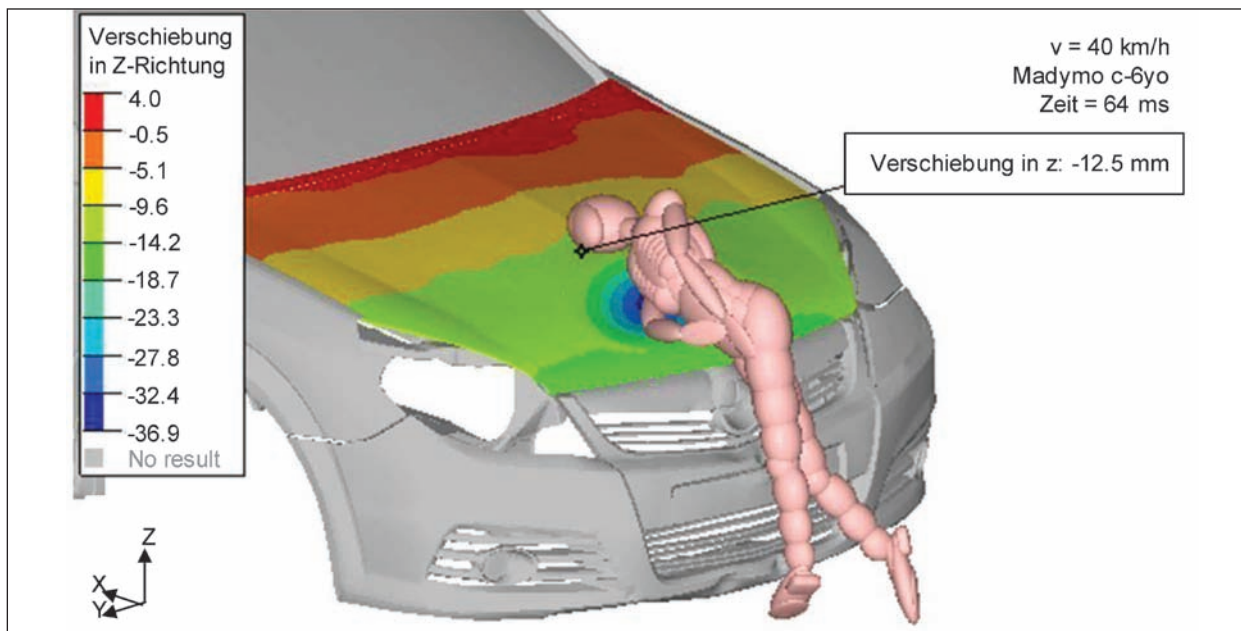


Bild 62: Motorhaubenintrusion im Kopfanprallbereich zum Zeitpunkt des Kopfanpralls resultierend aus der Oberkörperbelastung

hervorgerufene Haubendeformation untersucht. Zum Zeitpunkt des Kopfanpralls wird die rein passive Haube, wie in Bild 62 dargestellt, im Kopfanprallbereich durch den Einfluss des Oberkörpers um 12,5 mm in vertikaler Richtung deformiert.

Die Auswirkungen des in Bild 62 dargestellten Anpralls können mithilfe einer Schnittdarstellung noch besser verdeutlicht werden (siehe Bild 64). Demnach wird durch die Belastung der Haube durch den Oberkörper der für die Verringerung der Kopfbeschleunigung bereitgestellte Deformationsraum unterhalb der Haube deutlich verringert. Der Abstand zu darunterliegenden steifen Komponenten (in Bild 64 gelb dargestellt) wird von vorher 75 mm auf 62,5 mm reduziert.

Im realen Unfall kann neben der Erhöhung des Verletzungsrisikos durch die Vordeformation der Haube auch eine Verringerung des Verletzungsrisikos aufgrund der Verringerung der Kopfanprallgeschwindigkeit infolge der Abwicklung des Fußgängers entlang des Fahrzeugs erfolgen. Dieser Effekt wird durch den so genannten k-Faktor beschrieben, der das Verhältnis von Kopfaufprallgeschwindigkeit zur Fahrzeuggeschwindigkeit definiert. In Abhängigkeit von der Fahrzeugform kann jedoch auch eine Erhöhung der Kopfanprallgeschwindigkeit aufgrund des so genannten Peitscheneffekts erfolgen. Daher kann er Werte zwischen 0,7 und 1,2 annehmen (vgl. BOVEMKERK, 2009c). In der vorliegenden Simulation beträgt die Kopfgeschwindigkeit zum Zeitpunkt des Kopfanpralls 43,2 km/h, obwohl

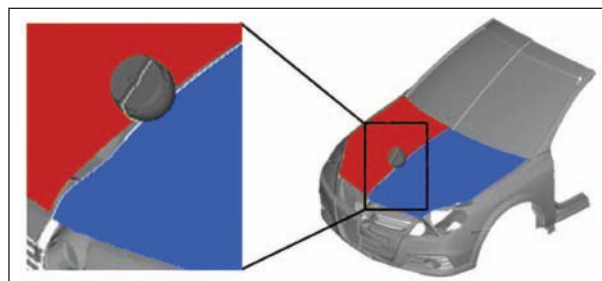


Bild 63: Anprall eines Kopffimpaktors gegen eine nicht deformierte (rot) und eine vordeformierte Motorhaube (blau)

das Fahrzeug nur mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h gegen den Fußgänger fährt.

Zur Untersuchung des Einflusses der Vordeformation des Fahrzeugs auf das Verletzungsrisiko des Fußgängers werden zwei Kopffimpaktoranprallsimulationen durchgeführt. Eine Simulation wird gegen das Referenzfahrzeug ohne Deformation durchgeführt, während bei der anderen Simulation die Deformationen und Spannungen des Fahrzeugs infolge des Anpralls aus Bild 62 berücksichtigt werden (siehe Bild 63).

Zur Untersuchung des Verletzungsrisikos wird das Kopfverletzungskriterium (engl. Head Injury Criterion bzw. HIC) verwendet, welches in sämtlichen aktuell gültigen Testverfahren herangezogen wird. Der HIC-Wert basiert auf einem Zusammenhang der Wirkungsdauer und einer durchschnittlichen Kopfbeschleunigung, die bei einem Kopfanprall zu einer gleich schweren Kopfverletzung führt

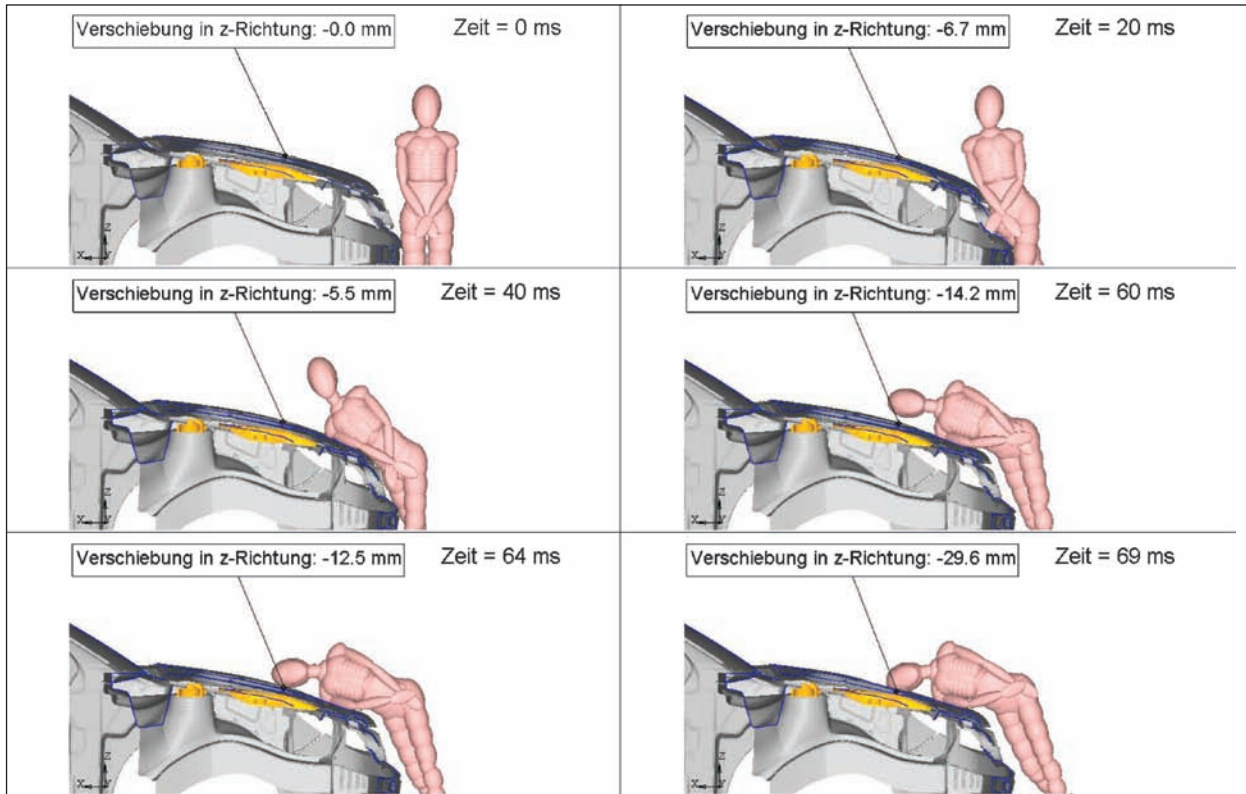


Bild 64: Sequenz des Anpralls eines 6-jährigen Kindes gegen das Referenzfahrzeug mit Intrusion im Kopfanprallbereich

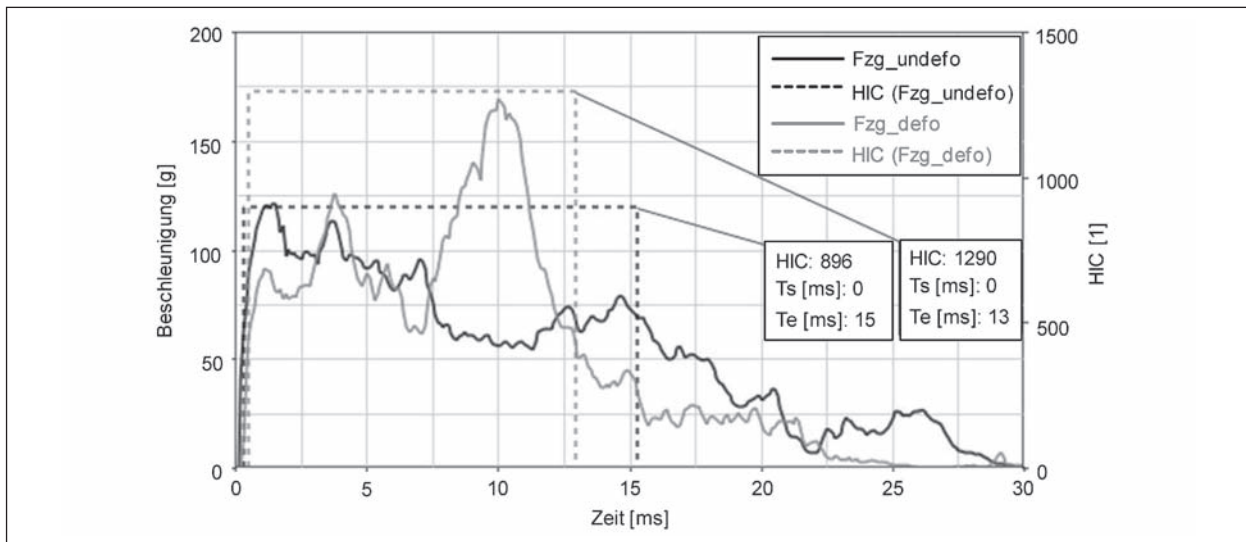


Bild 65: Beschleunigungsverläufe und HIC-Werte von Kopffimpaktorsimulationen gegen nicht deformierte und vordeformierte Fahrzeuge

(SCHMITT, 2010). Dieser Zusammenhang wird in der „Wayne State Tolerance Curve“ zusammengefasst (GURDJIAN, 1953). Der HIC-Wert berechnet sich nach einer eindeutig definierten Gleichung (Gl. 3).

$$HPC = HIC_{15} = \max \left\{ \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \right\} \quad \text{Gl. 3}$$

Bild 65 stellt die entsprechenden Beschleunigungsverläufe aus den beiden Simulationen dar. Im Falle eines nicht vordeformierten Fahrzeugs wird ein HIC-Wert von 896 ermittelt. Durch die vorherige Deformation des Fahrzeugs verringert sich die erste Beschleunigungsspitze, da sich infolge des Oberkörperanpralls die Haubenwölbung und somit die Haubensteifigkeit reduzieren. Nach 7 bis 8 ms tritt jedoch eine deutlich höhere Beschleunigungs-

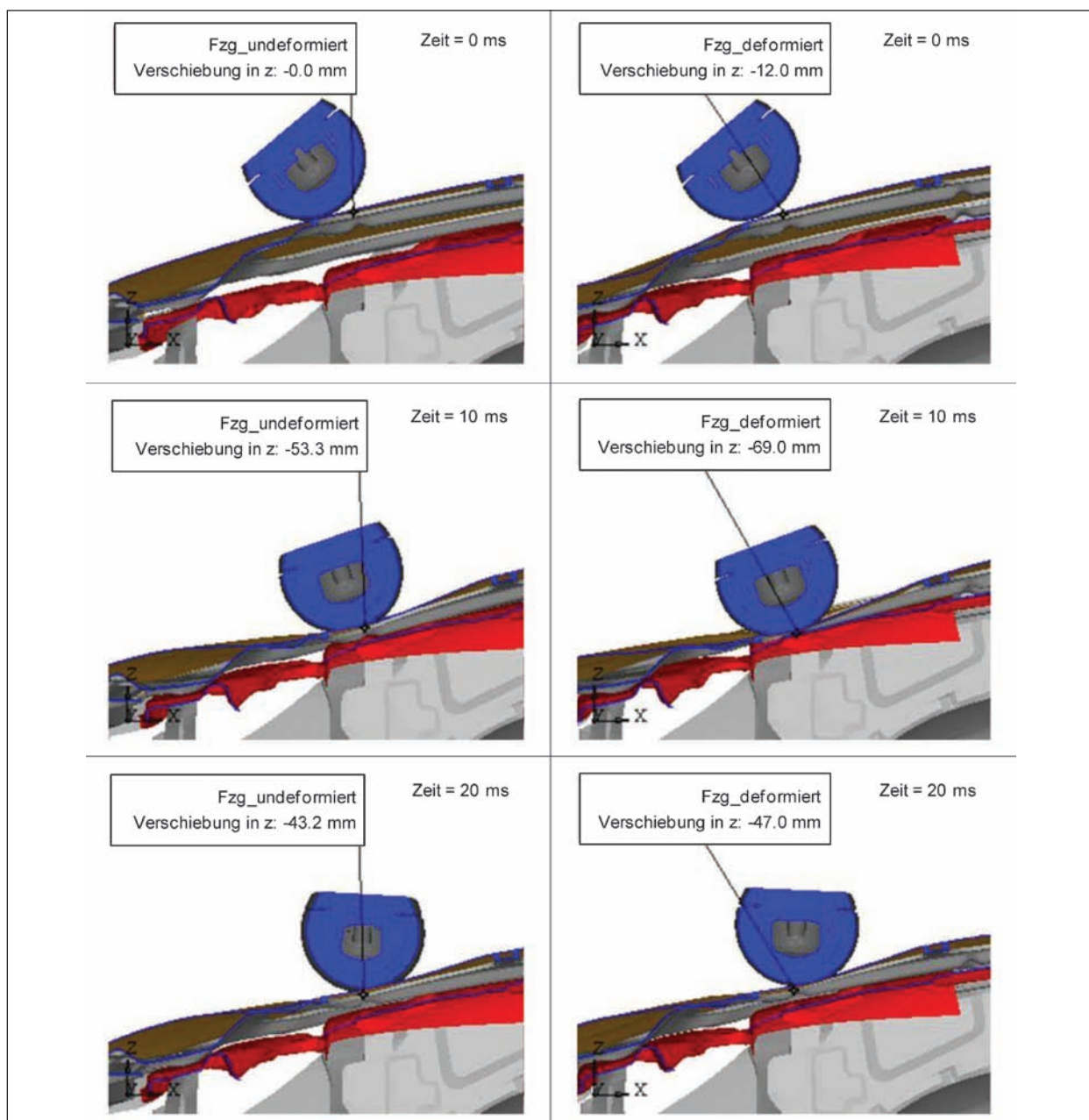


Bild 66: Sequenz zweier Kopfanprallsimulationen gegen nicht deformierte (links) und vordeformierte (rechts) Fahrzeuge

spitze auf, weshalb sich auch der HIC-Wert auf 1.290 vergrößert.

Zur Untersuchung der Ursache für diesen zweiten, sehr hohen Beschleunigungspeak wird die in Bild 66 dargestellte Sequenz des Anpralls herangezogen. Links ist hier der Anprall gegen das nicht vordeformierte Fahrzeug dargestellt, während auf der rechten Seite der Anprall gegen das vordeformierte Fahrzeug abgebildet ist. Im Falle des nicht vordeformierten Fahrzeugs genügt der zur Verfügung stehende Deformationsraum, um den Kopf vollständig abbremsen zu können. Daher wird kein Kontakt zu unter der Motorhaube liegenden Komponenten

mit einer sehr hohen Steifigkeit (in Bild 66 rot dargestellt) beobachtet.

Infolge der Vordeformation des Fahrzeugs wird der zur Verfügung stehende Deformationsraum um 12 mm verringert, weshalb der verbleibende Deformationsraum zur vollständigen Abbremsung des Kopfimpaktors nicht ausreicht. Daher kommt es nach ca. 7 ms zu einem Kontakt mit den unter der Haube befindlichen steifen Komponenten, die auch die Ursache für den zweiten Beschleunigungspeak darstellen.

Durch die Vordeformation der Haube wird das Verletzungsrisiko deutlich erhöht. Eine Berücksichti-

gung dieser Vordeformation sowie der entsprechenden Verringerung des zur Verfügung stehenden Deformationsraums im Rahmen eines Bewertungsverfahrens ist daher zwingend erforderlich. Ähnliche Studien mit größeren und schwereren Fußgängerklassen (wie bspw. dem 50%- sowie dem 95%-Mann) sollten diese Erkenntnis weiter belegen. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung können diese Studien allerdings nicht durchgeführt werden, da diese Fußgängerklassen bei einem Anprall gegen das Referenzfahrzeug aufgrund der geringen Motorhaubenlänge nicht mit dem Kopf auf der Motorhaube aufprallen.

3.2.2 Definition des minimal notwendigen Deformationsfreiraumes

Da der HIC-Wert nach einer eindeutig definierten Gleichung berechnet wird (siehe Gl. 3), kann eine theoretische Bestimmung des minimal notwendigen Deformationsfreiraums durchgeführt werden. Die nachfolgende Untersuchung orientiert sich anfänglich an ähnlichen, bereits durchgeführten Studien, wie bspw. FERREIRA (2010), JI (2009) sowie WU (2007) und wird abschließend mithilfe des Ergebnisses von umfangreichen Kopfpimpaktor-anprallsimulationen validiert bzw. verifiziert.

Der minimal notwendige Deformationsraum ergibt sich für einen Beschleunigungsverlauf, der einen möglichst geringen HIC-Wert erzeugt. Dieser optimale Beschleunigungsverlauf kann mithilfe mathematischer Berechnungen wie bspw. der Kurvendiskussion (Gl. 4) bestimmt werden.

$$\frac{d_{hic}(t)}{dt} = 0 \Rightarrow a(t) = c \cdot t^{-0,4} \quad \text{Gl. 4}$$

Durch Einsetzen von Gl. 4 in Gl. 3 ergibt sich demnach der optimale Beschleunigungsverlauf nach Gl. 5.

$$a(t) = 0,6 \left(\frac{HIC}{t} \right)^{0,4} \quad \text{Gl. 5}$$

Mithilfe allgemeiner physikalischer Zusammenhänge (Gl. 6 sowie Gl. 7) kann hiermit der in Gl. 8 angegebene minimal notwendige Deformationsraum bestimmt werden.

$$v = -v_0 + 9,81 \int a(t) dt = 0 \quad \text{Gl. 6}$$

$$d = \int v dt \quad \text{Gl. 7}$$

$$d_{min} = 8,342 \cdot 10^{-3} \frac{v_0^{\frac{8}{3}}}{HIC^{\frac{2}{3}}} \quad \text{Gl. 8}$$

Nach Gl. 8 ist der minimal notwendige Deformationsraum nur von der Anprallgeschwindigkeit sowie dem HIC-Wert und nicht von der Impaktormasse abhängig. Für eine Anprallgeschwindigkeit von 40 km/h und einen HIC-Wert von 1.000 ergibt sich der minimal notwendige Deformationsraum zu 51,28 mm.

Anzumerken ist hierbei, dass dieser Wert in der Praxis nicht immer ausreicht, da der in Gl. 5 angegebene optimale Beschleunigungsverlauf während eines realen Kopfanpralls nie erreicht werden kann. Hierfür wäre ein unendlich hoher Beschleunigungsanfangspeak notwendig, der nicht realisierbar ist. Um die bisherigen theoretischen Betrachtungen mit dem realen Anwendungsfall besser vergleichen zu können, werden Ergebnisse zur Verfügung stehender Kopfanprallsimulationen auf eine Motorhaube herangezogen. Hierbei wird eine umfassende Untersuchung der Haube mit mehr als 90 Anprallpunkten berücksichtigt. Die Ergebnisse werden mithilfe einer Effizienzbetrachtung nach Gleichung 9 miteinander verglichen.

$$\eta = \frac{d_{min}}{d_{ist}} \quad \text{Gl. 9}$$

Falls die Deformation aus dem Beschleunigungssignal ermittelt wird, wird für die Anpralluntersuchung eine durchschnittliche Effizienz von 75,3 % (Spanne: 60 bis 86 %) bestimmt. Da hier die rotatorische Bewegung und die Flexibilität der Impaktorthaut vernachlässigt werden, wird zusätzlich der reale Deformationsraum analysiert. Hierbei ergibt sich eine mittlere Effizienz von 88,6 % (Spanne: 69 bis 105 %). Im besten Fall kann daher eine Effizienz von 105 % erreicht werden. Bei einer Division durch den theoretisch minimal notwendigen Deformationsraum ergibt sich der reale minimal notwendige Deformationsraum zu 49 mm.

Dieser minimal notwendige Deformationsweg wird in der Praxis häufig durch einen Erfahrungswert ersetzt. Hierbei gilt, dass zur Einhaltung des Grenzwerts (HIC < 1.000) ein Mindestdeformationsweg von 80 mm notwendig ist.

3.2.3 Bestimmung des durchschnittlichen Abstandes zwischen Oberkörper- und Kopfanprall

Falls in einem Bewertungsverfahren für crash-aktive Fußgängerschutzsysteme die Intrusion der Motorhaube infolge der Belastung durch den

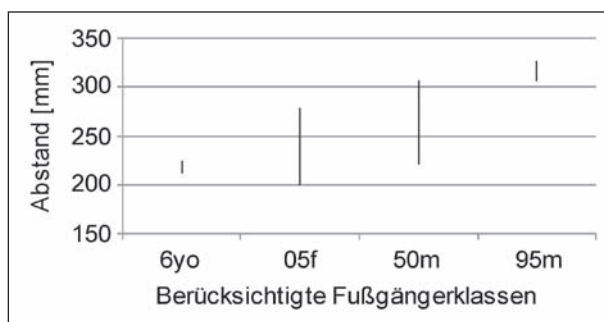


Bild 67: Abstand zwischen Oberkörper- und Kopfanprall

Oberkörper des Fußgängers berücksichtigt werden soll, sind Informationen bezüglich des zeitlichen Ablaufs und des geometrischen Abstandes zwischen Oberkörper- und Kopfanprall notwendig. In diesem Zusammenhang definiert sich der Oberkörperanprall durch den oberen Bereich des menschlichen Torsos, der beim Kontakt mit der Fahrzeugfront einen wesentlichen Krafteintrag in diesen Fahrzeugbereich einleitet. In der vorliegenden Untersuchung werden daher Simulationen einer Fahrzeug-Fußgänger-Kollision analysiert, bei denen sowohl der Oberkörper als auch der Kopf des Fußgängers auf der Motorhaube aufprallen. Mithilfe der in Bild 37 dargestellten Fußgängermodelle sowie 12 verschiedene Fahrzeugmodelle aus dem Vorgängerprojekt (vgl. BOVENKERK, 2009c) können die Kontaktbereiche des Oberkörpers, die eine sehr hohe Kontaktkraft in die Motorhaube einleiten, ermittelt und der Abstand dieser Bereiche zum entsprechenden Kopfanprallbereich bestimmt werden. Wie in Bild 67 dargestellt beträgt der Abstand durchschnittlich zwischen 250 und 275 mm.

3.2.4 Auslegung eines Ersatzprüfverfahrens

Um die Haubenintrusion infolge der Oberkörperbelastung objektiv bewerten zu können, muss ein Verfahren zur Nachbildung vergleichbarer Deformationen mit einer hohen Reproduzierbarkeit entwickelt werden. Euro NCAP veröffentlichte 2011 ein Testprotokoll zur Bewertung der Haubenintrusion, wonach Anprallsimulationen mit vier verschiedenen Fußgängerklassen berücksichtigt werden. Aufgrund der Vielzahl existierender Simulationsumgebungen sind diese für das Testlabor nicht immer verifizierbar. Daher bietet sich hier ein experimenteller Nachweis an. Zur Zeit der Projektdurchführung verfügbare Impaktoren sind neben den bereits angesprochenen LowerLeg- und Kopfimpaktoren auch der so genannte Hüft- bzw. UpperLeg-Impaktor,



Bild 68: Vergleich des Anpralls eines 6-jährigen Kindes mit einem Hüftimpaktor

welcher in Bezug auf die äußeren Dimensionen dem Oberkörper des sechsjährigen Kindes in erster Annäherung hinreichend genau entspricht (siehe Bild 68).

Die Eigenschaften der Anprallprüfung mit dem Hüftimpaktor sind im Unterschied zu den Prüfungen mit den anderen Impaktoren variabel und hängen von der Fahrzeugfrontgeometrie ab (KÜHN, 2007). Demnach können das Gewicht (9,5 bis 17,7 kg), die Anprallgeschwindigkeit (20 bis 40 km/h) sowie der Anprallwinkel (10° bis 47°) variieren (PINECKI, 2009). Da, wie in Bild 69 dargestellt, durch die Oberkörperbelastung der Motorhaube hervorgerufene Kontaktkräfte auf der Haube einen sehr unterschiedlichen Verlauf aufweisen, müssen die variablen Parameter der Anprallprüfung basierend auf einem Vergleich der hervorgerufenen Deformationen definiert werden.

Die Intrusionen der Motorhaube sind im Falle einer Kollision eines 6-jährigen Kindes gegen ein Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h mit dem Anprall durch einen Hüftimpaktor mit einer Masse von 10 kg bei einer Anprallgeschwindigkeit von 20 km/h vergleichbar (siehe Bild 71). Die innerhalb des Bewertungsverfahrens zum Hüftanprall verwendeten Anprallwinkel sind zur Abbildung des Oberkörperanpralls nicht geeignet. Wie in Bild 70 dargestellt, variiert der Anprallwinkel des Oberkörpers bzw. der Schulter auf der Motorhaube zwischen 57° und 97° . Da vor allem die Fahrzeugfront den Anprallwinkel beeinflusst, ist eine Definition eines festen Anprallwinkels für alle Fahrzeugkategorien nicht sinnvoll. Innerhalb eines Ersatzprüfverfahrens sollte daher zunächst eine Anprallsimulation zur Bestimmung der Anprallwinkel durchgeführt werden.

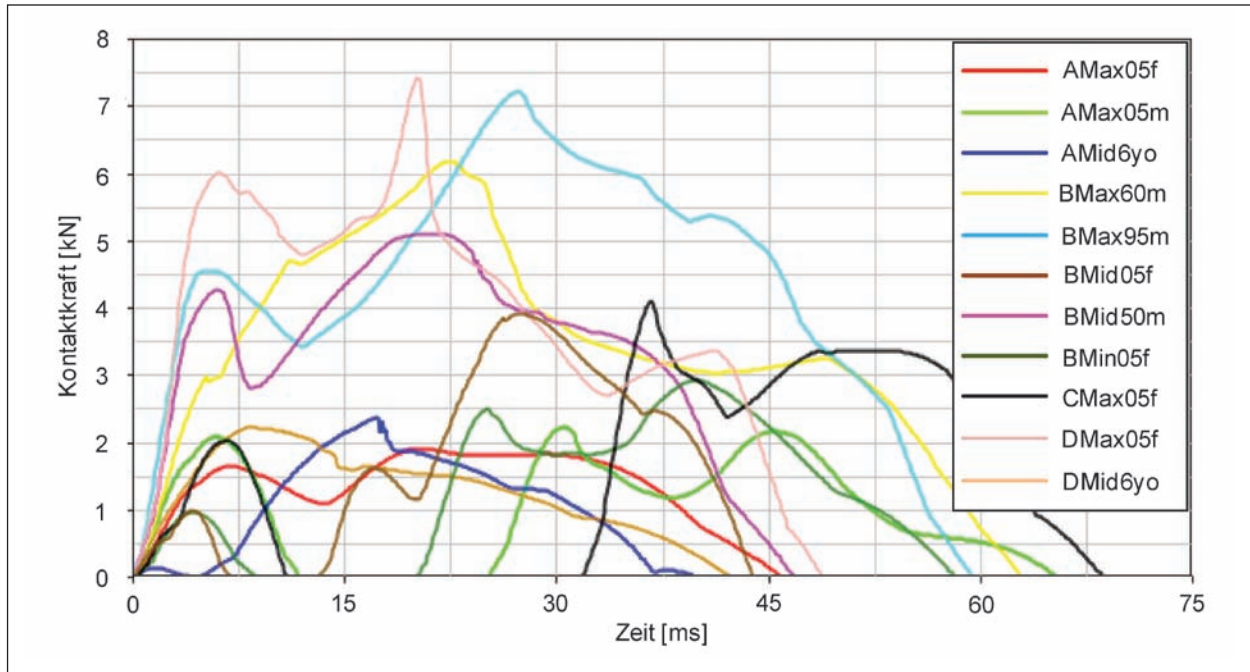


Bild 69: Kontaktkräfte zwischen Oberkörper und Motorhaube bei verschiedenen Fußgänger-Fahrzeug-Kollisionen

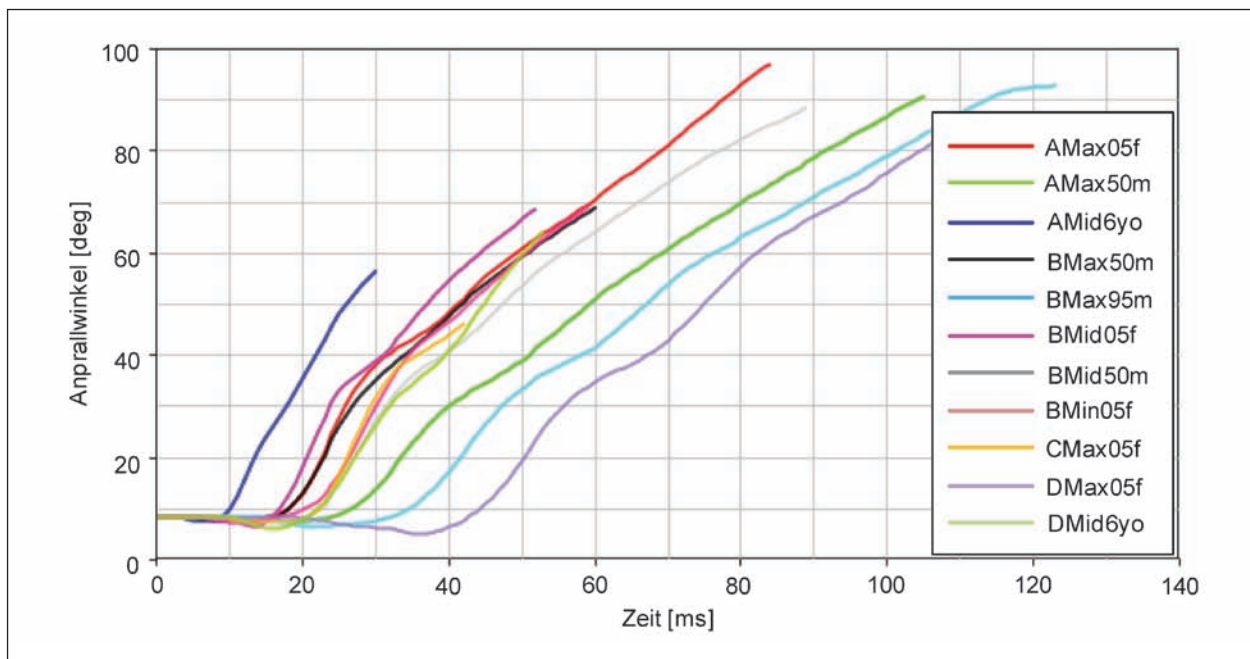


Bild 70: Anprallwinkel der Schulter auf der Motorhaube bei verschiedenen Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen

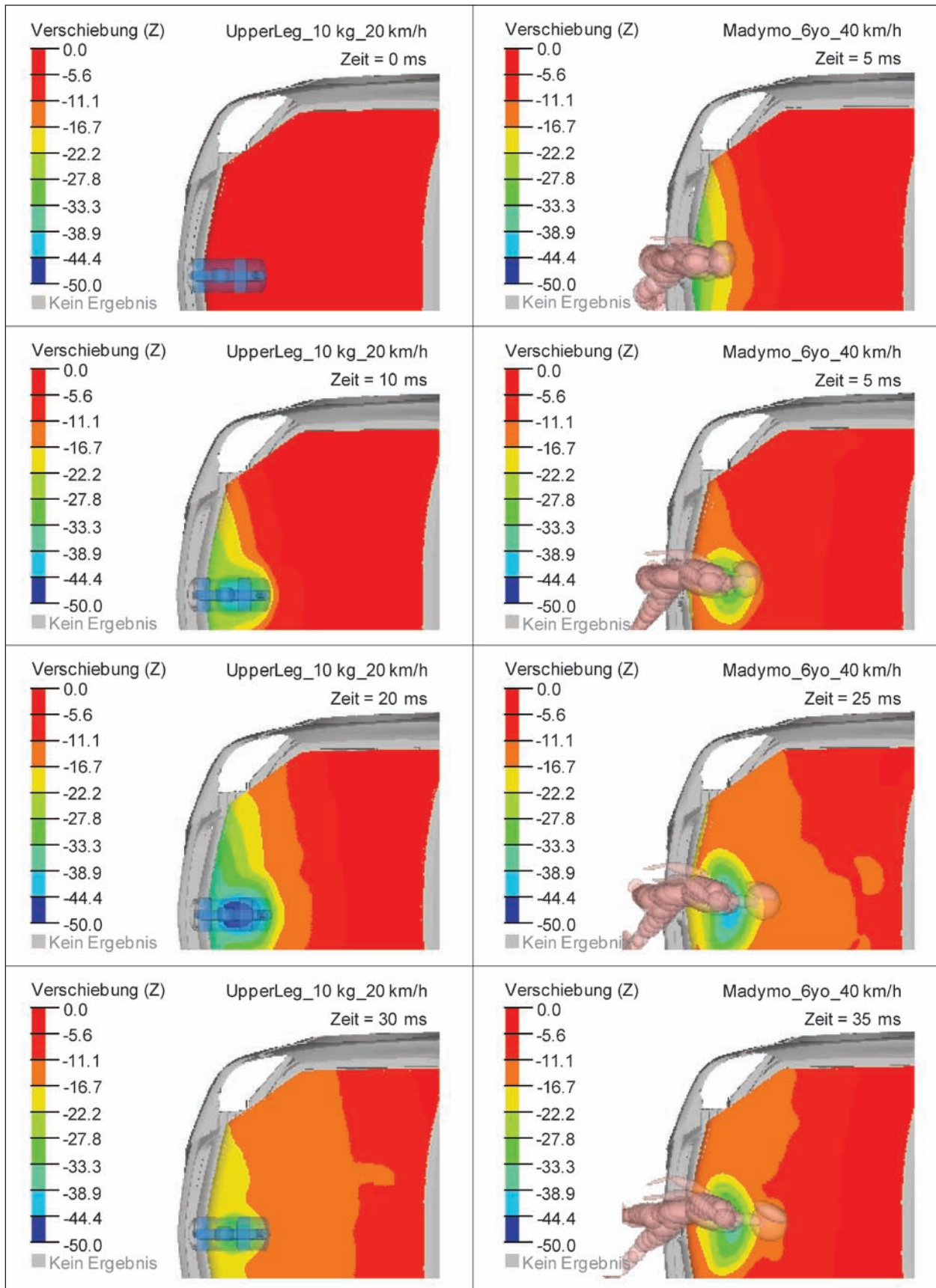


Bild 71: Gegenüberstellung der Intrusionen bei einem Anprall eines Hüftimpaktors (links) und eines 6-jährigen Kindes (rechts)

4 Erarbeitung eines Prüfverfahrens für crash-aktive Fußgängerschutzsysteme

Ziel dieses Forschungsprojektes ist die Erweiterung des innerhalb des Vorgängerprojektes (siehe BOVENKERK, 2009c) erarbeiteten hybriden Testverfahrens für den Frontscheibenbereich. Die wesentliche Erweiterung besteht hierbei in einer detaillierten Ausarbeitung einer Bewertungsmöglichkeit kontaktbasierter Sensorsysteme zur Fußgängererkennung sowie in einer anforderungsgerechten Berücksichtigung dynamischer Schutzsysteme wie bspw. aufstellender Motorhauben.

Neben der Beschreibung der neuen Forschungserkenntnisse in den Kapiteln 4.4, 4.5 sowie 4.5 werden die Ergebnisse des Vorgängerprojektes zur vollständigen Darstellung des Prüfverfahrens im Folgenden mit neuesten Erkenntnissen aktualisiert und zusammenfassend beschrieben.

4.1 Anwendungsbereich

Unfälle mit ungeschützten Verkehrsteilnehmern geschehen vornehmlich innerorts (CARE, 2008). Das im Folgenden beschriebene Prüfverfahren gilt daher in erster Linie für Fahrzeuge im urbanen Verkehr. Dies sind neben Fahrzeugen zur Personenbeförderung auch kleine Transporter.

Basis für das Prüfverfahren stellt die „Globale Technische Regelung“ (GTR) dar, die zukünftig die Fußgängerschutztests international vereinheitlichen soll. Entsprechend der im Januar 2009 veröffentlichten GTR Nr. 9 gilt das Testverfahren für Fahrzeuge der Fahrzeugkategorie 1-1 und 2 mit einer zulässigen Gesamtmasse zwischen 0,5 und 2,5 t (GTR, 2009). Eine Einteilung anhand der Fahr-

zeugform ist innerhalb der GTR zunächst nicht vorgesehen.

Innerhalb des Vorgängerprojektes wurden vier Fahrzeugkategorien anhand des Haubenwinkels sowie der Höhe der vorderen Motorhaubenkante unterschieden (vgl. Bild 72). Die Bezeichnung orientiert sich hierbei an den jeweiligen charakteristischen Fahrzeugfrontformen. Diese Charakterisierungsart wird zwar bei der GTR nicht mehr berücksichtigt, ist jedoch aufgrund der Abhängigkeit der Unfallkinematik von der Fahrzeugfrontform sinnvoll und wird daher im Rahmen dieses Projektes fortgesetzt.

Die Fahrzeugeinteilung erfolgt hierbei mit den fahrzeugspezifischen Kenngrößen des Haubenwinkels sowie der Höhe der vorderen Motorhaubenkante. Die Kenngrößen sind im Vorgängerprojekt BOVENKERK (2009c) und im technischen Anhang der Verordnung (EG) Nr. 631/2009 (ECE, 2009b) für die Verordnung (EG) Nr. 78/2009 (ECE, 2009) bzw. in der japanischen Gesetzgebung (siehe Bluebook, 2005) näher beschrieben.

4.2 Berücksichtigung einer möglichst realen Unfallkinematik

Für eine objektive Bewertung des Verletzungsrisikos ungeschützter Verkehrsteilnehmer im Falle einer Kollision mit einem Fahrzeug werden Fahrzeuge seit einigen Jahren mithilfe von Anprallversuchen u. a. mit Kopfprüfkörpern evaluiert. Die Versuchsrandbedingungen, wie bspw. die Anprallgeschwindigkeit, der Anprallwinkel oder der Anprallbereich, werden innerhalb aktuell gültiger Testverfahren (GTR, 2009; ECE, 2009 oder Euro NCAP, 2011) für verschiedene Fahrzeugklassen nicht variiert.

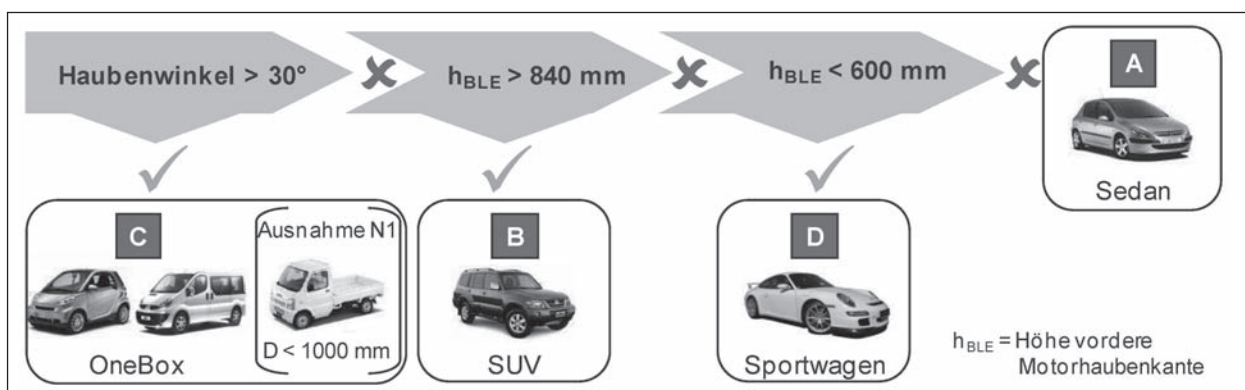


Bild 72: Kategoriezuordnung und Auswahlkriterien (BOVENKERK, 2009c)

Innerhalb der Vorgängerprojekte wurden zwei Studien zur Untersuchung der Unfallkinematik bei Fahrzeug-Fußgängerunfällen durchgeführt (siehe Bild 73). Innerhalb der ersten Studie wurden vor allem die Orientierung des Fußgängers und die Anprallposition variiert, während in der zweiten Studie eine größere Anzahl von Fahrzeugmodellen untersucht wurde.

Hierbei zeigte sich, dass die Unfallkinematik für die einzelnen Unfallszenarien stark variieren kann. Sowohl Anprallbereich (Bild 74), Anprallwinkel (Bild 75) als auch Kopfanprallgeschwindigkeit (Bild 76) sind von der Fahrzeugkategorie sowie von der Fußgängerklasse abhängig.

Die Relativgeschwindigkeit des Kopfes entspricht kurz vor dem Anprall des Kopfes gegen das beteiligte Fahrzeug in den meisten Fällen nicht der Fahrzeuggeschwindigkeit. Wie in den Vorgängerprojekten gezeigt wurde, beträgt die Relativgeschwindigkeit des Kopfes kurz vor dem Fahrzeuganprall bei

einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 40 km/h zwischen 20 und 60 km/h (WALLENTOWITZ, 2007; BOVENKERK, 2009c). Der Unterschied resultiert aus der Unfallkinematik, wobei der Kopf des Fußgängers bspw. bei einer Kollision mit einem Fahrzeug der Kategorie D aufgrund des so genannten „Hebel-“ bzw. „Peitschenschlageffekts“ beschleunigt wird.

Die Relativgeschwindigkeit des Kopfes kurz vor dem Kopfanprall gegen das Fahrzeug hängt neben der Fahrzeugfrontgeometrie sowie der Fahrzeuggeschwindigkeit auch von der Orientierung des Fußgängers relativ zum Fahrzeug ab. Werden in der Kinematikuntersuchung verschiedene Fußgängerorientierungen berücksichtigt, erweitert sich das entsprechende Intervall der Kopfanprallgeschwindigkeit auf einen Bereich zwischen 8 und 57 km/h (siehe Bild 77).

Beschränkt sich die Analyse der Geschwindigkeiten auf eine Anprallrichtung in lateraler Stellung des

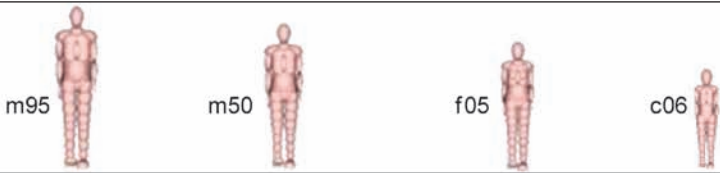
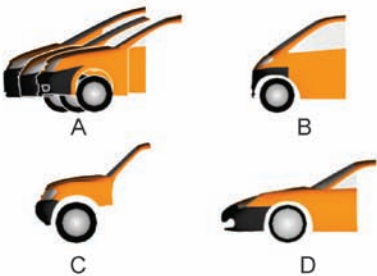
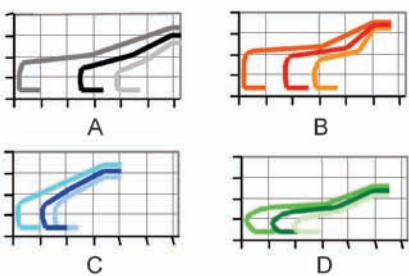
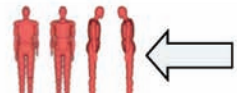
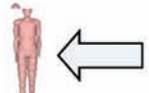
Dummy		
Fahrzeuggeschwindigkeit [km/h]	40	
	Anprallvariation	Fahrzeugvariation
Fahrzeugmodelle	 <p>Ein 3d-Modell für Kategorie B, C und D sowie drei 3d-Modelle für Kategorie A</p>	 <p>Drei 2d-Modelle pro Fahrzeugkategorie</p>
Anprallposition	Drei (Fahrzeugmitte, $\frac{3}{4}$ der Fahrzeugbreite und Fahrzeugaußenkante)	Eine (Fahrzeugmitte)
Fußgängerorientierung	 <p>Vier (Seitlich rechts (fahrzeugseitiges Bein hinten), seitlich links (fahrzeugseitiges Bein vorn), Frontal und Rückseitig)</p>	 <p>Eine (Seitlich links (fahrzeugseitiges Bein hinten))</p>
Anzahl der Variationen	288 (davon 201 gerechnet)	48 (davon 48 gerechnet)

Bild 73: Simulationsparameter für Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen in Vorgängerprojekten

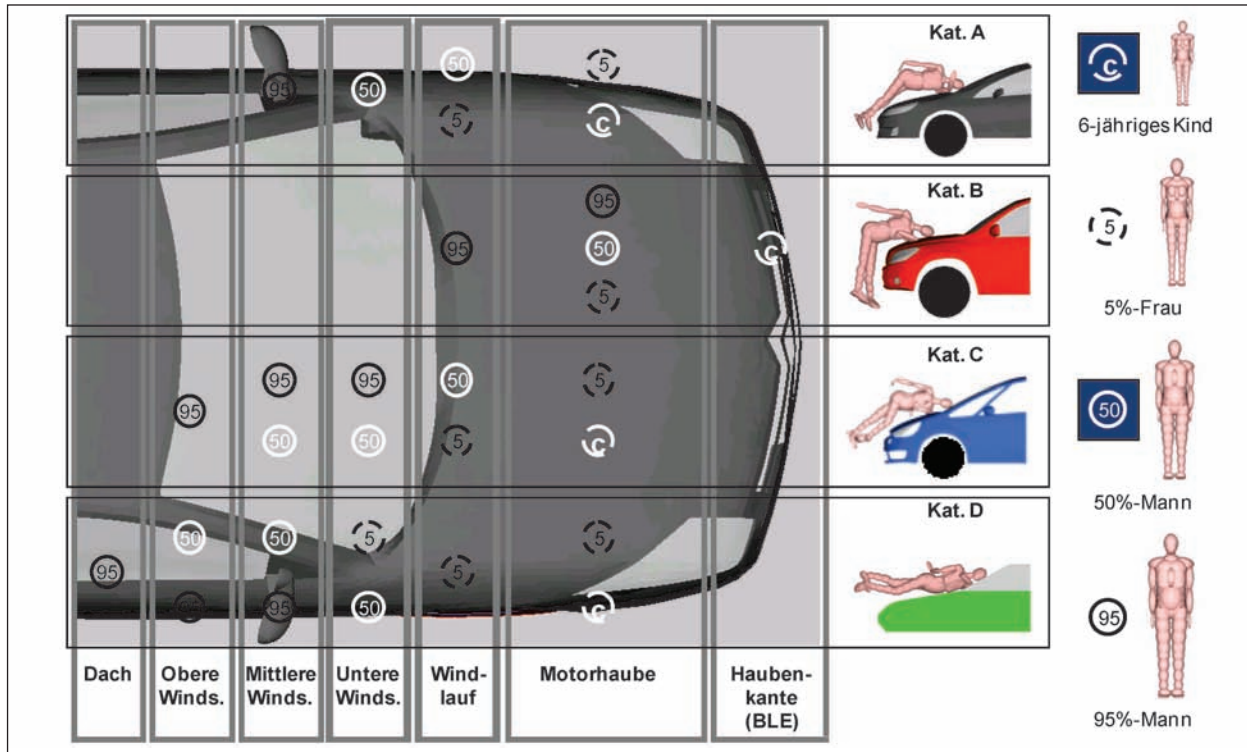


Bild 74: Kopfaufprallorte bei unterschiedlichen Frontformen aus Fahrzeugvariationsstudie (BOVENKERK, 2008b)

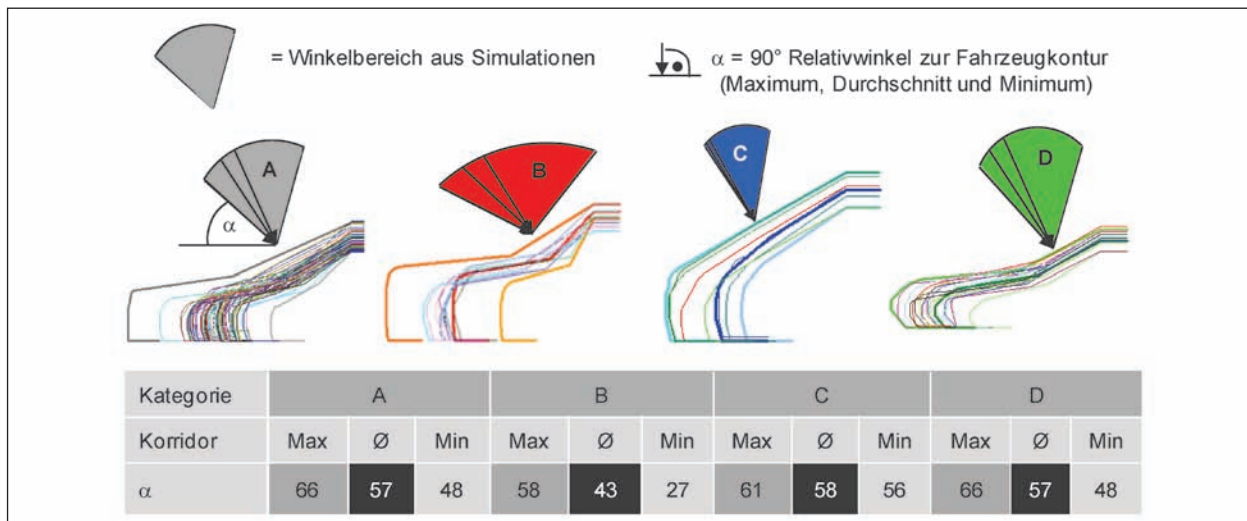


Bild 75: Verteilung der Anprallwinkel für die Kategorien aus Fahrzeugvariationsstudie (BOVENKERK, 2009c)

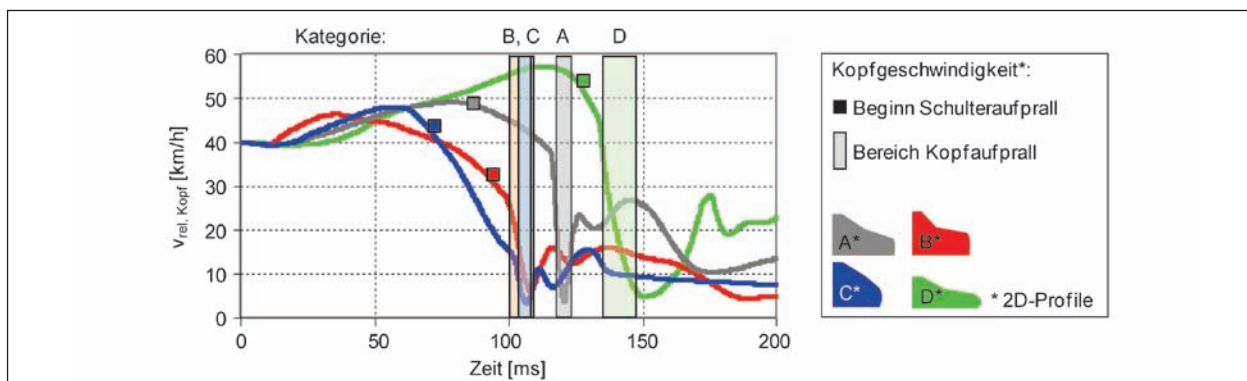


Bild 76: Kopfgeschwindigkeitsverläufe für unterschiedliche Kategorien (m50) aus Fahrzeugvariationsstudie (BOVENKERK, 2009c)

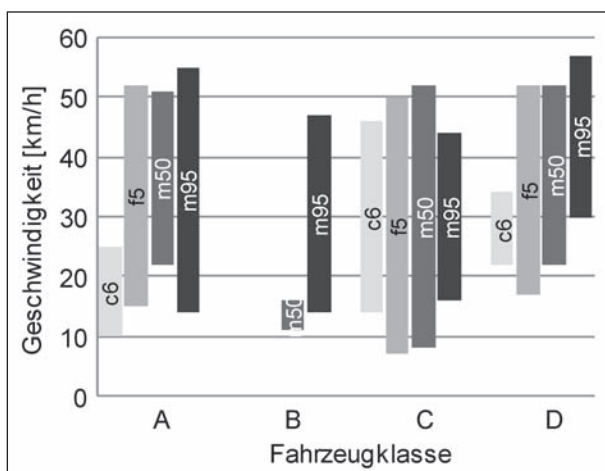


Bild 77: Kopfanprallgeschwindigkeit in km/h aus Anprallvariationsstudie für sämtliche Fußgängerorientierungen

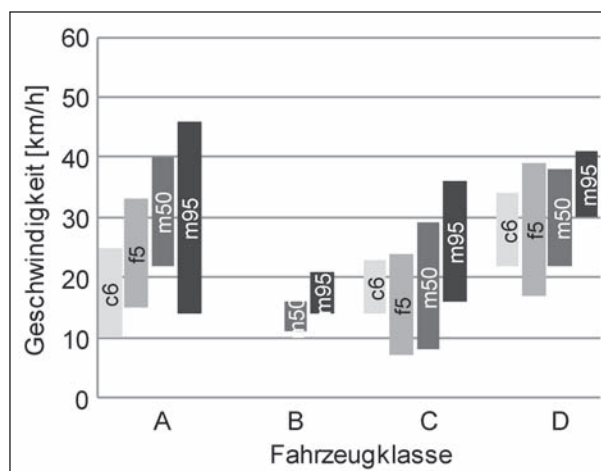


Bild 79: Kopfanprallgeschwindigkeit in km/h aus Anprallvariationsstudie für laterale Fußgängerorientierungen

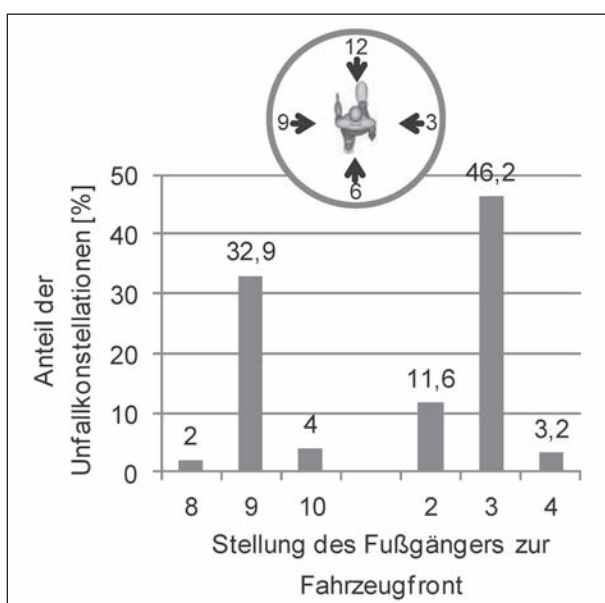


Bild 78: Stellung des Fußgängers bei einer Kollision mit einem Fahrzeug (OTTE, 2010)

Fußgängers zum Fahrzeug (3 Uhr oder 9 Uhr, vgl. Bild 78), verringert sich das Intervall bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 40 km/h auf eine Relativgeschwindigkeit des Kopfes von 8 bis 46 km/h (BOVENKERK, 2006).

Diese Konfiguration gilt für einen Großteil der Fußgängerunfälle (79 % nach OTTE (2010), 92 % nach KÜHN (2007), 78 % nach CARTER (2005)). Vor allem bei Fußgängern mit einer geringen Körpergröße liegt die Relativgeschwindigkeit des Kopfes deutlich unter der Fahrzeuggeschwindigkeit. Eine Abhängigkeit von der Anprallposition am Fahrzeug (bspw. Fahrzeugmitte oder äußerer Anprallbereich) ist hingegen kaum zu beobachten (BOVENKERK, 2006).

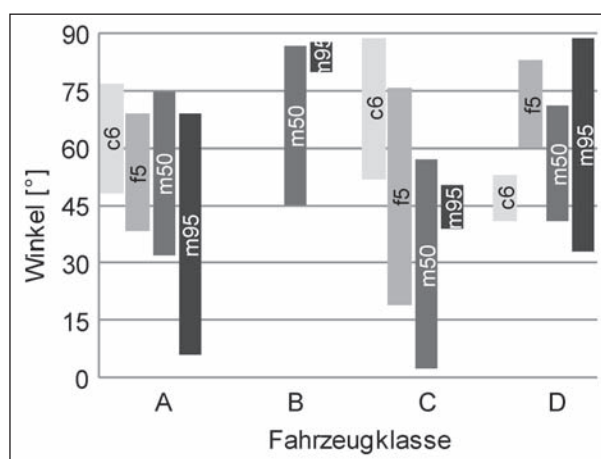


Bild 80: Kopfanprallwinkel in ° aus Anprallvariationsstudie für laterale Fußgängerorientierungen

Anprallwinkel und Anprallbereich hängen ebenfalls von der Fahrzeugfrontgeometrie, der Fußgängergröße als auch der Anprallposition ab. Richtwerte für Kopfanprallwinkel bei seitlicher Anprallrichtung sind in Bild 80 angegeben.

Zur Berücksichtigung einer möglichst realen Unfallkinematik sind daher von der Fahrzeugfrontgeometrie abhängige variable Versuchsrandbedingungen sinnvoll. Diese Versuchsrandbedingungen können bspw. mithilfe der im Folgenden beschriebenen numerischen Berechnungen, die in das Testverfahren integriert werden sollen, ermittelt werden.

4.3 Definition der Versuchsrandbedingungen mithilfe von Ganzkörpersimulationen

Die Entwicklung bzw. Auslegung fahrzeugseitiger Schutzmaßnahmen wird derzeit maßgeblich mithilfe numerischer Berechnungsmethoden, wie bspw. der Finiten-Elemente-Methode, vorangetrieben. Aktuell entwickelte Gesamtfahrzeugmodelle der Automobilhersteller sind bereits in der Lage, einen Großteil der sicherheitsrelevanten Lastfälle mit einer hohen Genauigkeit abzubilden. Mithilfe dieser Modelle kann die Sicherheit der einzelnen Fahrzeuge ohne drastische Aufwandserhöhung deutlich detaillierter bewertet werden, wobei Verfahren zur Bewertung des Validierungsstatus der Modelle zu berücksichtigen sind.

Basis des innerhalb des vorliegenden Projektes weiterentwickelten Prüfverfahrens sind vom Hersteller durchzuführende Simulationen mit Menschmodellen, die dem Prüflabor zur Verfügung gestellt werden. Die hierbei ermittelten Simulationsergebnisse werden zur Auswahl der Versuchsrandbedingungen für den Funktionsnachweis der Erkennungssensorik (Kapitel 4.4), für die Kopfanprallversuche (Kapitel 4.5) sowie für die Bewertung des Einflusses des Oberkörpers (Kapitel 4.5) herangezogen.

Zur möglichst detaillierten Analyse der entsprechenden Unfallkinematik sind vom Hersteller insgesamt mindestens zehn Simulationen mit entsprechenden Menschmodellen durchzuführen (Bild 81). Hierbei ist der Anprall von fünf Fußgängergrößen (6-jähriges Kind, 5%-Frau, 50%-Mann, 95%-Mann und TeenM-Dummy) an zwei unterschiedlichen Anprallpositionen am Fahrzeug zu berechnen. Das 3-jährige Kind wird hierbei nicht berücksichtigt, da crash-aktive Fußgängerschutzsysteme vor allem für Personen mit einer größeren Körpergröße verbunden mit einer späteren Kopfanprallzeit ausgelegt werden.

Die Fußgänger stehen in seitlicher Schrittstellung zum Fahrzeug, wobei die linke Körperhälfte dem

Fahrzeug zugewandt ist (9-Uhr-Stellung). Der jeweilige Fußgänger wird von der Fahrzeugfront erfasst. Zur Berücksichtigung der Abhängigkeit der Unfallkinematik von der Anprallposition werden ein Anprall in Fahrzeugmitte und ein Anprall am äußeren Kopfanprallbereich, der in Kapitel 4.6.2 definiert wird, untersucht.

Mithilfe dieser Berechnungen können sämtliche Versuchsrandbedingungen, die für eine Bewertung basierend auf einer möglichst realen Unfallkinematik notwendig sind, definiert werden. Die innerhalb dieser Simulationen zu ermittelnden Parameter sind in Bild 82 anschaulich dargestellt.

Zur Auswahl eines geeigneten Prüfkörpers für die Bewertung der korrekten Funktionsweise kontaktbasierter Erkennungssysteme sind die innerhalb der ersten Kontaktphase (bis 20 ms nach Erstanprall) in die Fahrzeugfront eingeleiteten Lasteinträge der verschiedenen Fußgängerklassen zu charakterisieren. Da die entsprechenden Sensoren, wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, meist in diesem Fahrzeugbereich implementiert sind, ist dieses Vorgehen sinnvoll. Des Weiteren kann ein effektiver Schutz der Fußgänger nur gewährleistet werden, falls das crash-aktive-System zum Zeitpunkt des Kopfaufpralls vollständig aufgestellt bzw. entfaltet ist. Daher wird auch die Kopfanprallzeit (HIT) ermittelt. Die Kopfanprallzeit ist als Zeitraum definiert, der zwischen dem Erstkontakt des Fußgängers mit dem Fahrzeug und dem Erstkontakt des Kopfes auf der Fahrzeugfront liegt.

Die Versuchsrandbedingungen für die dynamischen Kopfanprallversuche sind möglichst realitätsnah zu wählen. Daher werden die Kopfanprallgeschwindigkeit, der Kopfanprallwinkel sowie der Anprallbereich direkt aus den Ganzkörpersimulationen ermittelt.

Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben wurde, kann der durch die Aufstellung der Motorhaube bereitgestellte Deformationsfreiraum durch die Belastung durch

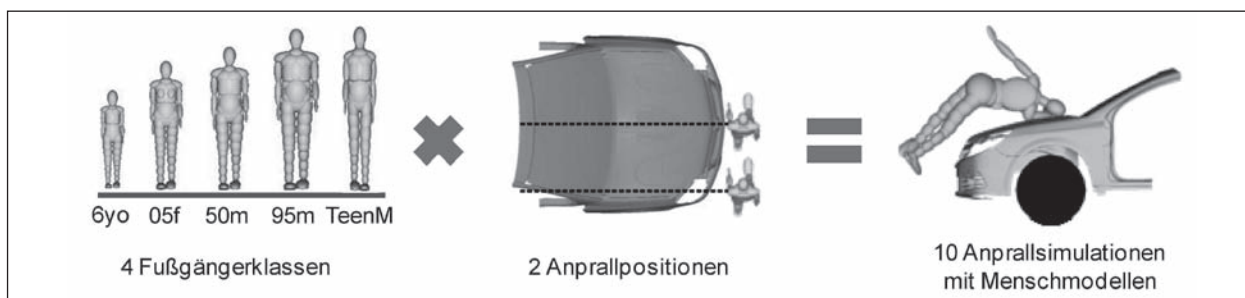


Bild 81: Vom Hersteller durchzuführende Simulationsmatrix mit Menschmodellen

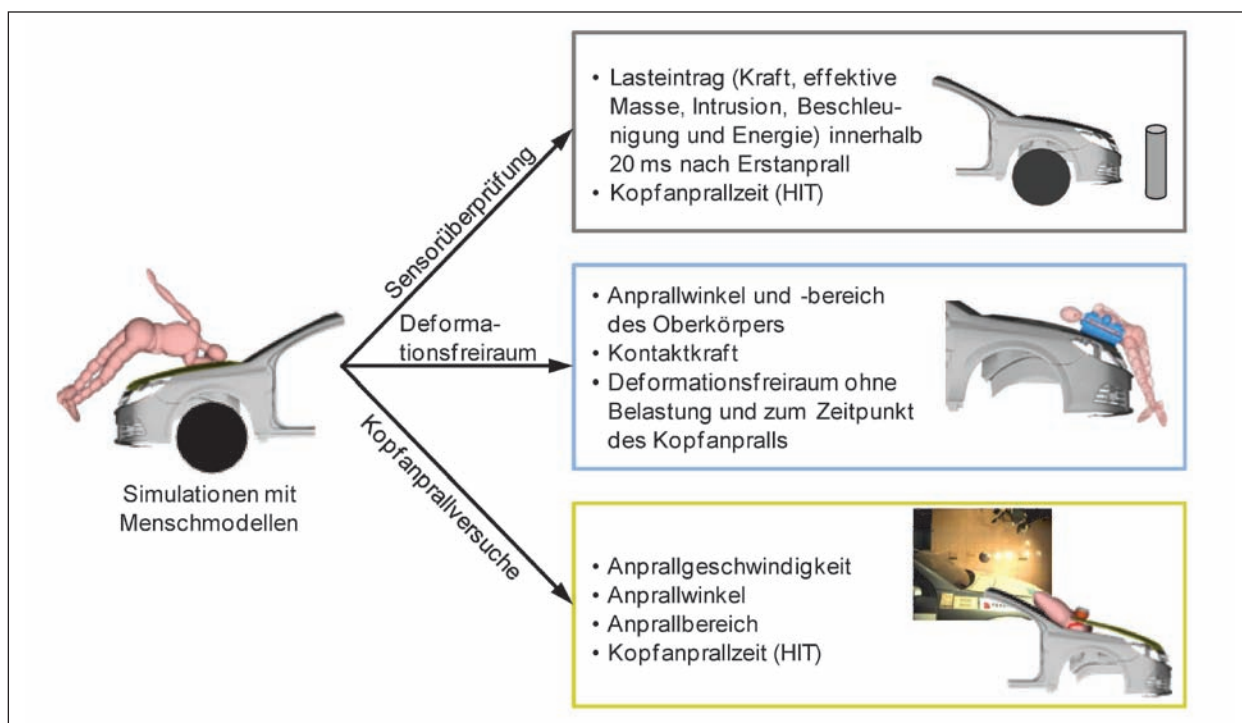


Bild 82: Auswertung der Simulationen mit Menschmodellen zur Definition der Versuchsrandbedingungen

den Oberkörper reduziert werden. Zur Bewertung dieses Phänomens kann bspw. das in Kapitel 3.2.4 beschriebene Ersatzprüfverfahren mit einem Hüftimpaktor eingesetzt werden. Die hierfür notwendigen Versuchsrandbedingungen, wie der Anprallwinkel und Anprallbereich des Oberkörpers sowie die resultierende Kontaktkraft, können durch die Simulationen bestimmt werden.

Neben der Definition der Versuchsrandbedingungen basierend auf der Berücksichtigung einer möglichst realen Unfallkinematik werden die in diesem Kapitel beschriebenen Simulationen mit Menschmodellen auch verwendet, um einen geeigneten Lower-Limit-Impaktor auszuwählen. Wie in Kapitel 3.1.8 beschrieben, muss hierfür die Fußgängerklasse bestimmt werden, die während des Erstanpralls im Bereich der unteren Extremitäten den geringsten Lasteintrag in die Fahrzeugfront einleitet.

Der Lasteintrag hängt hierbei nicht nur von der Fußgängerklasse, sondern auch von der gewählten Schrittstellung des Fußgängers ab. Nach BIECK (2010) resultiert der geringste Lasteintrag aus dem Einbein-Anprall. Dies bedeutet, dass während der für die Fußgängererkennung relevanten Zeitspanne von üblicherweise 20 ms nur das dem Fahrzeug zugewandte Bein die Fahrzeugfront berührt und kein zusätzlicher Kontakt zwischen dem Fahrzeug zugewandten und dem Fahrzeug abgewandten Bein existiert.

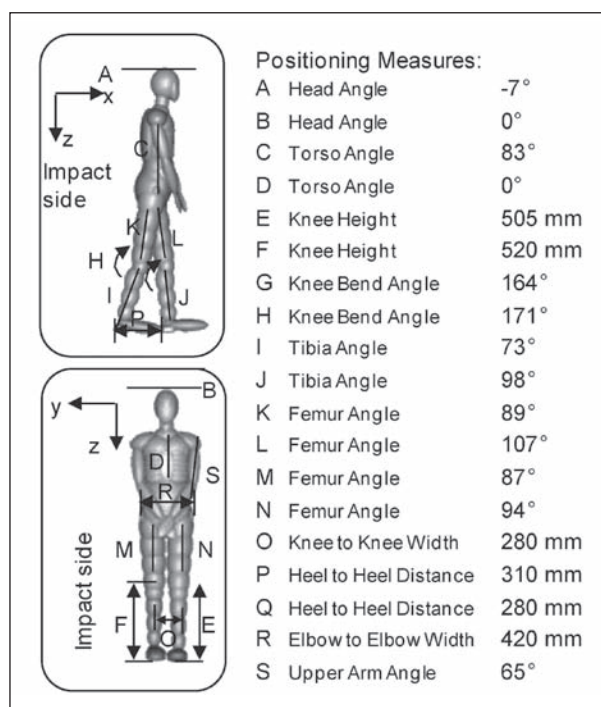


Bild 83: Schrittstellung gemäß SAE (2007)

In der vorliegenden Untersuchung wird die in SAE (2007) definierte Schrittstellung des Polar-II-Dummys verwendet (Bild 83).

Diese Schrittstellung mündet innerhalb der ersten 20 ms nicht ausschließlich in einen Ein-Bein-Anprall (Bild 54). Um innerhalb der ersten 20 ms einen

Kontakt des dem Fahrzeug zugewandten Beins mit dem Fahrzeug abgewandten Bein zu vermeiden, müssen die Beine im Bereich der Oberschenkelinnenseite bei einer Anprallgeschwindigkeit von 20 km/h und einer nicht deformierbaren Fahrzeugfront mehr als 11 cm voneinander entfernt sein (siehe Gl. 10). Dies entspricht vor allem bei kleineren Fußgängern in einer gewöhnlichen Schrittstellung nicht der Realität.

$$S = v \cdot t = 20 \text{ km/h} \cdot 20 \text{ ms} = 11 \text{ cm} \quad \text{Gl. 10}$$

Wesentlicher Vorteil dieser Schrittstellung ist die exakte Definition sämtlicher möglicher Abmessungen, die für einen objektiven Vergleich von Berechnungen verschiedener Hersteller notwendig sind. Eine Festlegung der Anprallrichtung in Verbindung mit einer grob definierten Schrittstellung (Erstkontakt des Fahrzeugs gegen das hintere Bein) sowie einer Vorgabe der H-Punkt-Höhe, wie sie im aktuellen Euro-NCAP-Protokoll angegeben ist (Euro NCAP, 2011), ist hierfür unzureichend. Da der Abstand zwischen den beiden Oberschenkelinnenseiten, der für eine kontrollierten Berücksichtigung eines Ein- bzw. Zwei-Bein-Anpralls relevant ist, nicht angegeben ist, kann hierbei keine Aussage über diese Randbedingung getroffen werden.

Die innerhalb von APROSYS angegebene Schrittstellung (BOVENKERK, 2008c) bezieht sich rein auf die Menschmodelle von MADYMO und gibt hierbei die entsprechenden Einstellungen ohne allgemeine Winkel bzw. Längen an. Da mittlerweile vor allem FE-Menschmodelle, wie bspw. das THUMS-Modell, zum Einsatz kommen, ist eine generalisierte Längenangabe notwendig.

Die allgemeinen Angaben der Körpergröße und des Körpergewichts der verschiedenen Fußgängerklassen sollten den in Tabelle 4 (Kapitel 3.1.7) angegebenen Größen entsprechen. Für den Haftreibungswert zwischen Fußgänger und Boden sollte gemäß Euro NCAP (2011) ein Wert von 0,3 in der Berechnung hinterlegt sein.

4.4 Nachweis der korrekten Funktionsweise kontaktbasierter Fußgängererkennung

Crash-aktive Fußgängerschutzsysteme charakterisieren den Unfallgegner bei einem Unfall und aktivieren im Falle einer Kollision mit einem Fußgänger entsprechende Schutzsysteme. Für eine Bewertung dieser Systeme muss daher gewährleistet

werden, dass die innerhalb der Schutzsysteme eingesetzte kontaktbasierte Erkennungssensorik den Fußgänger zuverlässig detektiert und das Schutzsystem vor Kopfaufprall vollständig aufgestellt bzw. entfaltet ist. In den folgenden Kapiteln wird ein entsprechendes Vorgehen zur Bewertung dieser Systeme beschrieben.

4.4.1 Integration der Ergebnisse aus den Ganzkörpersimulationen

Basierend auf den Ergebnissen der in Kapitel 4.3 beschriebenen Ganzkörpersimulationen werden die Versuchsrandbedingungen für die Sensorüberprüfung festgelegt. Die entsprechenden Hintergründe werden im Folgenden näher diskutiert.

Durch einen Vergleich der Lasteinträge der verschiedenen Fußgängerklassen in die Fahrzeugfront kann der Fußgänger mit dem geringsten Lasteintrag bestimmt werden. Dieser Lastfall stellt wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben ein Worst-Case-Szenario für kontaktbasierte Sensorsysteme zur Fußgängererkennung dar. Der Lasteintrag wird hierbei durch die Kontaktkraft, die effektive Masse, die Intrusion, die Beschleunigung sowie die Energie charakterisiert.

Bei der folgenden Auswahl eines passenden Prüfkörpers ist der Lasteintrag dieser Fußgängerklasse heranzuziehen. Der Hersteller muss nachweisen, dass der gewählte Prüfkörper mit dieser Fußgängerklasse vergleichbare Lasteinträge in die Fahrzeugfront generiert. Wie innerhalb der im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes durchgeführten Untersuchungen der Lasteinträge der verschiedenen Fußgängerklassen bei einem Anprall gegen die verschiedenen Fahrzeugkategorien gezeigt wurde (vgl. Kapitel 3.1.9), stimmen derzeit die Lasteinträge des IEE-Impaktors nur bei Fahrzeugen der Kategorien B und C mit den Lasteinträgen dieser Fußgängerklasse überein. Eventuell weisen zukünftig die derzeit in Entwicklung befindlichen Impaktoren (IEE-G2-Impaktor und PDI-2) geeignetere Eigenschaften auf.

4.4.2 Überprüfung der Auslösung bei geringen Lasteinträgen

Geringe Lasteinträge stellen wie bereits beschrieben (vgl. Kapitel 2.2.1) enorme Anforderungen an die kontaktbasierte Erkennungssensorik crash-aktiver Fußgängerschutzsysteme. Zur Überprüfung dieses Lastfalls werden mindestens zwei An-

prallversuche mit dem vorher ausgewählten Lower-Limit-Impaktor durchgeführt.

Die Anprallversuche werden im Bereich des Stoßfängers durchgeführt. Da der – innerhalb der GTR (2009) – definierte Bereich der „Bumper Test Area“ durch Designmaßnahmen verkleinert werden kann, orientiert sich das hier vorgestellte Prüfverfahren an Euro NCAP, wonach maximal auf der gesamten Breite des Querträgers getestet werden kann (Euro NCAP, 2012). Ein Anprallversuch wird, wie in Bild 84 dargestellt, im Bereich der Fahrzeugmittelebene durchgeführt. Ein weiterer Versuch erfolgt im äußeren Bereich der „Bumper Test Area“. Falls die innerhalb des Fahrzeugs integrierten Erkennungssensoren lokal verteilt sind, kann ein dritter Anprallversuch für eine Anprallposition in der „Bumper Test Area“ mit möglichst großer Entfernung zu den Sensoren erforderlich sein.

Bei den Anprallversuchen soll eine möglichst reale Unfallsituation abgebildet werden, daher fährt das zu bewertende Fahrzeug mit der unteren Auslösegeschwindigkeit („Lower Threshold“ – LT) gegen den Prüfkörper (Bild 85). Die untere Auslösegeschwindigkeit beträgt bei den meisten Fahrzeugen zwischen 20 und 25 km/h.

Von den Anprallversuchen sind Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera anzufertigen, um den dynamischen Aufstellvorgang der Haube sowie die Gesamtauslösezeit („Total Response Time“ – TRT), bestehend aus Sensierzeit und Aufstellzeit, zu analysieren. Das Fahrzeug besteht diese Anforderung, falls das Schutzsystem beim Anprall gegen den Prüfkörper ausgelöst wird.

4.4.3 Überprüfung der Auslösung bei hohen Lasteinträgen

Um zu überprüfen, ob die Sensorik auch Fußgänger mit hohen Lasteinträgen detektiert, wird zusätzlich ein Anprallversuch mit dem in der Gesetzgebung verankerten Beinprüfkörper (derzeit EEVC WG 17) im Bereich der Fahrzeuglängsmittlebene durchgeführt. Der Versuchsablauf ähnelt dem im vorherigen Kapitel beschriebenen Verfahren, wobei hier eine Fahrzeuggeschwindigkeit von 40 km/h gewählt wird (Bild 86). Das Fahrzeug besteht diese Anforderung, falls das Schutzsystem beim Anprall gegen den Prüfkörper ausgelöst wird.

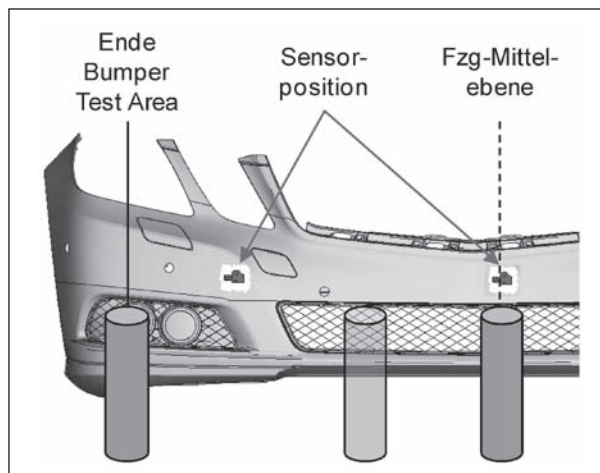


Bild 84: Definition der Anprallpunkte zur Sensorüberprüfung

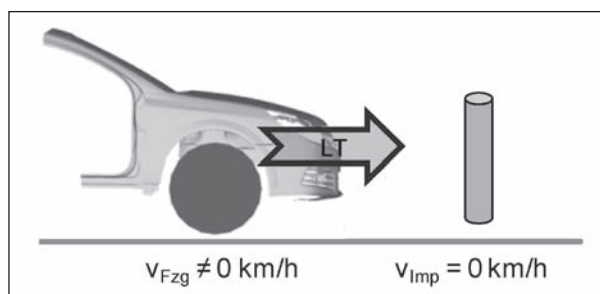


Bild 85: Versuchsrandbedingungen für die Anprallversuche zur Sensorüberprüfung bei geringen Lasteinträgen

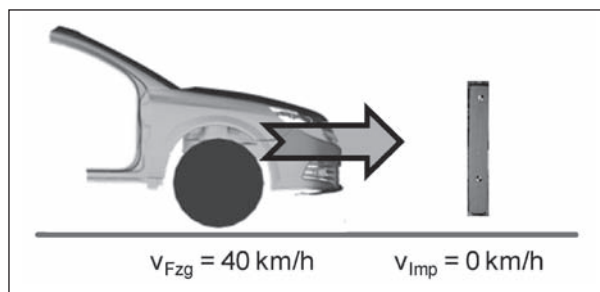


Bild 86: Versuchsrandbedingungen für die Anprallversuche zur Sensorüberprüfung bei hohen Lasteinträgen

4.4.4 Überprüfung der Aufsteldynamik

Neben den Lasteinträgen wird in den Simulationen (vgl. Kapitel 4.3) auch die Kopfanprallzeit für die in der Simulation berücksichtigten Fußgängerklassen ermittelt. Das crash-aktive Schutzsystem besitzt eine ausreichend schnelle Aufstellung, falls die Gesamtauslösezeit (vgl. Kapitel 4.4.2) kürzer als die kleinste Kopfanprallzeit ist. Üblicherweise ist die Kopfanprallzeit für das 6-jährige Kind aufgrund der geringen Körpergröße am geringsten.

Zusätzlich muss eine Zeitreserve für einen möglichen späteren Kopfanprall, z. B. aufgrund geringe-

rer Fahrzeuggeschwindigkeiten erfüllt sein, um in jedem Fall eine volle Systemaktivierung bei Kopfanprall zu gewährleisten. Diese Zeitreserve kann mithilfe des in Gl. 11 angegebenen Zusammenhangs bestimmt werden. Hierbei wird ein zeitlicher Sicherheitsfaktor von 20 ms berücksichtigt.

$$t_{\text{Standzeit, min}} = (t_{\text{HIT, max}} - t_{\text{HIT, min}}) + 20 \text{ ms} \quad \text{Gl. 11}$$

4.4.5 Zusammenfassung der Sensorüberprüfung

Eine zusammenfassende Darstellung der verschiedenen Anforderungen innerhalb der Teilprüfung zur Bewertung der korrekten Funktionsweise der Erkennungssensorik ist in Bild 88 angegeben. Falls das System bei geringen und hohen Lasteinträgen nicht auslöst, wird das Kopfverletzungsrisiko mithilfe von statischen Anprallversuchen bei geschlos-

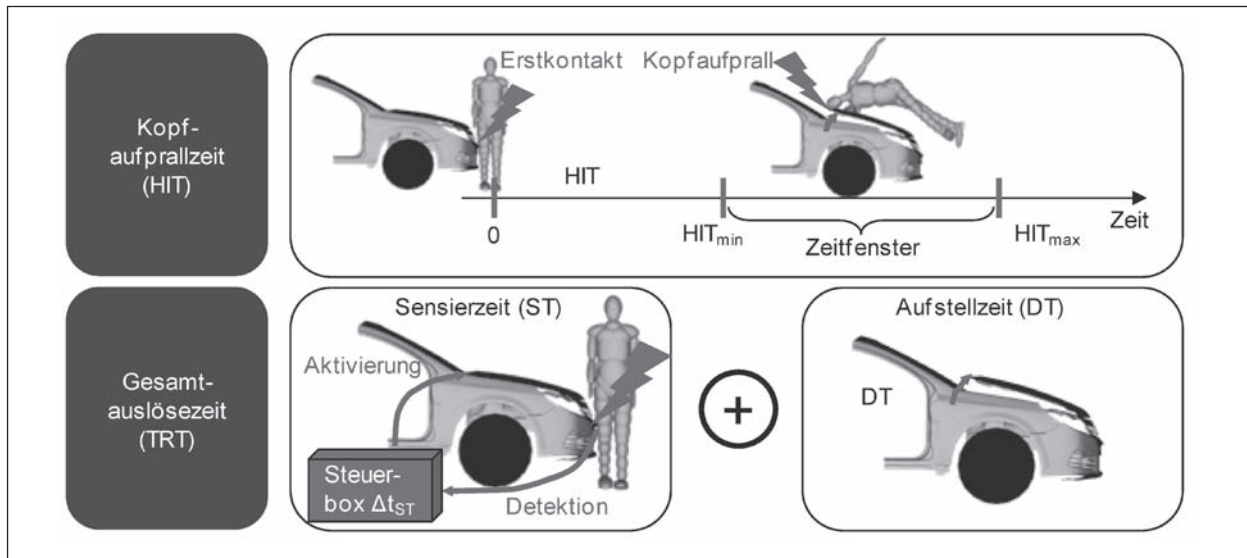


Bild 87: Funktionsbedingung für crash-aktive Systeme (ECE, 2005)

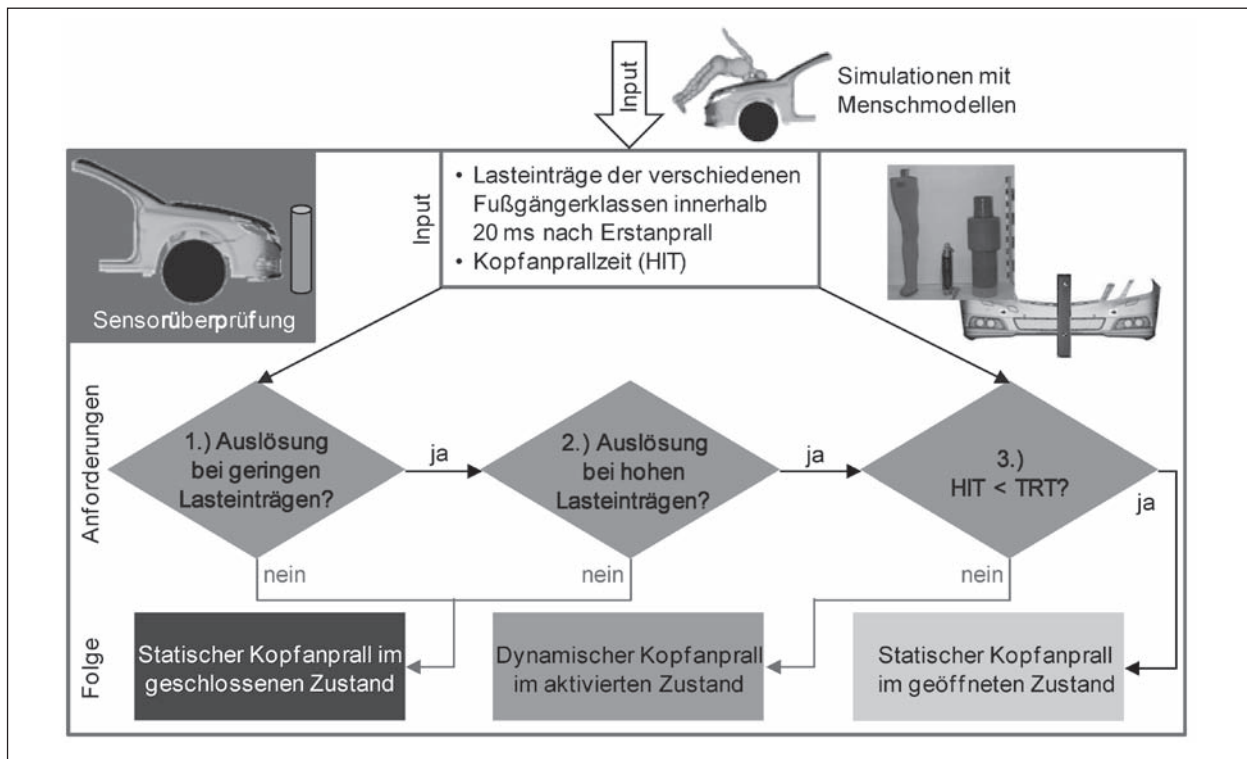


Bild 88: Teilprüfung zur Bewertung der korrekten Funktionsweise der Erkennungssensorik

senen, inaktiven Schutzsystemen bewertet. Löst das System bei geringen und hohen Lasteinträgen aus, erfüllt die zeitlichen Anforderungen jedoch nicht, wird das Kopfverletzungsrisiko mithilfe von dynamischen Kopfanprallversuchen bewertet, bei denen das crash-aktive System infolge einer Triggerrung kurz vor Anprall des Kopfimpaktors ausgelöst wird. Wird auch die zeitliche Anforderung erfüllt, wird das Kopfverletzungsrisiko mithilfe von statischen Anprallversuchen bei bereits vollständig aufgestellten Schutzsystemen bewertet.

4.5 Bewertung des Deformationsfrei-raums

Wie innerhalb des Kapitels 3.2.1 beschrieben wurde, kann der Oberkörper des Fußgängers den im Bereich des Kopfanpralls befindlichen Deformationsfrei-raum reduzieren und hiermit das Kopfverletzungsrisiko erhöhen. Zur Berücksichtigung dieses Effekts wird ein Teilprüfverfahren eingeführt, das im Folgenden näher beschrieben wird.

In einer realen Fahrzeug-Fußgänger-Kollision erfolgt der Erstanprall normalerweise im Bereich der unteren Extremitäten des Fußgängers. Aufgrund des Anpralls unterhalb des Schwerpunkts folgt anschließend eine Rotation des Fußgängers um die Fahr-

zeugfront. Vor dem Kopfanprall kommt es hierbei meist zu einem Anprall der Schulter. Durch diese Belastung kann die Haube im Bereich des Schulteranpralls deformiert werden, wodurch auch der Deformationsfrei-raum im Kopfanprallbereich verringert werden kann. Diese Deformation wird bei einem Anprallversuch mit einem Kopfimpaktor vernachlässigt.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde dieser Effekt mithilfe von numerischen Simulationen analysiert. Hierbei wurde ohne Berücksichtigung der Deformation auf dem vorgegebenen FE-Modell einer Fahrzeugfront ein HIC-Wert von 896 ermittelt. Mit Berücksichtigung der Deformation ergab die Berechnung des HIC-Werts mit 1.290 ein deutlich höheres Verletzungsrisiko, wobei hier die vorgegebenen Grenzwerte überschritten wurden.

Zur Berücksichtigung dieses Effekts kann, wie bereits beschrieben, ein Hüftimpaktor verwendet werden, der in den meisten Prüflaboren bereits verfügbar ist. Das hier vorgeschlagene Prüfverfahren zieht für die Bewertung, wie in Bild 89 dargestellt, sowohl virtuelle als auch experimentelle Anprallversuche heran. Mithilfe der virtuellen Untersuchungen soll der Anprallbereich möglichst ganzheitlich und kostengünstig analysiert werden, während die experimentellen Versuche zur Validierung der Simulation verwendet werden.

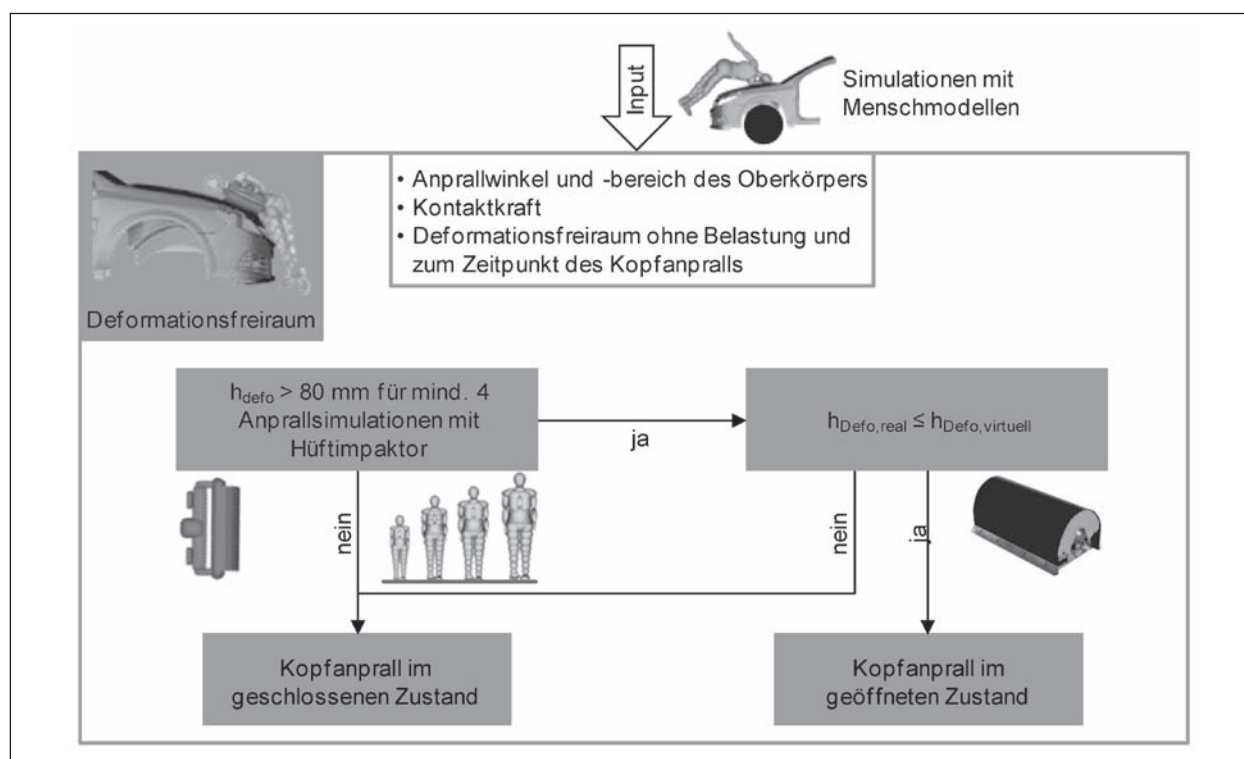


Bild 89: Teilprüfung zur Bewertung des Deformationsfrei-raums

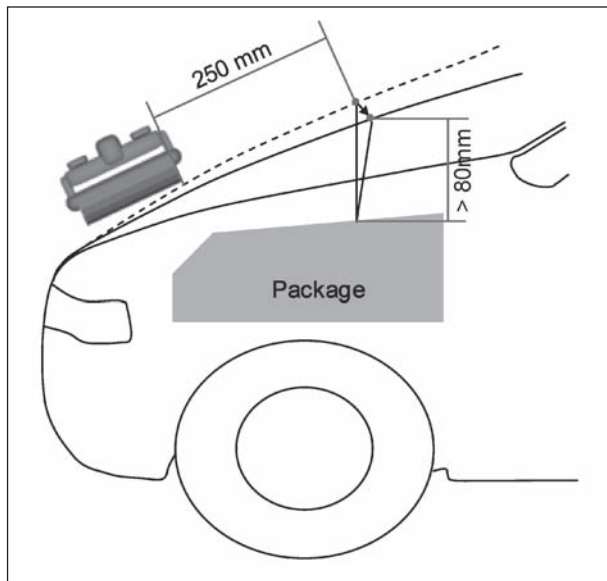


Bild 90: Kriterium zur Bewertung des Deformationsfreiheitsraums

Die für die Untersuchung mit den Hüftimpaktoren zu definierenden Parameter sind neben Anprallwinkel und -geschwindigkeit auch die Impaktormasse. Der Anprallwinkel sollte mit dem Anprallwinkel des Fußgängeroberkörpers aus den Ganzkörpersimulationen aus Kapitel 4.3 übereinstimmen. Die Anprallgeschwindigkeit, die zwischen 20 und 40 km/h variieren kann, und die Masse ($10 \text{ kg} \leq m \leq 17 \text{ kg}$) werden anhand eines Vergleichs der Kontaktkraft und Intrusionen der Impaktor- und der Ganzkörpersimulationen definiert.

Der Deformationsfreiheitsraum wird in einem Abstand von 250 mm (vgl. Kapitel 3.2.4) oberhalb des oberen Endes des Hüftimpaktors in xz-Ebene bestimmt, wie in Bild 90 dargestellt, und darf zum Zeitpunkt des Kopfanpralls (ca. 20 ms nach Schulteranprall) einen Grenzwert von 50 mm (vgl. Kapitel 3.2.4) nicht unterschreiten.

Anschließend wird der Deformationsfreiheitsraum an zwei beliebig auszuwählenden Positionen mithilfe experimenteller Untersuchungen überprüft. Der Deformationsfreiheitsraum wird mithilfe von Seilpotentiometern bestimmt, wobei die Versuchsrandbedingungen mit denen der virtuellen Bewertung übereinstimmen sollten. Werden die Anforderungen erfüllt, so wird das System im anschließend beschriebenen Kopfanprallbewertungsverfahren mithilfe eines Kopfanprallversuchs im geöffneten Zustand überprüft. Falls die Anforderungen nicht erfüllt werden, kommen statische Kopfanprallversuche im geschlossenen Zustand zum Einsatz.

4.6 Bewertung des Kopfverletzungsrisikos

Crash-aktive Fußgängerschutzsysteme stellen im Gegensatz zu rein passiven Systemen nur eine in-stationäre Lösung dar. Durch die bei crash-aktiven Systemen verbundene Dynamik können auch Anprallbereiche geschützt werden, die bei rein passiven Systemen aufgrund von Konflikten mit anderen Sicherheitsanforderungen, wie bspw. der Minimierung der Sichtverdeckung für die A-Säule (vgl. § 35b StVZO), nicht bzw. kaum realisierbar sind.

Damit das zusätzliche Schutzpotenzial bei diesen crash-aktiven Systemen gewährleistet werden kann, sind strenge zeitliche Anforderungen einzuhalten. Beispielsweise muss bereits innerhalb von 60 bis 100 ms nach Anprall der Fußgänger erkannt, das Schutzsystem aktiviert und vollständig aufgestellt sein. Aufgrund der hiermit verbundenen Dynamik sind statische Anprallversuche, wie sie bisher bei den meisten Testverfahren zum Fußgängerschutz integriert sind, nur sinnvoll, wenn die zeitlichen Anforderungen eingehalten werden. Ein mögliches objektives Prüfverfahren zur Bewertung des Kopfverletzungsrisikos für diese crash-aktiven Systeme wird in den folgenden Kapiteln beschrieben.

4.6.1 Bestimmung der Versuchsrandbedingungen

Sowohl Kopfanprallgeschwindigkeit, -winkel als auch -bereich hängen, wie in Kapitel 4.2 gezeigt, von der Fahrzeugform ab. Um die reale Unfallkinematik möglichst realitätsnah zu berücksichtigen, werden diese Versuchsrandbedingungen anhand der durchgeführten Anprallsimulationen mit Menschmodellen definiert.

Die Anprallgeschwindigkeit für den Kopfprüfkörper wird anhand der Anprallsimulationen ermittelt, wobei die relative Anprallgeschwindigkeit des Kopfes kurz vor Anprall gegen die Fahrzeugfront herangezogen wird. Für jede Fußgängerklasse wird die Maximalgeschwindigkeit aus den beiden Anprallpositionen (siehe Bild 81) gewählt. Zwischen den Fußgängerklassen wird die Anprallgeschwindigkeit interpoliert.

Der Kopfanprallwinkel wird ebenfalls mithilfe der Simulationen bestimmt. Im Gegensatz zur Anprallgeschwindigkeit wird hierbei jedoch nicht der Maximalwert für jede Fußgängerklasse ermittelt. Stattdessen wird ein so genanntes Worst-Case-Szena-

rio herangezogen. Für die meisten Fälle des Anpralls mit einem Kopfpimpaktor gilt, dass von einem rechtwinkligen Anprall gegen die Fahrzeugfront aufgrund der geringen Rotation und der relativ großen Eindringtiefe das höchste Verletzungsrisiko ausgeht. Daher wird der zu wählende Anprallwinkel mithilfe eines so genannten Relativwinkels, der als Winkel zwischen Kopfanprallrichtung und Fahrzeugfront im Anprallbereich definiert wird, festgelegt. Für die jeweilige Fußgängerklasse wird der Relativwinkel gewählt, der am geringsten von 90° abweicht. Zwischen den Fußgängerklassen wird ebenfalls interpoliert.

Auch der Kopfanprallbereich wird mithilfe der Simulation bestimmt. Hierbei wird der Kopfanprallpunkt für die jeweilige Fußgängerklasse anhand der entsprechenden Abwickellänge („Wrap Around Distance“ – WAD) bezeichnet. Der Kopfanprallbereich wird anhand der seitlichen Referenzlinien sowie der beiden Abwickellängen für das 6-jährige Kind (als untere Grenze) und den 95%-Mann (als obere Grenze) begrenzt.

Die innerhalb dieses Kapitels bestimmten Randbedingungen für die Kopfanprallversuche werden zusammenfassend kombiniert und anhand eines Diagramms dargestellt (Bild 91).

4.6.2 Auswahl der Anprallpunkte für die Kopfpimpaktorversuche

Der Bereich, in dem der Kopf eines Fußgängers bei einer Kollision mit einem Fahrzeug auf die Fahrzeugfront trifft, hängt, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, von der Unfallkinematik sowie der Geometrie der Fahrzeugfront ab. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, ist eine variable Einteilung des Anprallbereichs sinnvoll.

Der Anprallbereich des im Rahmen der vorliegenden Untersuchung entwickelten Testverfahrens wird in Anlehnung an die GTR durch vier Linien begrenzt. Seitlich erfolgt die Begrenzung durch sog. seitliche Referenzlinien (siehe Tabelle 5), wie in

BOVENKERK (2009c) detailliert beschrieben. Die untere Grenze wird nach den Definitionen der GTR mit einer WAD von 1.000 mm definiert. Die obere Grenze wird durch die Kopfaufprallpunkte des 95%-Mannes bestimmt, wobei die WAD-Maße auf Basis derzeit in Testverfahren verwendeter Abwickellängen sinnvoll in 100-mm-Schritten auf- bzw. abgerundet werden.

Zusätzlich wird die Grenze des Anprallbereichs für den Kinder- und Erwachsenenkopfpimpaktor basierend auf den Simulationen mit Menschmodellen

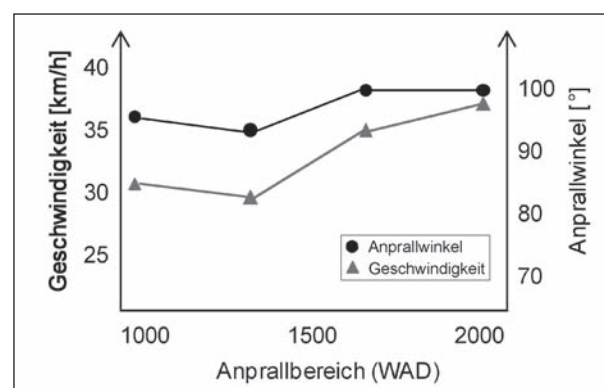


Bild 91: Diagramm zur Veranschaulichung der Versuchsrandbedingungen

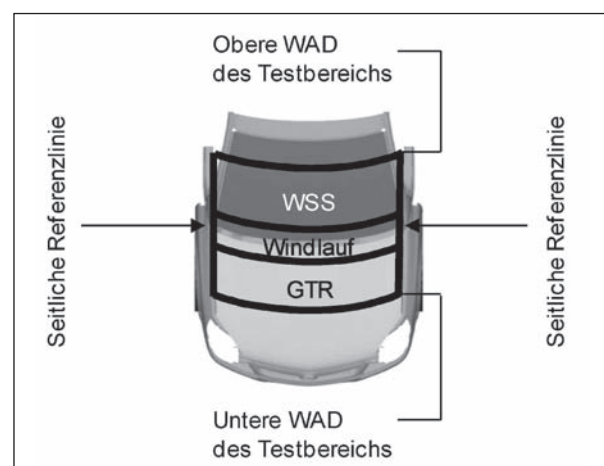


Bild 92: Unterteilung der gesamten Testbereiche zum Kopfaufprall nach BOVENKERK (2009c)

Impaktor	Abwickellänge, WAD [mm]							
	A (Sedan)		B (SUV)		C (OneBox)		D (Sportwagen)	
	von	bis	von	bis	von	bis	bis	bis
CH	1.000*	1.700	1.000*	1.500	1.000*	1.600	1.000*	1.900
AH	1.700	2.300	1.500	2.100	1.600	2.100	1.900	2.400

Tab. 5: Definition von Testbereichen und Relevanz innerhalb der Kategorien nach BOVENKERK (2009c)

festgelegt. Die Abgrenzung vom Kinder- (CH) zum Erwachsenentestbereich (AH) erfolgt zwischen der höchsten Abwickellänge für die 5%-Frau und der geringsten für den 50%-Mann. Überschneidungen sind dabei in einigen Konstellationen vorzufinden.

Die Testbereiche unterscheiden sich innerhalb der Kategorien (Tabelle 5). Bei Kategorie A kann die Trennlinie in Anlehnung an die GTR auf 1.700 mm festgelegt werden. Bei Kategorie B und C liegt die obere Grenze von 2.100 mm am weitesten vorn. Bei Kategorie D liegen Trennlinie mit 1.900 mm und obere Grenze mit 2.400 mm weit hinten.

Eine Auswahl von Testpunkten wird sowohl für virtuelle als auch für reale Impaktortests vorgenommen. In den virtuellen Tests kann zunächst eine hohe Anzahl von Anprallpunkten untersucht werden, um die Testpunkte realer Komponententests zu bestimmen und gleichzeitig deren Anzahl zu reduzieren (PUPPINI, 2008). Die kritischen Anprallstellen werden mit Unterstützung der Ergebnisse aus den virtuellen Tests identifiziert. Vorhandene Symmetrien am Fahrzeug können in beiden Tests genutzt werden.

In der Simulation erfolgen die virtuellen Tests in einem regelmäßigen Rasterfeld, einem so genannten „Grid“ (vgl. Bild 11-8 in BOVENKERK, 2009c), mit ggf. ergänzenden Tests der zusätzlichen kritischen Stellen an der Fahrzeugstruktur im relevanten Testbereich nach Bild 93. Die Auswahl der Grid-Punkte erfolgt basierend auf dem Vorschlag von Euro NCAP (siehe Euro NCAP, 2012). Auf diese

Weise werden die dynamischen Eigenschaften der gesamten Fahrzeugfront beim Impaktoraufprall ermittelt. Alle ausgewählten Anprallpunkte werden am validierten FE-Modell durch die numerische Impaktorsimulation getestet.

Nach den umfangreichen numerischen Simulationen werden zusätzlich einige reale Anprallversuche mit Kopfinduktoren durchgeführt. Hierbei werden die Positionen mit dem geringsten und dem höchsten HIC-Wert überprüft.

4.6.3 Durchführung der Anprallversuche

Alle Testpunkte aus dem Rasterfeld nach Bild 11-8 in BOVENKERK (2009c) werden am 3D-FE-Modell in virtuellen Komponententests hinsichtlich der HIC-Werte bei linearem Aufprall mit der vorher definierten Geschwindigkeit untersucht (vgl. Kapitel 4.3). Die unterschiedlichen Randbedingungen hinsichtlich der Abwickellängen und Aufprallwinkel innerhalb der Fahrzeugkategorien und Aufprallzonen werden dabei angewandt.

Die so bestimmten kritischen Punkte mit hohen HIC-Werten werden anschließend in realen Komponententests überprüft. Bei einem crash-aktiven System werden dabei je nach Erfüllung der in Kapitel 4.4.5 und 4.5 beschriebenen Anforderungen mithilfe statischer oder dynamischer Anprallversuche bewertet. Zur Validierung der Simulationen wird zudem auch ein Punkt mit geringem HIC-Wert getestet.



Bild 93: Testpunktauswahl für virtuelle Tests nach BOVENKERK (2009c)

4.6.4 Bewertung zusätzlicher Verletzungsrisiken

Wie im Rahmen mehrerer Studien (bspw. BOVENKERK, 2009c oder BOVENKERK, 2008c) bereits belegt wurde, können aufstellende Motorhauben ein zusätzliches Verletzungsrisiko erzeugen (siehe Kapitel 2.1.5). Die Berücksichtigung dieses Verletzungsrisikos im Rahmen eines Bewertungsverfahrens wird im Folgenden beschrieben.

Während des Anprallvorgangs des Fußgängers gegen die Fahrzeugfront im Falle einer Kollision mit einem Fahrzeug findet, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, eine Rotation des Oberkörpers um die Fahrzeugfront statt. Daher kommt es in den meisten Fällen vor dem Kopfanprall zu einem Kontakt der Schulter mit der Fahrzeugfront. Hierauf folgt eine Rotation des Kopfes, die bei bestimmten Fußgängergrößen in Kombination mit aufstellenden Motorhauben einen Kontakt mit der Haubenhinterkante zur Folge haben kann.

Bei einem derartigen Kontakt sind sowohl die Größe der Kontaktfläche als auch die Höhe der

Kraft hinsichtlich der zu erwartenden Verletzungen entscheidend. Die Messung der Beschleunigung im Kopfschwerpunkt führt nicht zu direkten Rückschlüssen auf die Krafteinleitungsfläche. Diese Druckbelastung kann bei Durchmessern der Kontaktfläche von unterhalb ca. 40 mm Eindringungsbrüche hervorrufen (vgl. APROSYS SP3, WALLENTOWITZ, 2008).

Die Halsbelastungen und die kraftbasierten Bruchmechanismen können durch den linearen Impaktortest mit Beschleunigungssensor im Schwerpunkt nicht abgebildet werden. Ein Kopfpendel-Impaktor zur Bestimmung der Halsrotation, der zusätzlich mit einem Kraftaufnehmer ausgerüstet würde, ist als Ergänzung der existierenden linearen Impaktoren für den Kontakt an freien Kanten, insbesondere im Bereich des Öffnungsspalts von aufstellenden Hauben, sinnvoll.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird die Verwendung des in BOVENKERK (2008b) vorgeschlagenen Pendelimpaktors empfohlen. Die Versuchsrandbedingungen sind ebenfalls aus den

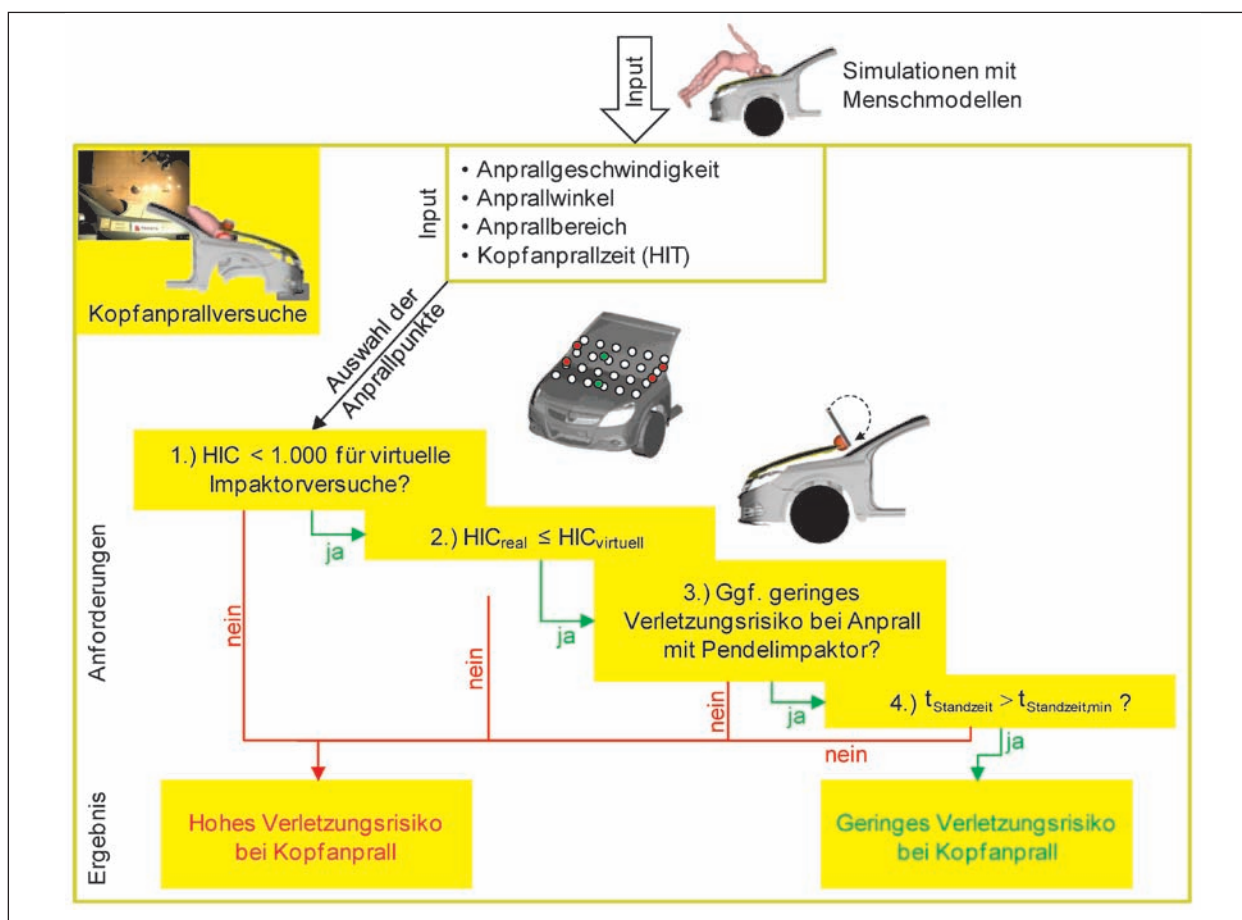


Bild 94: Teilprüfung zur Bewertung des Kopfverletzungsrisikos

Berechnungen mit den Menschmodellen abzuleiten und auf die Fußgängergröße zu begrenzen, deren Kopfanprallbereich sich im Windlauf befindet.

Eine zusammenfassende Darstellung der verschiedenen Anforderungen innerhalb der Teilprüfung zur Bewertung des Kopfverletzungsrisikos ist in Bild 94 angegeben.

4.7 Ablaufplan des Testverfahrens

Eine ganzheitliche Übersicht des im Rahmen des vorliegenden Projektes erarbeiteten Prüfverfahrens zur Bewertung crash-aktiver Fußgängerschutzsysteme ist in Bild 95 dargestellt. Basierend auf Anprallsimulationen mit Menschmodellen gliedert sich das Testverfahren in drei Untergruppen.

Innerhalb der ersten Untergruppe wird die Funktionsweise der kontaktbasierten Erkennungssensorik mithilfe entsprechender Prüfkörper bewertet. Entsprechend dem hierbei ermittelten Ergebnis werden die in der zweiten Untergruppe durchgeführten Kopfanprallversuche im aktivierten oder im

nicht aktivierten Zustand der crash-aktiven Schutzmaßnahme durchgeführt. Einen Großteil der Bewertungsgrundlage stellen hierbei virtuelle Anprallversuche mit Kopfimpaktoren dar, um einen möglichst großen Bereich des Fahrzeugs objektiv untersuchen zu können. Zusätzlich werden an einigen kritischen Punkten reale Impaktorversuche zur Validierung der Simulation durchgeführt. Ferner wird das Verletzungsrisiko der hinteren Motorhaubenkante mithilfe von Pendelimpaktoren analysiert. Die Bewertung in der dritten Untergruppe gleicht methodisch der zweiten Untergruppe. Auch hier werden zunächst virtuelle Versuche zur Bewertung des Deformationsfreierraums durchgeführt, die anschließend mithilfe von realen Versuchen validiert werden können.

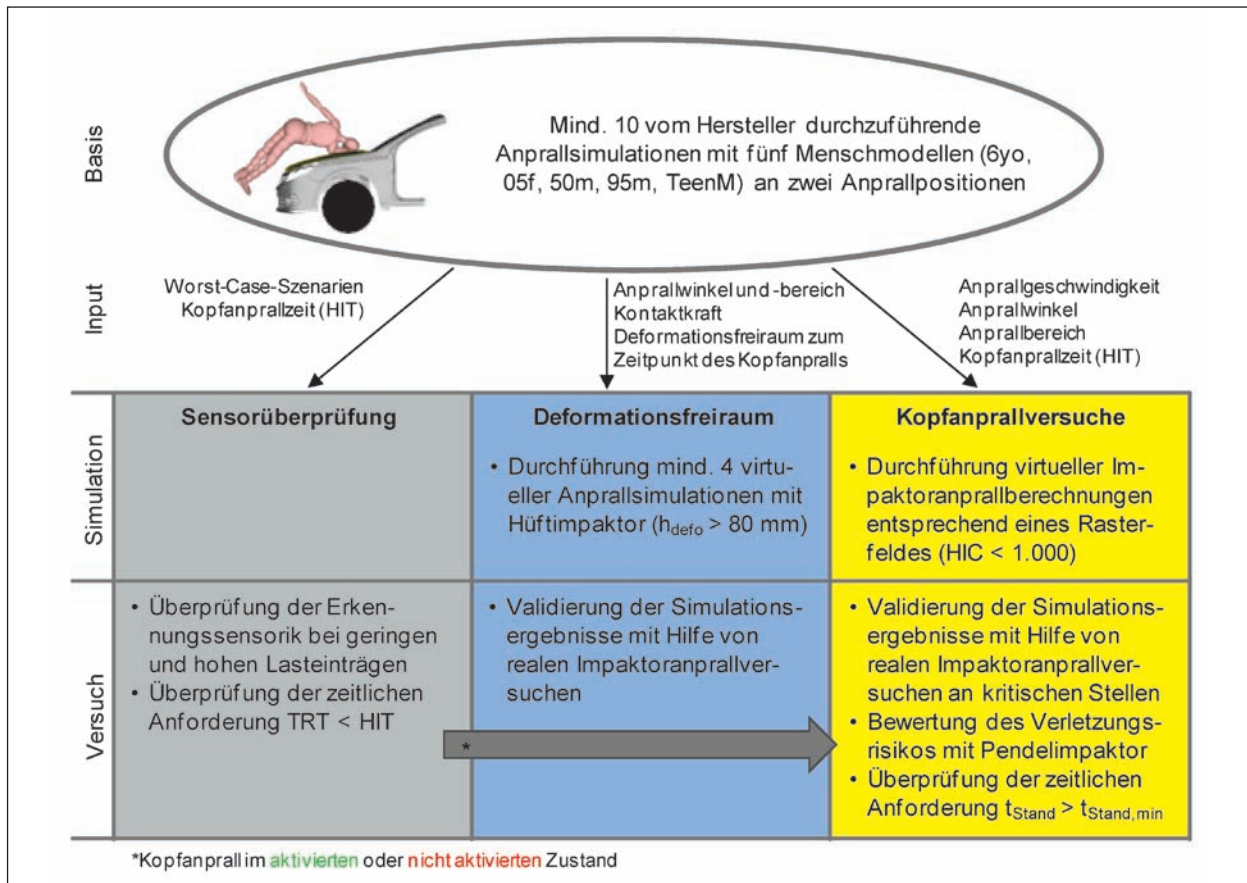


Bild 95: Gesamtablaufplan eines Testverfahrens zur Bewertung crash-aktiver Fußgängerschutzsysteme

5 Ergebnisse einer Expertenbefragung

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung wurden am 16. September 2011 in Aachen einer Expertenrunde des Verbands der Automobilindustrie (VDA) sowie Vertretern der Hersteller der verschiedenen Lower-Limit-Impaktoren vorgestellt. Im Fokus dieser Expertenbefragung standen die Teilprüfungen zur Bewertung der kontaktbasierten Erkennungssensorik sowie des Schutzpotenzials crash-aktiver Systeme beim Kopfanprall. Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Befragung und die Anmerkungen der Experten werden im Folgenden zusammengefasst.

5.1 Bewertung Sensorik

Im Rahmen der Expertenbefragung wurden die Untersuchungen zur Bestimmung der innerhalb der Bewertung der korrekten Funktionsweise kontaktbasierter Sensorsysteme zu berücksichtigenden Worst-Case-Szenarien sowie die hieraus abzuleitenden Impaktoren vorgestellt.

5.1.1 Allgemeine Anmerkungen zu den Versuchsergebnissen

Laut VDA weisen die Ergebnisse der Anprallversuche für den PDI- und IEE-Impaktor ungewöhnliche Beschleunigungsverläufe auf, da hier zwei Peaks auftreten. Die Rückschwungbewegung scheint stärker ausgeprägt zu sein als der eigentliche Anprall, was bei der geringen Prüfgeschwindigkeit und der steifen Struktur nicht zu erwarten ist. Dies könnte aus einer fehlerhaften Positionierung des Beschleunigungsaufnehmers an der starren Prüfstellseite hinter dem Schaum resultieren.

Die Positionierung der Beschleunigungsaufnehmer hinter dem Schaum wurde allerdings bewusst so gewählt, um hochfrequente Schwingungen im Gestell zu detektieren. Diese Anordnung wurde auch für das Prüfgestell für die Entwicklung des PDI gewählt.

Laut VDA ist die auftretende Kontaktzeit zwischen Gestell und Impaktor sehr kurz. Der IEE-Impaktor verlässt das Prüfgestell bereits nach 7 ms. Entsprechende Kontaktzeiten betragen laut VDA bei Realfahrzeugen zwischen 30 und 40 ms. Daraus sei zu schließen, dass das Gestell im Vergleich zu einer realen Fahrzeugfront möglicherweise eine zu hohe Steifigkeit aufweist.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung sollte bewusst auch der Unterschied verschiedener Fahrzeugfrontsteifigkeiten analysiert werden. Neben dem 60-g/l-Schaum kam daher auch ein 30-g/l-Schaum zum Einsatz, wobei der 60-g/l-Schaum ausschließlich für die Versuche sowie die Validierung der Simulationsmodelle eingesetzt wurde. Wie in Bild 61 dargestellt, betragen die entsprechenden Kontaktzeiten bei einem Anprall gegen ein Ersatzfahrzeugsystem mit einer Schaumdichte von 30 g/l über 25 ms und sind somit mit Realfahrzeugen zu vergleichen.

Laut VDA betragen zulässige Auslösezeiten bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 25 km/h zwischen 40 und 60 ms. Bisher wurden die verschiedenen Signalverläufe nur bis 20 bzw. 25 ms ausgewertet. Daher sollte laut VDA die Auswertung der Signale bei einer Anprallgeschwindigkeit von 25 km/h auf einen Zeitbereich von ca. 40 bis 50 ms ausgeweitet werden.

Laut VDA kann durch Variation der Schaumdichten für die verschiedenen Lastpfade die Kinematik beeinflusst werden. Dieses Verhalten wird von den Fahrzeugherstellern gezielt benutzt. Die innerhalb der Anprallversuche mit dem Prüfgestell verwendete Schaumdichte beträgt für alle Lastebenen einheitlich 60 g/l und würde daher das reale Verhalten nicht ausreichend genau abbilden.

5.1.2 Diskussion des Lasteintrags der Versuchsergebnisse

Der Anprall des PDI-Impaktors lässt sich mittels eines Zwei-Feder-Systems, bestehend aus dem Schaum der Front und dem relativ weichen Impaktor, beschreiben, was zu einer insgesamt langen Kontaktzeit führt. Der IEE-Impaktor ist hingegen sehr steif, wodurch sich der Anprall durch ein Ein-Feder-System charakterisieren lässt, mit entsprechend kurzer Kontaktzeit und einem höheren Kraftpeak, trotz geringerer Masse.

Laut VDA spiegelt ein rein kraftbasierter Ansatz die untere Grenze nur unzureichend wider. Wie die Versuchsergebnisse belegen, erzeugt in diesem Fall der Impaktor mit der geringsten Masse den höchsten maximalen Kraftwert. Dies würde vor allem von der Steifigkeit des Impaktors abhängen und ließe gemäß VDA wenige Rückschlüsse über das eigentliche Verhalten zu.

Laut IEE berechnet sich der insgesamt eingetragene Impuls hingegen aus dem Integral des Kraft-

verlaufs und kann bei einem leichteren Impaktor (IEE) geringer sein. Der Kraftverlauf kann hier aber trotzdem einen höheren Maximalwert aufweisen, abhängig vom Material des Impaktors und vorliegender Schaumhärte.

Laut VDA würden sich die vorgestellten kraftbasierten Lasteintragskurven bei Betrachtung der Intrusionen in ihrem Verlauf umkehren, da dann die Masse entscheidend sei.

Laut IEE können sich die kraftbasierten Lasteintragskurven bei Betrachtung der Intrusion nicht umkehren, da die Intrusion die Kompression des Energieabsorbers (Schaum) und damit die Reaktionskraft der (nichtlinearen) „Schaumfeder“ beschreibt. Nachdem actio und reactio einander entsprechen, muss die (am Fänger gemessene) Intrusion qualitativ der kraftbasierten Lasteintragskurve folgen, gerade weil die Masse entscheidend ist (Impuls, kinetische Energie).

Laut VDA sind mögliche relevante physikalische Größen nach Euro-NCAP-Protokoll die Kontaktkraft, die innere Energie, die Intrusion oder die effektive Masse. Innerhalb des Prüfverfahrens sollte die für das Sensorprinzip relevante Größe als Nachweis verwendet werden.

5.1.3 Berücksichtigung entsprechender Worst-Case-Szenarien

Laut VDA sollten bei der Definition der unteren Grenze aus pragmatischen Gründen Kompromisse gefunden werden. Es sollte nicht das Ziel sein, immer neue Lastfälle zu generieren. Es sollten zudem keine Modelle berücksichtigt werden, die durch das zu prüfende System ohnehin nicht geschützt werden können. Laut VDA stelle sich die Frage, ob die Berücksichtigung eines 1,90 m großen 65 kg schweren Mannes aus medizinischer als auch aus Sicht der Trefferlage relevant ist.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung konnte allerdings gezeigt werden, dass ein 1,90 m großer 65 kg schwerer Mann bei bestimmten Konstellationen sehr geringe Lasteinträge in die Fahrzeugfront einleitet und demnach neben einer 5%-Frau berücksichtigt werden sollte.

5.1.4 Einbeziehung relevanter Menschmodelle

Laut VDA wäre die Verwendung des THUMS-Modells den MADYMO-Modellen vorzuziehen, da dieses den Fußgänger und auch den Lasteintrag bes-

ser abbildet. Des Weiteren ist laut VDA die Anwendung der Fußgängermodelle hinsichtlich der Eignung zu trennen. Für die Bestimmung von Trajektorien und Zeitverläufen seien MADYMO-Modelle (Mehrkörpersysteme) sowie einfache FE-Modelle ausreichend. Für die Auslegung der Sensoren würde jedoch eine deutlich bessere Biofidelität wie bei dem THUMS-Modell benötigt.

Eine weitere Validierung der Simulationsergebnisse durch den Einsatz des THUMS-Modells würde sowohl durch die BAST als auch durch das ika befürwortet werden. Im Rahmen dieses Projektes erfolgte zunächst eine Verwendung der MADYMO-Modelle, da hier explizit der Einfluss verschiedener Fußgängergrößen, Fahrzeugkategorien, Fahrzeugsteifigkeiten und Schrittstellungen untersucht werden sollte. Durch die MADYMO-Scalingfunktion konnten hierfür zusätzliche Fußgängermodelle generiert werden. Diese Untersuchung wäre in dieser Form mit THUMS nicht möglich gewesen.

Laut VDA liegt zur Nutzung einer standardisierten Schrittstellung ein aktueller Vorschlag im PDI2-Projekt vor, der mit dem innerhalb des Arbeitskreises Vorausschauende Frontschutzsysteme (vFSS) entwickelten Fußgängertarget harmonisiert ist und daher verwendet werden sollte.

5.1.5 Auswahl der Lower-Limit-Impaktoren

Laut VDA sollte die Beurteilung von Simulationen zur unteren Grenze, die seitens des OEM durchgeführt werden, nicht auf generischen Daten basieren, da es hierfür zu viele Variationen in der Frontgestaltung gäbe. Hier sollte die Prüfeinrichtung immer das konkrete FE-Modell zugrunde legen.

Falls der Prüfeinrichtung eine Möglichkeit zur Überprüfung der Richtigkeit des FE-Modells gegeben wird, ist dieser Vorschlag umsetzbar.

Laut VDA wird für die Sensorauslegung eine Zahl von Tests außerhalb des Labors (Varianten, Klimabedingungen, Heiß-/Kaltlanderprobung) benötigt. Der hierfür erforderliche Impaktor sollte über einen breiten Geschwindigkeitsbereich robust und temperaturunabhängig sein. Bei der Fahrzeughomologation wird zur Zulassung von crash-aktiven Systemen bereits ein Lower-Limit-Impaktor eingesetzt (nach „GTR9 Certification Standard“).

Laut VDA ist die im Rahmen des Projektes getroffene Aussage, dass sich der PDI als Nachweis der unteren Auslösegrenze für alle Fahrzeugtypen als

ungeeignet herausgestellt hat, in dieser Absolutheit – auch im Hinblick auf die versuchstechnischen Diskussionspunkte – unzulässig und sollte daher deutlich eingeschränkt werden.

5.2 Kopfaufprall/Bewertung Schutzpotenzial

Im Rahmen der Expertenbefragung wurde im Wesentlichen die Ersatzprüfung mithilfe des Hüftimpaktors zur Bewertung der Haubendeformation infolge der Oberkörperbelastung vorgestellt. Die folgenden Anmerkungen beziehen sich daher ausschließlich auf diese Teilprüfung.

5.2.1 Analyse möglicher zusätzlicher Verletzungsrisiken

Laut VDA lege die vorliegende Untersuchung nicht überzeugend dar, dass der Oberkörperkontakt ein Problem für das Verletzungsrisiko eines Fußgängers darstellt. Zum einen ist das MADYMO-Modell aufgrund seiner mangelnden Biofidelität bezüglich der Schultersteifigkeit zur Bewertung der Fronthaubenintrusion nach Ansicht des VDA nicht geeignet. Zum anderen liegen dem VDA in internen ACEA-Dokumenten Informationen über PMTO-Versuche (Post Mortal Test Objects) in Frankreich vor, bei denen die Belastungen des menschlichen Körpers sowie die Verformungen am Fahrzeug mit den entsprechenden Ergebnissen aus Verbraucherschutztests verglichen wurden. Dabei wurden durch den Oberkörper geringe plastische Verformungen an der Haube verursacht. Gleichzeitig waren die gemessenen Belastungswerte am Kopf des PMTO im Vergleich zu den Ergebnissen der Kopfimpaktor-Anprallversuche teilweise deutlich geringer.

Vergleichbare Ergebnisse, die vermutlich auf den gleichen Tests basieren, wurden auch von (MASSON, 2007 und CHALANDON, 2007) veröffentlicht. Auch hierbei wurden die Ergebnisse der Impaktorversuche nach Euro NCAP mit den Ergebnissen der Ganzkörpertests verglichen. Der Kopfanprall fand im Frontscheibenbereich des Fahrzeugs statt. Die Anprallgeschwindigkeit des Impaktors stimmt mit der Fahrzeuggeschwindigkeit überein. Die Kopfanprallgeschwindigkeit liegt aufgrund der nun berücksichtigten Gesamtkinematik beim Ganzkörperanprall meist unterhalb der Euro-NCAP-Impaktor-Anprallgeschwindigkeit. Obwohl die Maximalbeschleunigung beim Ganzkörperanprall höher war, wurden etwas kleinere HIC-

Werte ermittelt ($HIC_{\text{Impaktor}} = 486$, $HIC_{\text{Ganzkörper}} = 261$ bis 423).

In den innerhalb des vorliegenden Projekts durchgeführten Untersuchungen zeigte bereits eine kleine Absenkung der Haube (um 12 mm) erhebliche Auswirkungen auf das Verletzungsrisiko. Diese fahrzeugspezifischen Ergebnisse können nach Meinung der BAST und des ika nicht mit den von MASSON (2007) und CHALANDON (2007) durchgeführten Untersuchungen bewertet werden. Zum einen lässt die Auswertung plastischer Verformungen nicht zwangsweise Rückschlüsse auf den tatsächlich vorhandenen Deformationsweg zum Zeitpunkt des Kopfaufpralls zu. Zum anderen findet der Kopfanprall bei MASSON (2007) im Scheibenbereich statt, welcher selbst durch elastische Verformungen im Haubenbereich kaum beeinflusst wird. Zudem können solch kleine Verformungen auf den Videoaufnahmen von MASSON (2007) nicht nachvollzogen werden.

Laut VDA sei zu hinterfragen, ob eine geringe Absenkung der Haube bereits große Auswirkungen auf das Verletzungsrisiko habe. Die Auswirkungen würden lediglich den Impaktormesswert betreffen, wobei direkte Rückschlüsse auf das Unfallgeschehen fragwürdig seien. Der Messwert des Impaktors ist derzeit jedoch das einzig anerkannte Kriterium zur Bewertung des Verletzungsrisikos im realen Unfall.

Laut VDA seien die in den durchgeführten Untersuchungen dargelegten höheren Kräfteinträge der Oberarme im Vergleich zur Schulter unrealistisch. Des Weiteren stellt sich laut VDA bezüglich des Schulterkontakts die Frage, wie relevant dieser überhaupt ist, da der Fußgänger durch die Schrittstellung eine Drehung um seine Hochachse erfahren würde.

5.2.2 Prüfverfahren zur Berücksichtigung der Haubendeformation

Laut VDA sei die Absicht des im aktuellen Euro-NCAP-Protokoll definierten Verfahrens zur Berücksichtigung der Haubendeformation sicherzustellen, dass die Deformation einer aktiven und aktivierten Haube in einem sinnvollen Verhältnis zur Verformung der Haube in nicht aktiviertem Zustand steht und dass das Schutzpotenzial aufstellender Hauben gegenüber passiven Hauben nicht durch eine vorherige Haubendeformation reduziert wird. Hierfür wird bereits ein simulativer Nachweis durch-

geführt. Euro NCAP simuliert hierbei ohne Package. Deformationswege werden am Fahrzeug bzw. am Geometriemodell gemessen. Daher sollten die crash-aktiven Systeme laut VDA auch ohne Package simuliert werden, damit die Vergleichbarkeit mit den passiven Systemen gewährleistet ist. Ein Prüfverfahren sollte laut VDA technologieneutral sein und die crash-aktive Haube nicht diskriminieren.

Laut VDA sollte eine Festlegung eines fixen Wertes für den nach der Belastung durch den Oberkörper verbleibenden Deformationsweg kein Bestandteil einer Testvorschrift sein. Hier sollte das Verhalten des Systems anhand der Performance bewertet werden, um eine Technologieneutralität zu gewährleisten.

Laut BAST bietet sich bei der Festlegung eines Testprotokolls für crash-aktive Systeme die Möglichkeit, alte Versäumnisse zu korrigieren. Eine entsprechende Anpassung der rein passiven Prüfung wäre hier hinsichtlich der Vergleichbarkeit der konsequenteren Weg mit dem größtmöglichen Nutzen für ungeschützte Verkehrsteilnehmer.

Laut VDA ergeben sich bei der Annäherung des Oberkörperanpralls durch den Hüftimpaktor Vor- und Nachteile. Ein großer Nachteil des Hüftimpaktortests ist der geführte Stoß, da der Impaktor nicht abrollen kann. Aus Gründen der Fußgängerkinematik wäre es daher u. U. problematisch, jedes Fahrzeug mit dem Hüftimpaktor zu beschießen. Eine solche Prüfvorschrift wäre evtl. nicht mehr technologieneutral.

Die Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass das Deformationsverhalten aufgrund des Kontaktes mit dem 6-jährigen Kind und dem Hüftimpaktor durchaus vergleichbar sind.

Laut VDA sei ein gekoppelter Test zur Haubenvordeformation mit HIC-Messung beim Kopfaufschlag nicht nur ein Thema von crash-aktiven Hauben und würde deswegen unzulässig zu Nachteilen bei der Bewertung gegenüber passiven Hauben führen. Falls die Bewertung der Haubenvordeformation generell beim Fußgängerschutz im realen Unfallgeschehen relevant ist, müsste hier ein Nachweis geführt und die Effektivität von Maßnahmen gezeigt werden.

5.2.3 Dynamische Kopfanprallversuche

Laut VDA ist ein dynamisches Testen bei den meisten Testanlagen mit geringem technischem Mehraufwand möglich und die angesprochenen Punkte sind durch entsprechendes Equipment erfüllbar. Die Anforderungen sollten sich jedoch am aktuellen technischen Stand orientieren und nicht an der Ausstattung der Testlabore. Die Erfahrung allerdings zeigt, dass der Aufwand bedingt durch dynamisches Testen signifikant steigt.

Laut VDA erschwert die Einführung des HIC-650-Limits ab 2013 die Berücksichtigung der Haubendeformation zusätzlich. Dies gelte allerdings gleichermaßen für rein passive Systeme.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes FE 82.350/2008 „Bewertung von aktiven Systemen der passiven Fahrzeugsicherheit im Rahmen einer Prüfvorschrift zum Fußgängerschutz“ wurde ein Bewertungsverfahren für crash-aktive Fußgängerschutzsysteme erarbeitet. Aufbauend auf einem modularen Prüfverfahren, welches in den beiden vorangegangenen Forschungsprojekten der BAST FE 82.0229/2002 „Schutz von Fußgängern beim Scheibenaufprall“ und FE 82.308/2006 „Schutz von Fußgängern beim Scheibenanprall II“ speziell für den Kopfanprall im Scheibenbereich entwickelt wurde, wurde die Bewertung der kontaktbasierten Erkennungssensorik sowie des Verletzungsrisikos beim Anprall gegen Motorhauben integriert.

Zunächst wurden der aktuelle Stand der Technik der Sensorik und Aktuatorik sowie aktuelle Entwicklungen entsprechender Testmethoden und Prüfkörper analysiert. Hierdurch konnten Anforderungen an ein umfassendes Testverfahren definiert werden.

Zur Zeit der Projektbearbeitung sind crash-aktive Systeme zum Fußgängerschutz in zehn Serienfahrzeugmodelle implementiert. Hierbei kommen vor allem Beschleunigungssensoren sowie faseroptische Lichtwellenleiter zum Einsatz. Beschleunigungssensoren werden überwiegend lokal verteilt in der Fahrzeugfront verbaut, während faseroptische Lichtwellenleiter entlang der gesamten Fahrzeugfront ohne Unterbrechung eingesetzt werden. Aufgrund dieser lokalen Verteilung einiger Sensoren ist es sinnvoll, die Funktionsbewertung an ver-

schiedenen Anprallpositionen durchzuführen. Da kontaktbasierte Sensoren häufig im Bereich des Energieabsorptionsschaums integriert werden, der bei zunehmenden Temperaturen ein elastischeres Verhalten aufweist, sollten die zu prüfenden Temperaturen in dem Bewertungsverfahren festgelegt werden.

Die verwendeten aktuatorischen Systeme können entsprechend ihrer Funktionsweise nach der Art der Auslösung, der Aufstellung mit verschiedenen Aufstellkomponenten, der Krafteinleitung zur Aufstellung, der Art der Aufstellkinematik sowie der Erweiterung der Systemgrenzen eingeteilt werden. Durch eine detaillierte Analyse jeder dieser Einteilungskriterien konnten die für das vorliegende Prüfverfahren relevanten Eigenschaften dargestellt werden. Demnach sind statische Bewertungen aufgrund der implizierten dynamischen Vorgänge nicht sinnvoll. Des Weiteren sind zur Kraftübertragung bei punktueller Krafteinleitung notwendige Haubenstrukturverstärkungen, welche sich negativ auf das Verletzungsrisiko auswirken können, gesondert zu berücksichtigen. Eine alleinige Anhebung der hinteren Motorhaubenkante kann infolge der Pendelbewegung des Kopfes um die Schulter in ein zusätzliches Verletzungsrisiko resultieren und sollte daher im Rahmen des Testverfahrens mit bewertet werden.

Im weiteren Verlauf wurden bereits veröffentlichte Testverfahren bzw. -methoden analysiert. Zur Bewertung der Kontaktsensorik wurden so genannte Lower-Limit-Impaktoren entwickelt, die aufgrund ihres möglichst geringen Lasteintrags ein Worst-Case-Szenario für die Sensoren darstellen sollen. Bei keinem der derzeit erhältlichen Impaktoren (PDI, IEE-Impaktor und SensorLeg) konnte – basierend auf den zur Entwicklung dieser Prüfkörper erhältlichen Informationen – ausreichend dargelegt werden, dass sie sich zur Abbildung der Worst-Case-Szenarien eignen. Daher sollte hier eine umfangreiche Analyse durchgeführt werden, bei der sich zeigte, dass nicht sämtliche Anforderungen, die in den beiden vorherigen Absätzen beschrieben wurden, vollständig adressiert werden. Das im Rahmen der Verbraucherschutzorganisation Euro NCAP veröffentlichte Testverfahren (Euro NCAP, 2011) berücksichtigt bspw. als einziges Testverfahren den Deformationsfreiraum, verwendet hier jedoch ungenaue Kriterien.

Anschließend wurden die in der Literatur bisher unzureichend definierten Anforderungen für ein Bewertungsverfahren crash-aktiver Systeme unter-

sucht und definiert. Der Fokus wurde hierbei auf die Definition entsprechender Worst-Case-Szenarien zur Bewertung kontaktbasierter Erkennungssensorik sowie Kriterien zur Bewertung des Verletzungsrisikos beim Kopfanprall gelegt.

Kontaktbasierte Fußgängererkennungssysteme charakterisieren im Falle eines Unfalls den Unfallgegner anhand des in die Fahrzeugfront eingeleiteten Lasteintrags. Fußgänger mit geringen Lasteinträgen sind hierbei aufgrund des geringen Unterschieds zu möglichen Misuse-Fällen, bei denen das System nicht auslösen soll, besonders schwer zu detektieren. Der Lasteintrag hängt hierbei von Körpergröße, -gewicht und Schrittstellung des Fußgängers sowie Fahrzeuggeschwindigkeit, -kategorie und der Höhe relevanter Lastpfade sowie sich daraus ergebenden Stoßpunkten am Fahrzeug ab. Um realistische Lasteinträge zur Charakterisierung des Fußgängeranpralls zu bestimmen, wurde ein Ersatzfahrzeugmodell zur Abbildung der Lastpfade vier verschiedener Fahrzeugkategorien als Hardware- und als Simulationsmodell aufgebaut. Anhand verschiedener Versuche und numerischer Berechnungen mit Lower-Limit-Impaktoren wurde ein Simulationsmodell validiert. Anschließend erfolgte eine umfangreiche Berechnung verschiedener Fahrzeug-Fußgänger-Konstellationen zur Bestimmung entsprechender Worst-Case-Szenarien. Hierbei zeigte sich, dass bei Fahrzeugen mit einer geringen Stoßfängerhöhe der 6yo-Dummy und bei Fahrzeugen mit einer hohen Stoßfängerhöhe der TeenM-Dummy die geringsten Lasteinträge in die Fahrzeugfront erzeugten. Generell unterschieden sich die Lasteinträge zwischen TeenM- und 05f-Dummy jedoch kaum. Ein Vergleich der Lasteinträge mit aktuell verfügbaren Lower-Limit-Impaktoren ergab, dass mit dem IEE-Impaktor die Fußgängerklassen mit den geringsten Lasteinträgen bei einem Anprall gegen Fahrzeuge mit einer vergleichsweise hohen Stoßfängerhöhe abgebildet werden können. Basierend auf den in der vorliegenden Untersuchung durchgeführten Analysen eignete sich der PDI hingegen bei keiner der vier Fahrzeugkategorien zur Abbildung der Fußgängerklassen mit den geringsten Lasteinträgen.

Im weiteren Verlauf wurde das Verletzungsrisiko für den Kopfanprall näher untersucht. Hierbei fokussierten sich die Analysen vor allem auf die Bewertung des Deformationsfreiraums sowie den Einfluss des Oberkörpers auf das Kopfverletzungsrisiko, da diese Anforderungen in den bisher veröffentlichten Testverfahren nicht ausreichend genau beschrie-

ben werden. Hierfür wurde eine Anpralluntersuchung mit einem 6yo-Dummy gegen ein Mittelklassefahrzeug mit einer passiven Haube durchgeführt. Demnach senkt sich die Haube im Bereich des Kopfanpralls infolge der Belastung der Haube durch den Oberkörper zum Zeitpunkt des Kopfanpralls um 12 mm ab. Eine vergleichende Kopfmiktoranpralluntersuchung ergab einen deutlich höheren HIC-Wert für den Fall der bereits vordeformierten Haube. Dieses Verhalten muss daher in entsprechender Weise in einem Testverfahren berücksichtigt werden. Zur möglichst objektiven Bewertung dieses Verletzungsrisikos wurde daher ein Ersatzprüfverfahren entwickelt, mit dem sowohl virtuelle als auch reale Anprallversuche durchgeführt werden können. Der Hüftimpaktor eignete sich hierfür, da die durch ihn aufgebrachten Kräfte mit den Kontaktkräften infolge des Oberkörperanpralls ausreichend genau übereinstimmen.

Die bisher gewonnenen Erkenntnisse werden in das innerhalb des Vorgängerprojektes FE 82.308/2006 erarbeitete hybride Testverfahren für den Frontscheibenbereich integriert. Neben der detaillierten Ausarbeitung einer Bewertungsmöglichkeit kontaktbasierter Sensorsysteme zur Fußgängererkennung wurde auch eine anforderungsgerechte Berücksichtigung dynamischer Schutzsysteme adressiert.

Zur möglichst objektiven Bewertung des Verletzungsrisikos ungeschützter Verkehrsteilnehmer sollte eine möglichst reale Unfallkinematik berücksichtigt werden. Da diese für die einzelnen Unfallszenarien stark variiert, wurden die innerhalb des Bewertungsverfahrens zu berücksichtigenden Parameter, wie Kopfanprallgeschwindigkeit, Anprallwinkel und Anprallbereich, mithilfe der Simulation bestimmt. Hierfür sollte der Hersteller insgesamt mindestens acht Simulationen mit entsprechenden Menschmodellen durchführen, wobei der Anprall von vier Fußgängergrößen (6-jähriges Kind, 5%-Frau, 50%-Mann und 95%-Mann) an zwei unterschiedlichen Anprallpositionen am Fahrzeug zu untersuchen ist. Die Fußgänger werden dabei in seitlicher Schrittstellung zum Fahrzeug positioniert, wobei die linke Körperhälfte dem Fahrzeug zugewandt wird.

Das anschließende Bewertungsverfahren besteht aus drei Teilen.

Zunächst wird die Erkennungssensorik bewertet. Aus der Simulation wird der Fußgänger mit dem geringsten Lasteintrag bestimmt. Diese Fußgängerklasse wird zur Auswahl eines passenden Prüfkör-

pers herangezogen. Der Hersteller muss hierbei nachweisen, dass der auszuwählende Prüfkörper (Lower-Limit-Impaktor) mit dieser Fußgängerklasse vergleichbare Lasteinträge in die Fahrzeugfront generiert. Eventuell müssen derzeit in Entwicklung befindliche Impaktoren (IEE-G2-Impaktor und PDI-2) berücksichtigt werden. Neben der sicheren Erkennung muss das System auch zeitliche Bedingungen erfüllen, um in jedem Fall eine volle Systemaktivierung bei Kopfanprall zu gewährleisten. Werden eine oder mehrere Anforderungen nicht erfüllt, gilt die Erkennungssensorik als nicht ausreichend und die Bewertung des Kopfverletzungsrisikos wird im nicht aktivierten Zustand durchgeführt.

Im zweiten Teil des Bewertungsverfahrens wird das Kopfverletzungsrisiko untersucht. Hierzu werden virtuelle Tests in einem regelmäßigen Rasterfeld, einem so genannten „Grid“, mit ggf. ergänzenden Tests der zusätzlichen kritischen Stellen an der Fahrzeugstruktur durchgeführt. Alle ausgewählten Anprallpunkte werden am validierten FE-Modell durch die numerische Impaktorsimulation getestet. Zusätzlich werden einige reale Anprallversuche mit Kopfmiktoren durchgeführt. Hierbei werden die Positionen mit dem geringsten und dem höchsten HIC-Wert überprüft. Des Weiteren werden mögliche zusätzliche Verletzungsrisiken durch die exponierte hintere Haubenkante mithilfe eines Pendelimpaktors bewertet.

Im letzten Teil des Bewertungsverfahrens wird die Haubendeformation infolge der Oberkörperbelastung bewertet. Das hier vorgeschlagene Prüfverfahren zieht für die Bewertung sowohl virtuelle als auch experimentelle Anprallversuche heran. Die für die Untersuchung mit dem Hüftimpaktor zu definierenden Parameter sind neben Anprallwinkel und -geschwindigkeit auch die Impaktormasse. Das zu bewertende Kriterium ist der Deformationsfreiraum, der in einem Abstand von 250 mm oberhalb des oberen Endes des Hüftimpaktors in xz-Ebene bestimmt wird und zum Zeitpunkt des Kopfanpralls einen Grenzwert von 50 mm nicht unterschreiten darf.

Abschließend werden die Bemerkungen einer Expertenrunde des VDA sowie von Vertretern der Hersteller der verschiedenen Lower-Limit-Impaktoren beschrieben, denen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung vorgestellt wurden. Der Fokus wurde auf die Teilprüfungen zur Bewertung der kontaktbasierten Erkennungssensorik sowie des Schutzpotenzials crash-aktiver Systeme beim Kopfanprall gelegt.

7 Datensammlung

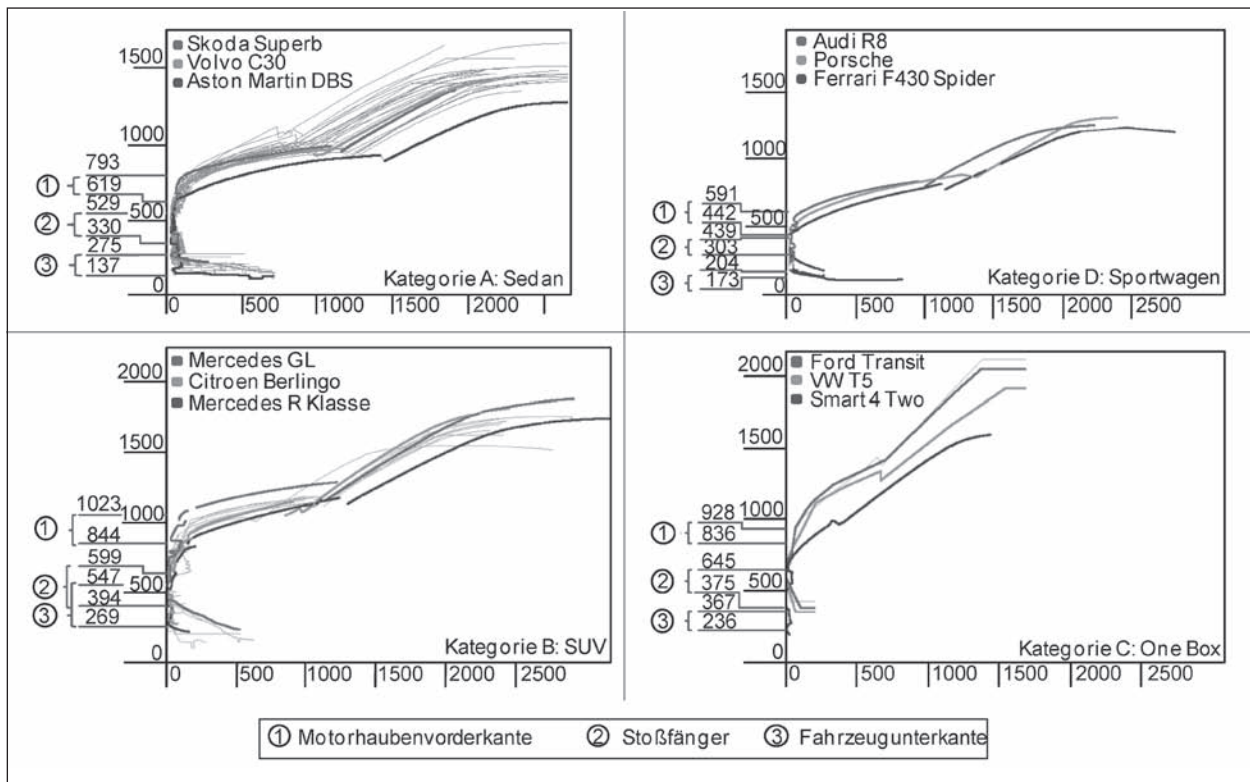


Bild 96: Konturlinien der untersuchten Fahrzeugkategorien

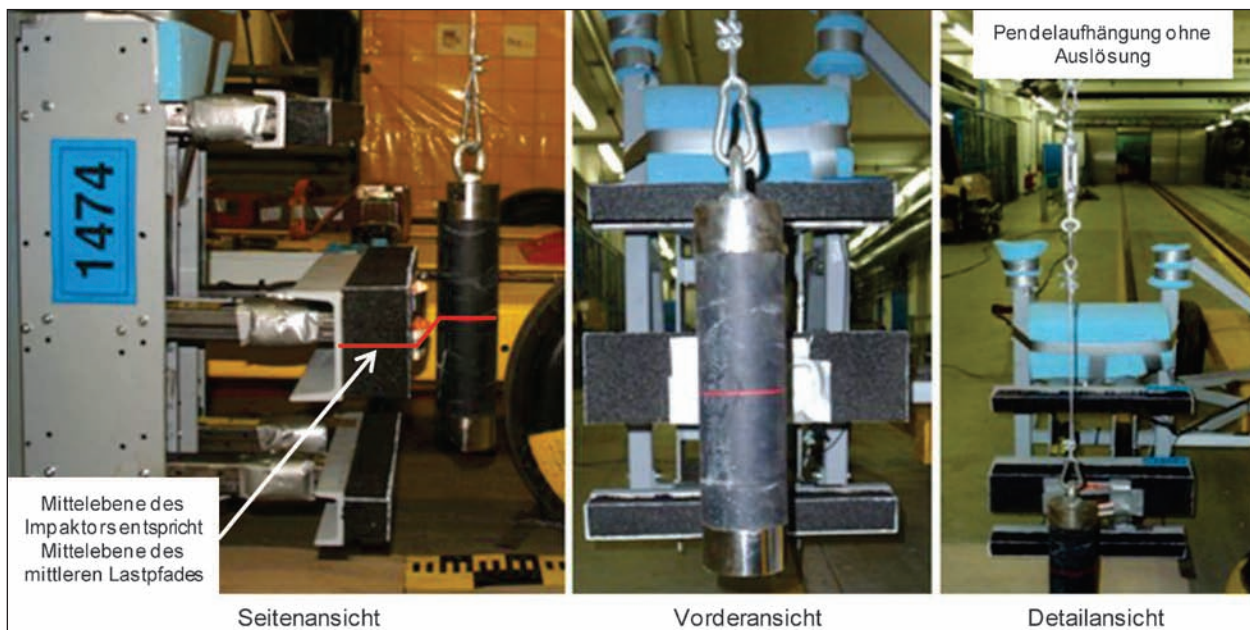


Bild 97: Versuchsanordnung für IEE-Impaktor

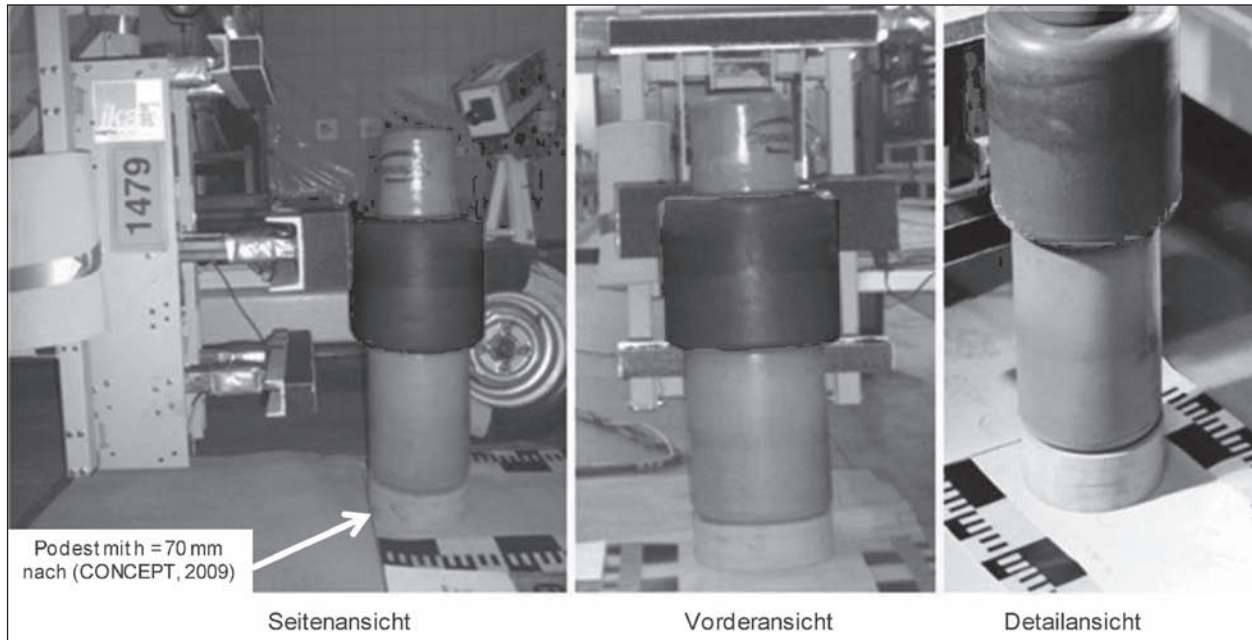


Bild 98: Versuchsanordnung für PDI-Impaktor

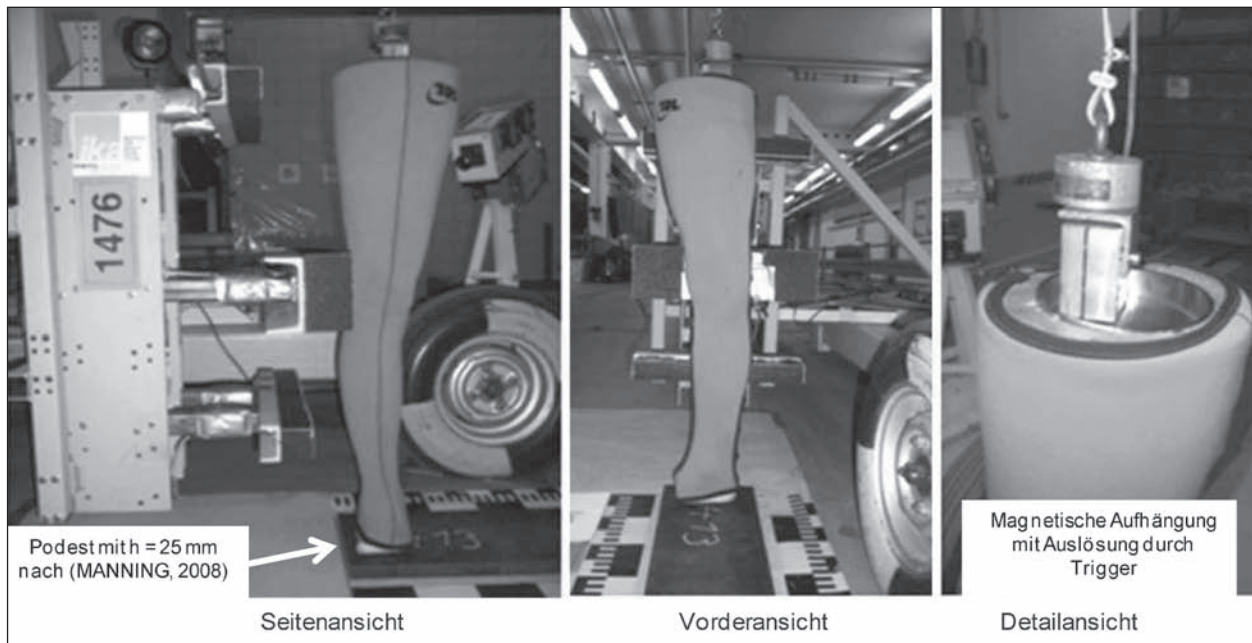


Bild 99: Versuchsanordnung für SensorLeg

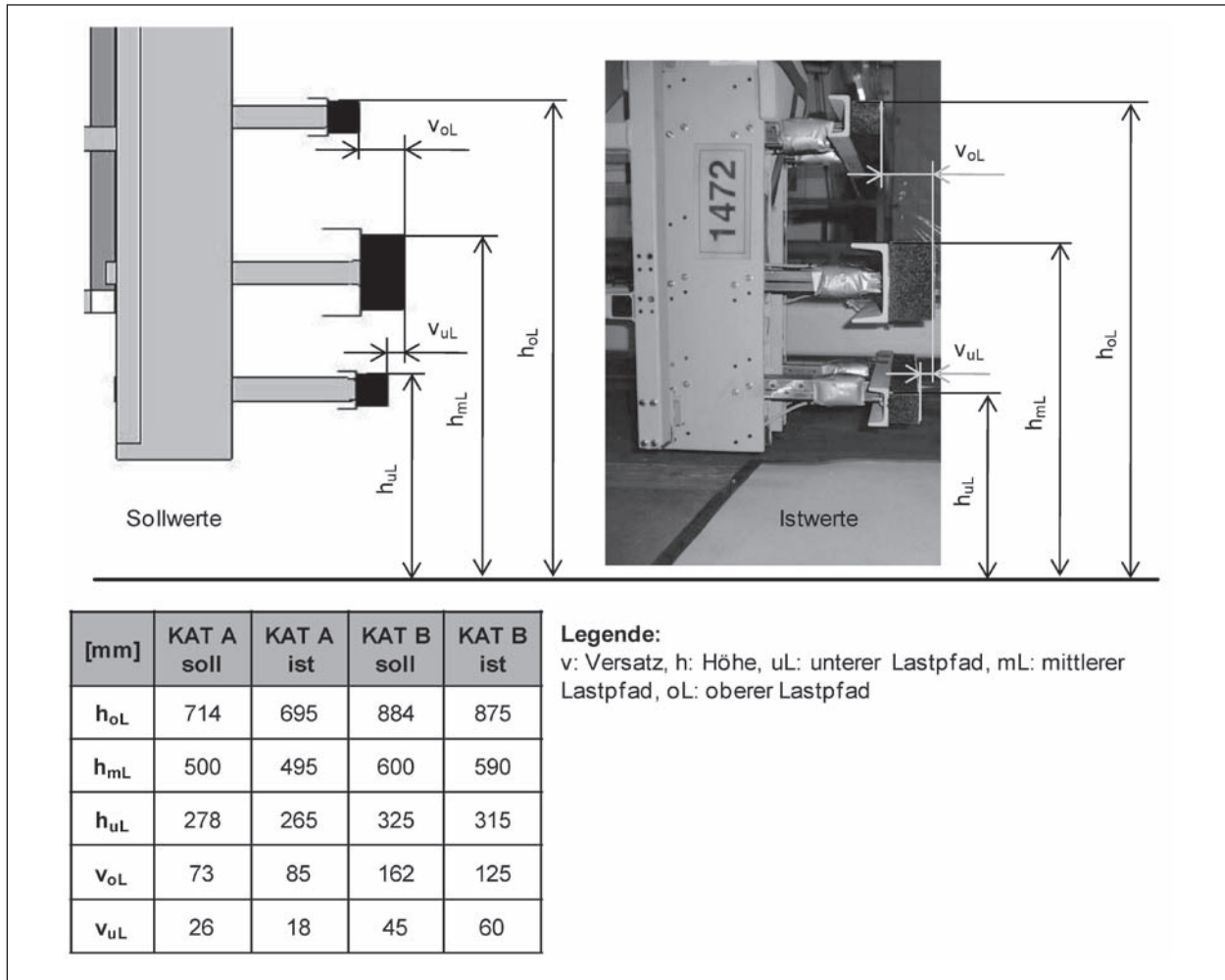


Bild 100: Horizontale und vertikale Positionen der Lastpfade des Prototyps des Ersatzfahrzeugmodells

Kategorie A			Impaktor
Versuch	Geschw. v_{sled}		
1472	20,58 km/h	IEE	
1473	19,99 km/h	IEE	
1474	20,15 km/h	IEE	
1467	20,06 km/h	PDI	
1468	20,90 km/h	PDI	
1469	20,09 km/h	PDI	
1470	20,09 km/h	PDI	
1466	19,99 km/h	SensorLeg	
1471	20,79 km/h	SensorLeg	
1475	21,11 km/h	SensorLeg	
Kategorie B			
Versuch	Geschw. v_{sled}	Impaktor	
1477	20,60 km/h	IEE	
1478	20,62 km/h	IEE	
1479	19,67 km/h	PDI	
1480	20,04 km/h	PDI	
1476	19,74 km/h	SensorLeg	

Bild 101: Gegenüberstellung der tatsächlichen Geschwindigkeiten sämtlicher Versuche

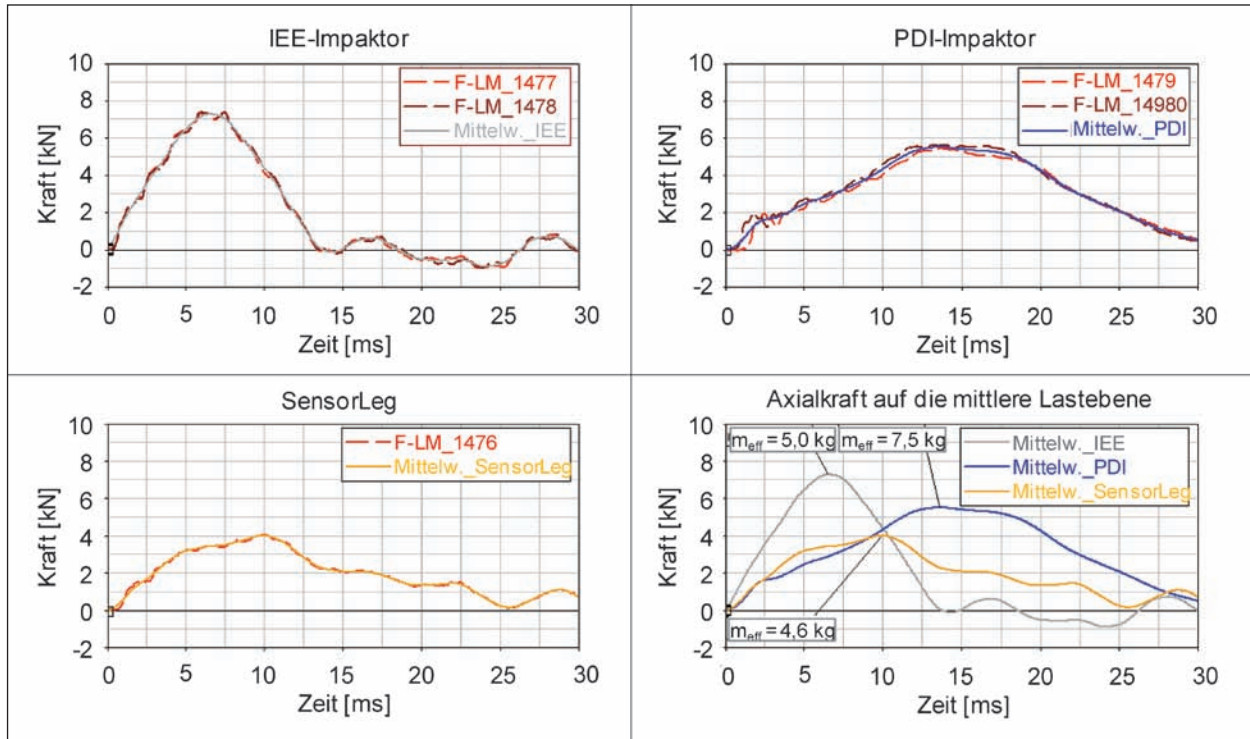


Bild 102: Vergleich der in den mittleren Lastpfad eingeleiteten Kontaktkräfte beim Anprall der verschiedenen Impaktoren gegen den Prototyp des Ersatzfahrzeugmodells der Kategorie B

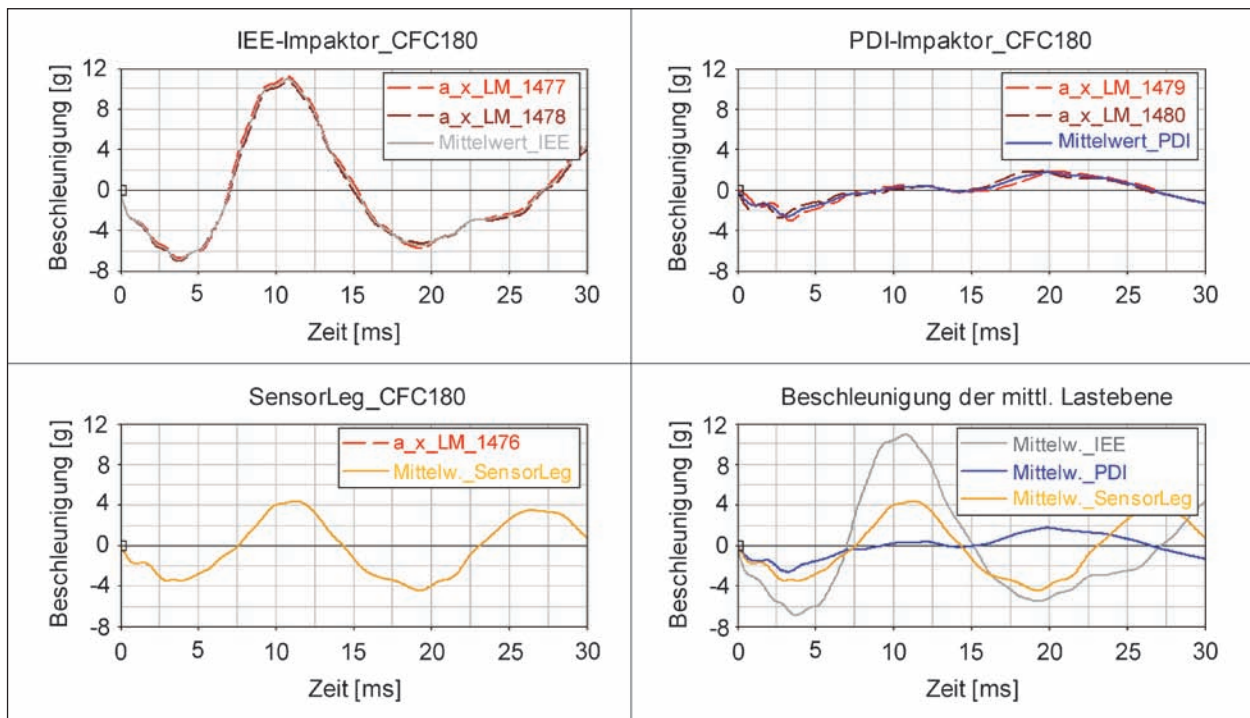


Bild 103: Vergleich der am mittleren Lastpfad auftretenden, gefilterten Beschleunigungen beim Anprall der verschiedenen Impaktoren gegen den Prototyp des Ersatzfahrzeugmodells der Kategorie B

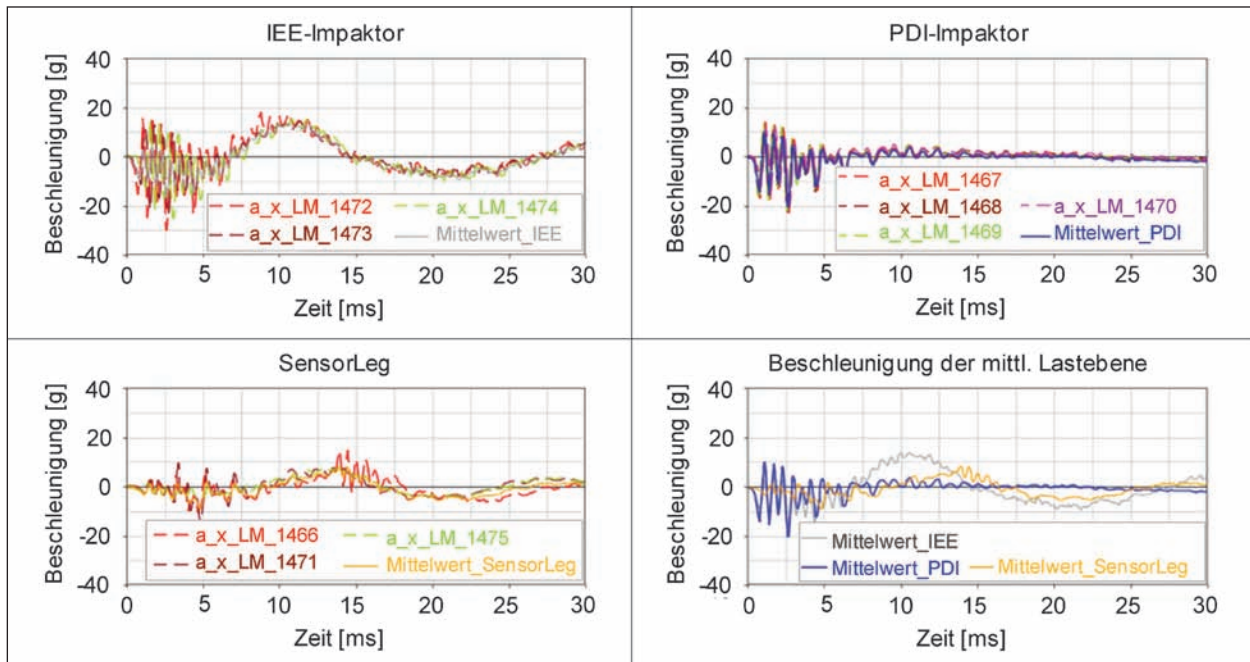


Bild 104: Vergleich der am mittleren Lastpfad auftretenden Beschleunigungen beim Anprall der verschiedenen Impaktoren gegen den Prototyp des Ersatzfahrzeugmodells der Kategorie A

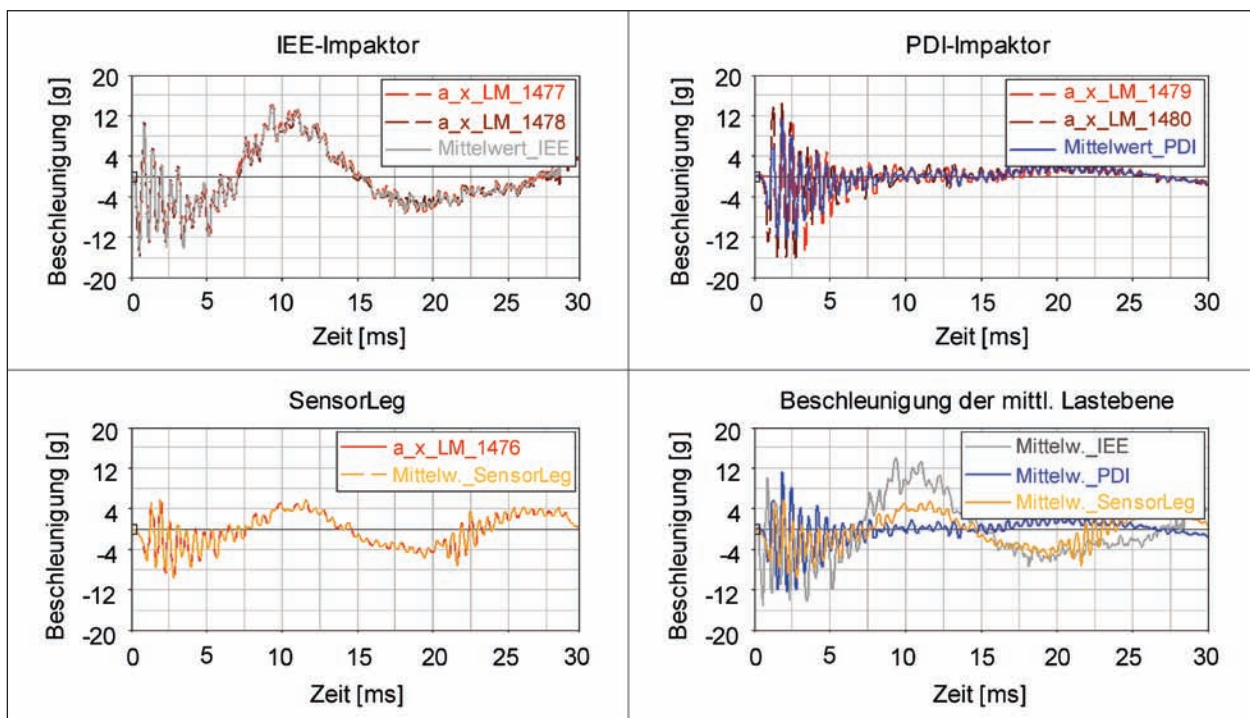


Bild 105: Vergleich der am mittleren Lastpfad auftretenden Beschleunigungen beim Anprall der verschiedenen Impaktoren gegen den Prototyp des Ersatzfahrzeugmodells der Kategorie B

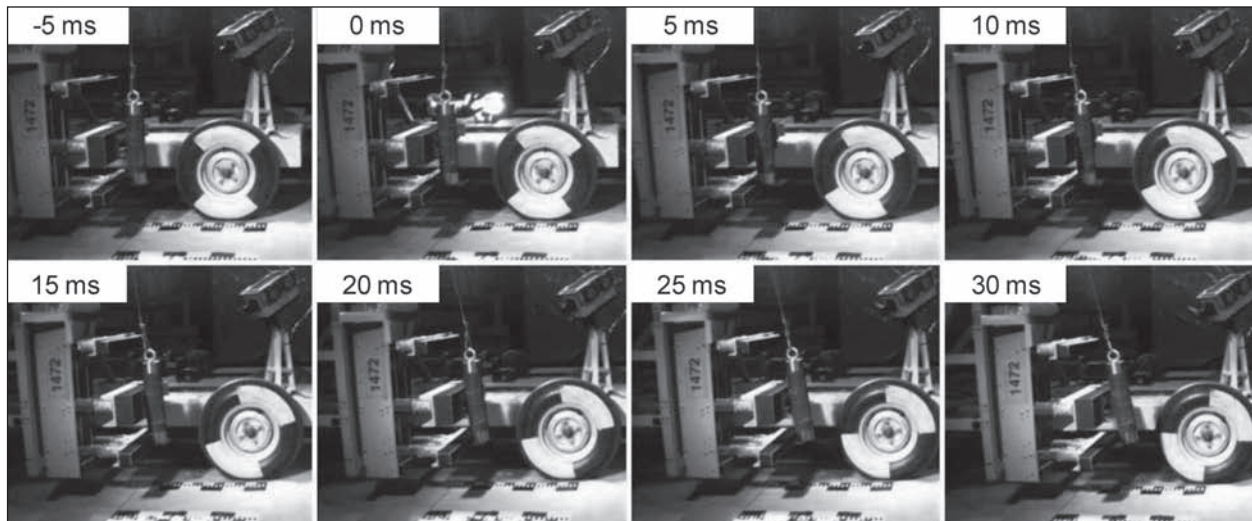


Bild 106: Anprall des Prototyps des Ersatzfahrzeugmodells der Kategorie A gegen IEE-Impaktor

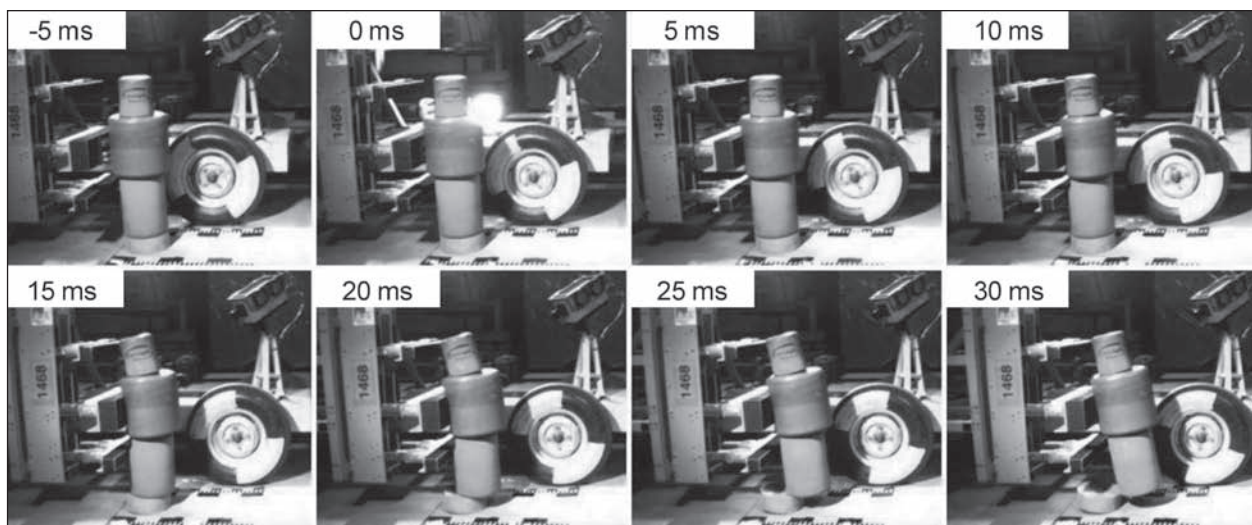


Bild 107: Anprall des Prototyps des Ersatzfahrzeugmodells der Kategorie A gegen PDI

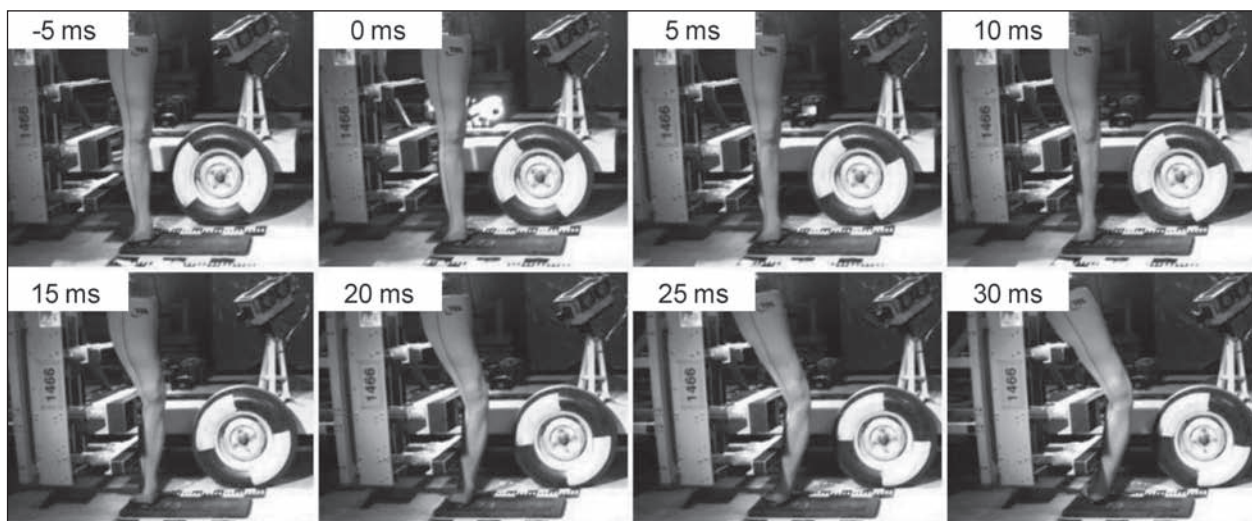


Bild 108: Anprall des Prototyps des Ersatzfahrzeugmodells der Kategorie A gegen SensorLeg

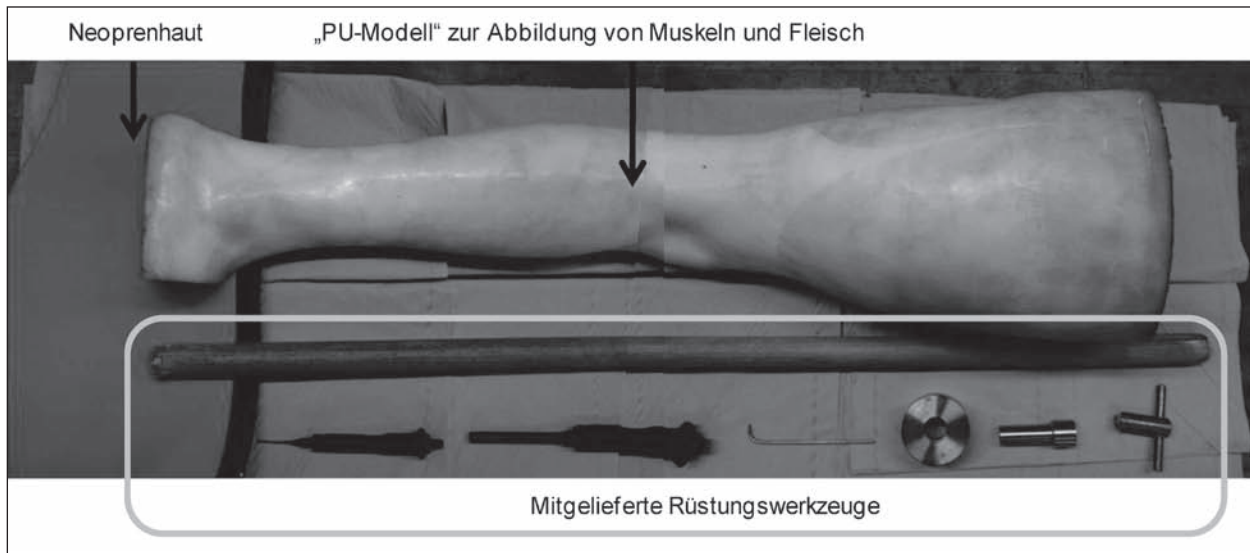


Bild 109: Außenhaut und Muskelmodell des SensorLegs sowie notwendige Rüstungswerkzeuge

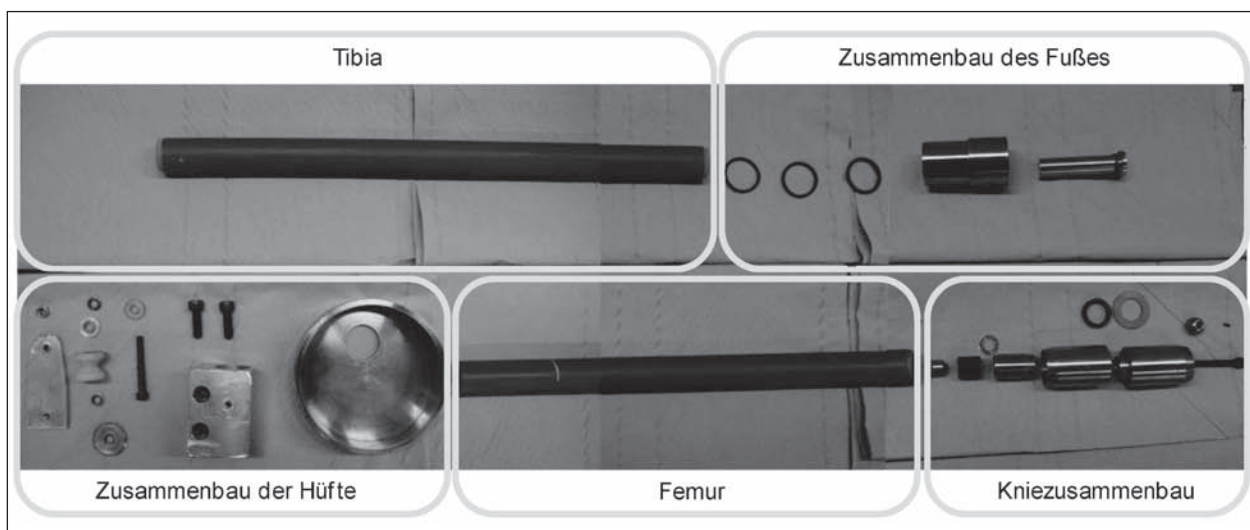


Bild 110: Innere Komponenten des SensorLegs

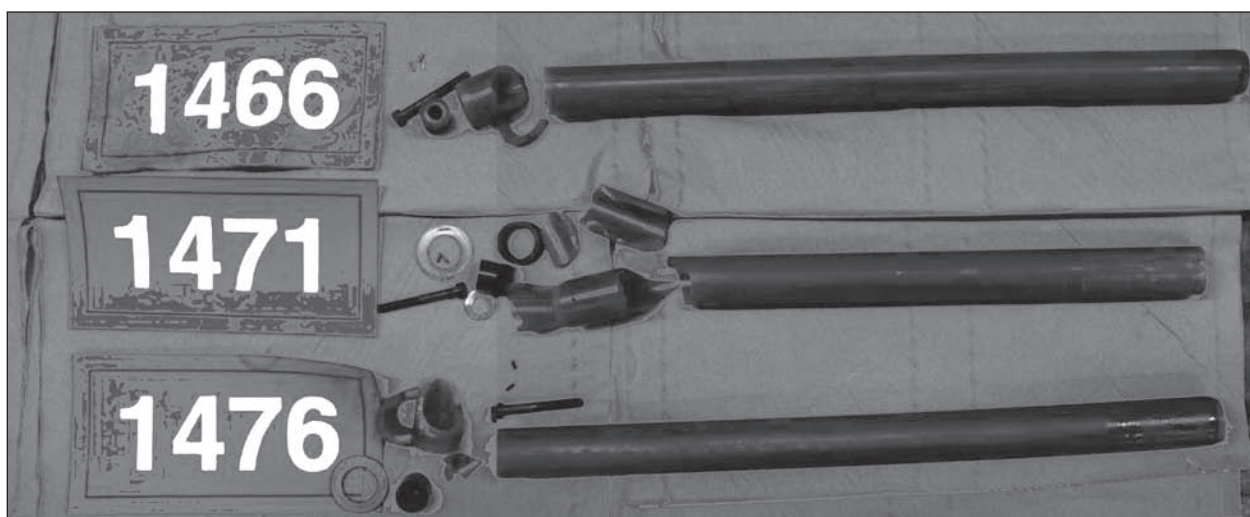


Bild 111: Innerhalb der Anprallversuche beschädigte Komponenten des SensorLegs

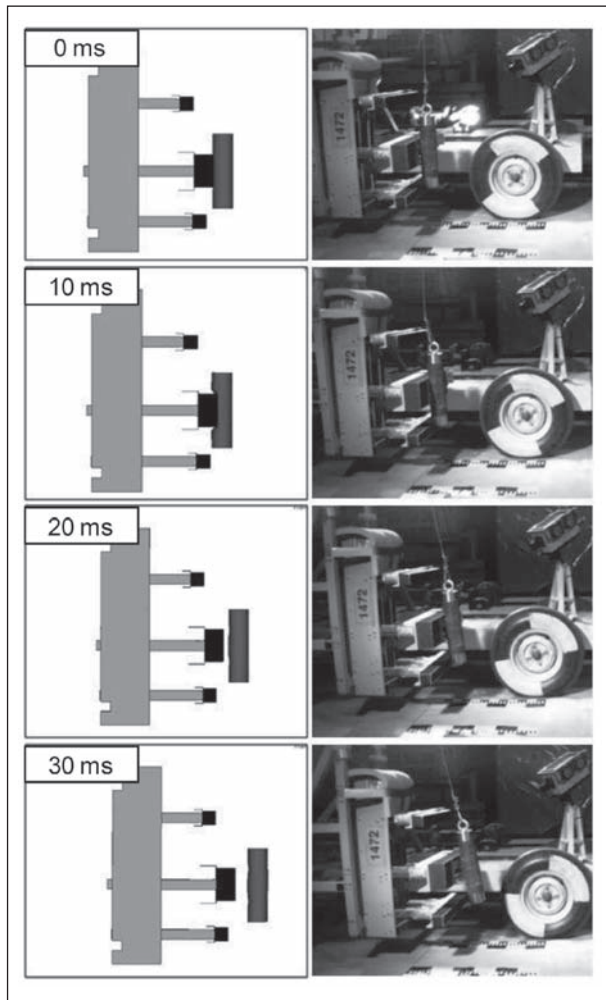


Bild 112: Vergleich der Impaktorflugbahn aus Versuch und Simulation für IEE-Impaktor

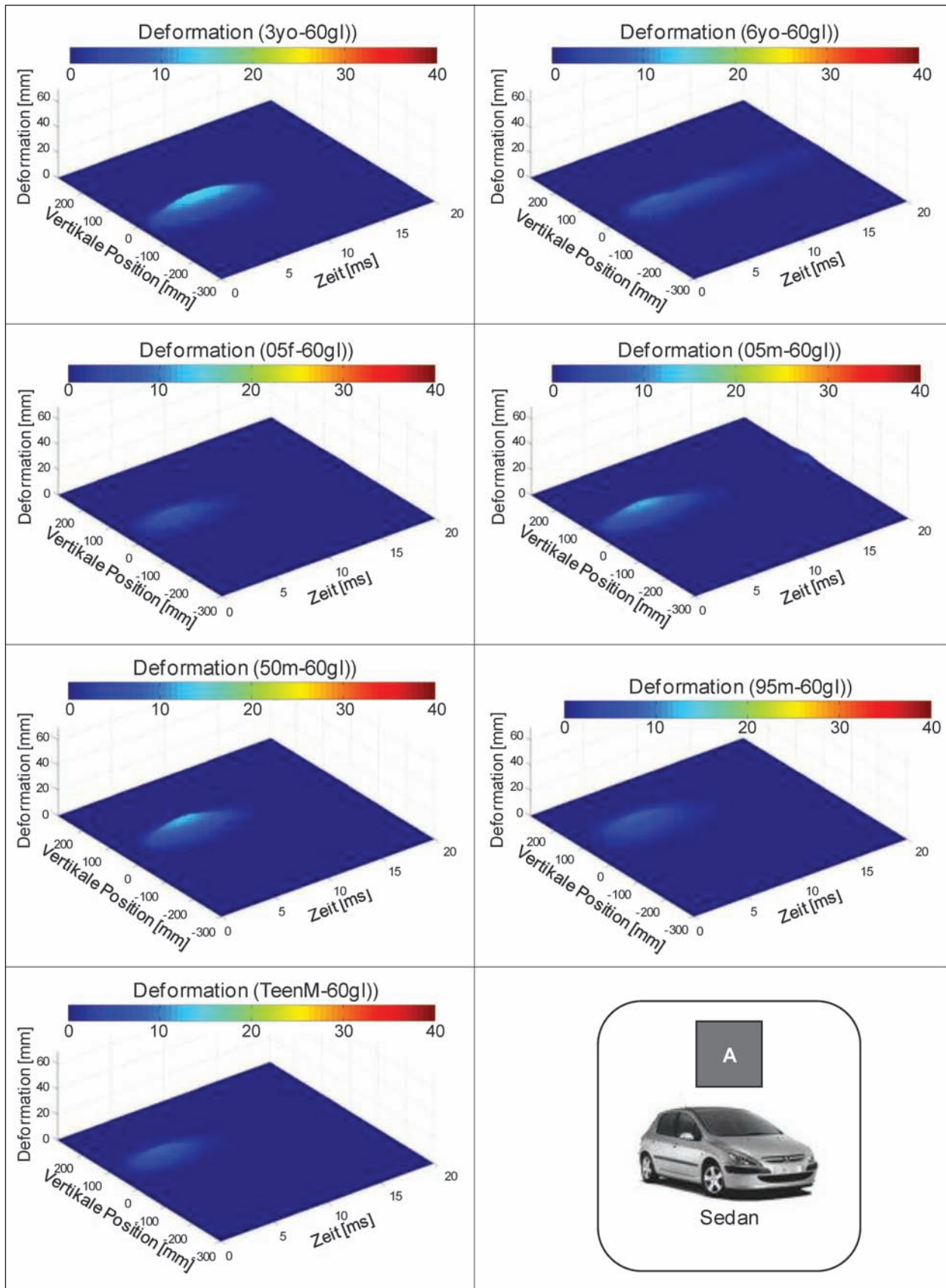


Bild 113: Deformation der mittleren Knotenreihe des mittleren Lastpfads der Kategorie A bei einer Formteildichte von 60 g/l

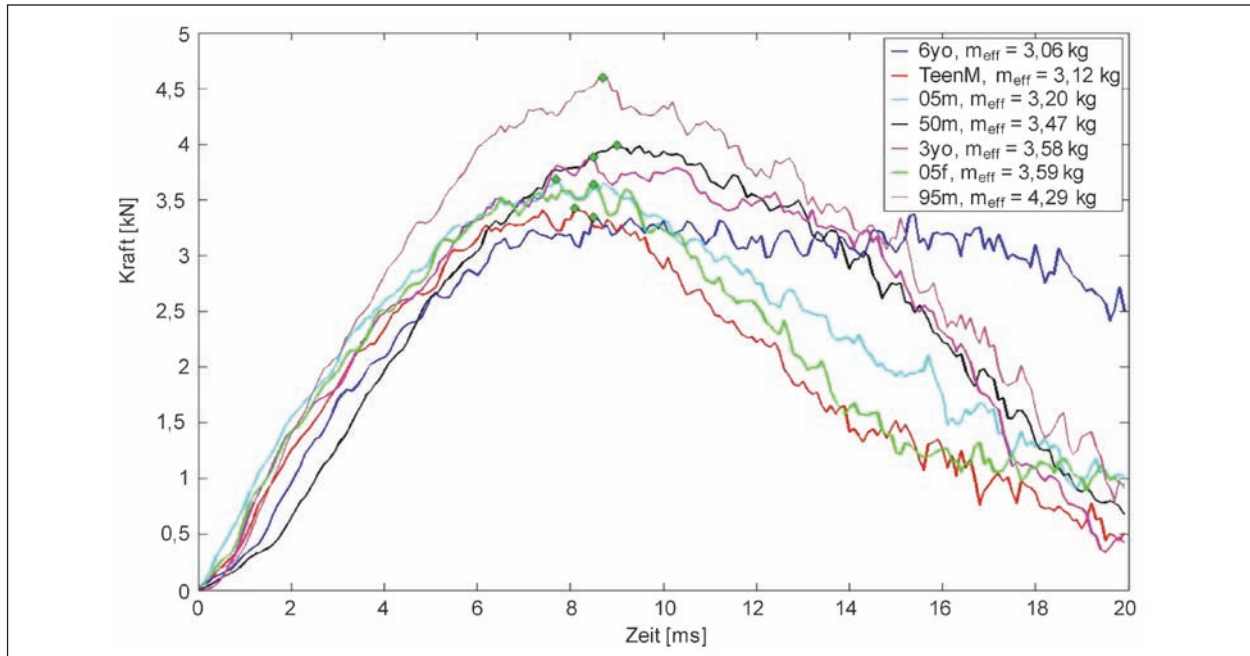


Bild 114: Kontaktkraft des mittleren Lastpfads für Kategorie A bei 30 g/l

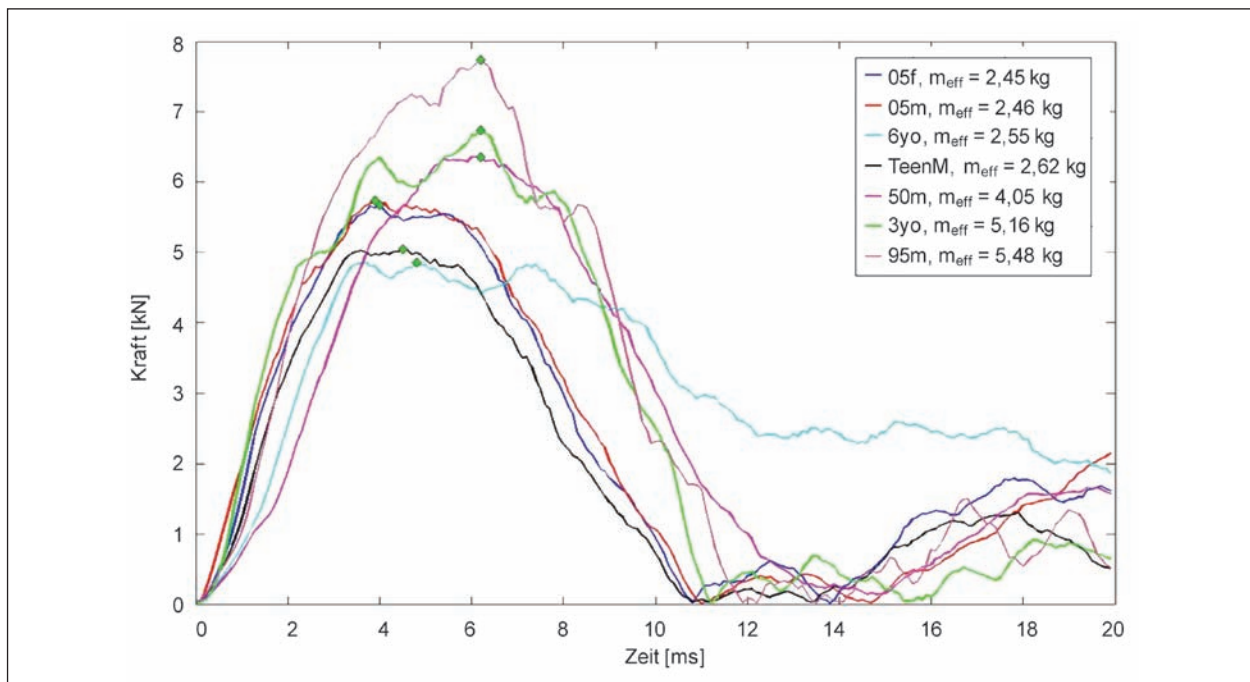


Bild 115: Kontaktkraft des mittleren Lastpfads für Kategorie A bei 60 g/l

8 Literatur

- AUTOLIV: Autoliv press conference at the IAA, Pedestrian Protection, 12. September 2001
- Automobil-Produktion: Aufträge von A-Z, Automobil-Produktion, Februar 2008
- BACH, P., BINDGES, W., ZOPPKE, H.: Sensorsystem für aktive Motorhauben auf dem Prüfstand, Kinotex Sensor GmbH, Institut für Fahrzeugtechnik, Fachhochschule Trier, ATZ, Jahrgang 108, 05/2006
- BAUMANN, K.-H.: Aktive Fronthaube, EP1350694B1, Anmeldetag 01.04.03, Offenlegungstag 08.10.03, DaimlerChrysler AG, 2004
- BIECK, W., HOFINGER, H., MOUSEL, T.: Sensor Application for Improved Pedestrian Protection, ATZ autotechnology, 2008
- BIECK, W.: FE-based pedestrian modeling to simulate the collision process with a car front-end, Praxiskonferenz Fußgängerschutz, 2010
- Bluebook: Test procedure for head protection of pedestrians, Automobile Type Approval Handbook for Japanese Certification ("Blue Book") mit den Ergänzungen in TRIAS 63, Japan, 2005
- BOVENKERK, J., LORENZ, B., ZANDER, O.: Expertenhearing, Entwicklung eines Prüfverfahrens für den Windschutzscheibenbereich, Projekt FE 82.0229/2002, Dezember 2006
- BOVENKERK, J.: Schutz von Fußgängern beim Scheibenanprall II, 1. Zwischenbericht, Forschungsprojekt FE 82.308/2006, 2008
- BOVENKERK, J.: Workshop on Initial Concepts for New or Improved Vulnerable Road User Test Methods – Edge testing for head impacts, Aprosys WP3.3, Workshop, Brüssel, Juni 2008b
- BOVENKERK, J., DECK, C., WILLINGER, R., TINARD, V., HARDY, R. N.: Review of the current child and adult pedestrian head impact test procedures, Deliverable D3.3.2C, Aprosys, 2008c
- BOVENKERK, J., SCHMITT, F., ERTUGUS, E., KOTNIS, N., ESCHWEILER, P.: Benefits of New Testing Methods for Deployable Pedestrian Protection Systems, Runner-Up Award Winner of 3rd ESV Student Safety Technology Design Competition, Stuttgart, 15.-18. Juni 2009
- BOVENKERK, J.: Fußgängerschutz-Testverfahren für den Frontscheibenbereich am Kraftfahrzeug, Schriftenreihe Automobiltechnik, Dissertation am Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen, Aachen 2009b
- BOVENKERK, J.: Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen University, Abschlussbericht Forschungsprojekt FE 82.308/2006, Schutz von Fußgängern beim Scheibenanprall II, Aachen 2009c
- BREUER, A.: Konzept für ein verbessertes Prüfverfahren zum fahrzeugseitigen Fußgängerschutz, Diplomarbeit am Institut für Kraftfahrzeuge, RWTH Aachen, 2007
- CARE: Care Reports and graphics road fatalities in EU: 2006, ec.europa.eu/transport/roadsafety/library/care/doc/annual/statistics/, European Commission, April 2008
- CARTER, E.: Technical Report Aprosys AP3, Definition of vehicle and pedestrian/cyclist impact conditions, UK national epidemiological studies on pedestrian and cyclist accidents, 2005
- CHALANDON, S., SERRE, T., MASSON, C., MINNE, F., ARNOUX, P.-J., PERRIN, C., BORDE, P., COTTE, C., BRUNET, C., CESARI, D.: A Comparative Study Between Subsystem and Global Approaches for the Pedestrian Impact, ESV-Conference, 07-0429, 2007
- Concept: Concept 6yo PDI, User Manual, Detailed Specification, Detailed Certification Procedure, Version 1.0, 2009
- Concept: Aktive Motorhaube, Flyer Concept, Concept Technologie GmbH, 2005
- DREYER, B., SCHÄFER, J., WIESINGER, E., WICH, R., THIELERT, A.: Pyrotechnischer Aktuator mit Filter, DE102008020087A1, Anmeldetag 22.04.08, Offenlegungstag 29.10.09, GM Global Technology Operations Inc., 2009
- ECE: United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), Informal document GR/PS/141 Rev. 1, Certification Standard for Type Approval Testing of Active Deployable Systems of the Bonnet Area, UNECE, Genf, Juli 2005

- ECE: United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), Statistics of road traffic accidents in Europe and North America, 2007
- ECE: Regulations of the United Nations Economic Commission for Europe, ECE-R21: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeuge hinsichtlich ihrer Innenausstattung, veröffentlicht: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, www.bmvbs.de, 2007a
- ECE: Verordnung (EG) Nr. 78/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen im Hinblick auf den Schutz von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern, Januar 2009
- ECE: Verordnung (EG) Nr. 631/2009 der Kommission mit Durchführungsbestimmungen für Anhang I der Verordnung (EG) Nr. 78/2009, Juli 2009b
- ECE: Regelung Nr. 25 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) – Einheitliche Vorschriften für die Genehmigung von in Fahrzeugsitze einbezogenen und von nicht einbezogenen Kopfstützen, August 2010
- EEVC: European Experimental Vehicles Committee, Proposals for test methods to evaluate pedestrian protection for cars, EEVC Working Group 10 report, 13th ESV Conference, Paris, November 1991
- EPPINGER, R. H., PRITZ, H. B.: Development of a Simplified Vehicle Performance Requirement for Pedestrian Injury Mitigation, ESV Conference, 1979
- Euro NCAP: European new car assessment programme Pedestrian Testing Protocol, Version 5.3.1, Brüssel, November 2011
- Euro NCAP: European new car assessment programme Pedestrian Testing Protocol, Version 6.2, Brüssel, Dezember 2012
- FARS: Fatality Analysis Reporting System, (Abruf: 01.07.2010), www-fars.nhtsa.dot.gov/People/PeopleAllVictims.aspx
- FERREIRA, A. S., DRIEMEIER, L.: Influence of free space from rigid under hood components to bonnet external surface in Pedestrian Injuries when impacted by vehicles, SAE 2010-36-0013
- FISCHER, J., KRETSCHMAR, A., BÖHEIM, J., HOFFMANN, J., HEITZER, G.: Fußgängerschutzsystem und Verfahren zum Schutz von Fußgängern, DE10256950B4, Anmeldetag 05.12.02, Offenlegungstag 24.06.04, Peguform GmbH, Benteler Automobiltechnik GmbH, Siemens Restraint Systems GmbH, 2007
- FREDRIKSSON, R., HALAND, Y., YANG, J.: Evaluation of a New Pedestrian Head Injury Protection System with a Sensor in the Bumper and Lifting of the Bonnet's Rear Part, 17. ESV Conference, Autoliv, 2001
- FSR: Der FSR-Sensor, Electrade, www.electrade.com, Abruf am: 01.04.2010
- GLÄSER, S., GÜMPEL, P., KILPERT, H., STRITTMATTER, J.: Schnellschaltende Aktoren für adaptive Sicherheitssysteme in Kraftfahrzeugen, Fachhochschule Konstanz, 2005
- GOSEBERG, F.: Der Fußgängerschutz aus Sicht eines Systemlieferanten, Magna Electronics Europe, Praxiskonferenz Fußgängerschutz, 2006
- GOSEBERG, F.: Märkte – Merkmale – Maßnahmen. Der ganzheitliche Fußgängerschutz. Magna Electronics Europe, Praxiskonferenz Fußgängerschutz, 2007
- GURDJIAN, E., LISSNER, H., LATIMER, R., HADDAD, B., WEBSTER, J.: Quantitative determination of acceleration and intercranial pressure in experimental head injury, Neurology, Vol. 3, pp. 417-423, 1953
- GTR: Global technical regulation No. 9, Pedestrian Safety, Januar 2009
- HALLIK, M., RANKER, N.: Kraftfahrzeug mit aktivem Fußgängerschutz, DE102004029757A1 Anmeldetag 19.06.04, Offenlegungstag 05.01.06, Adam Opel AG, 2006
- HOFFMANN, J., KRETSCHMAR, A.: Aktiv-reversible Schutzkonzepte zur Erfüllung der Fußgängerschutzanforderungen nach EEVC WG17, VDI-Berichte, Siemens Restraint Systems GmbH, Alzenau, 2001
- Honda: Honda R&D Americas, Inc., Polar-II-Testing Protocol, 2004

- Honda: Der neue Honda Legend, www.honda.de, Abruf: 16.2.2010, 2006
- HUANG, S.: A Study of an Integrated Safety System for the Protection of Adult Pedestrians from Car Collisions, PHD-Study at the Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, 2010
- HUANG, S., YANG, J., FREDRIKSSON, R.: Performance Analysis of a Bumper-Pedestrian Contact Sensor System by Using Finite Element Models, International Journal of Crashworthiness, April 2008
- HUMANETICS: Pedestrian Headforms, <http://www.humaneticsatd.com/crash-test-dummies/pedestrian/pedestrian-headforms>, Abruf: 01.12.2011
- IEE: Manual – IEE Leg Impactor, IEE “Lower Limit” Leg Impactor – User Manual, Version 1.1, 2009
- IMVITER: Implementation of Virtual TEsting in safety Regulations, IMVITER, <http://www.imviter.com/index>, Aufruf: März 2012
- Jaguar : Jaguar XK, www.jaguar.de, 2005
- Jaguar : Der neue Jaguar XF, Presseinformation, Jaguar, 2007
- JI, M.: The Crash Depth Necessary in the Frontal Structure of a Car for Pedestrian Head Protection, SAE 2009-01-1207
- JUNGMANN, T.: Nissan forciert Fußgängerschutz, ATZ, GWV Fachverlag GmbH, 2007
- JUNGMANN, T.: DuPont: Außenhaut aus Hytrel schützt Fußgängerschutzsensor, ATZ, GWV Fachverlag GmbH, 2008
- KINSKY, T.: Fußgängerschutz als Herausforderung für den modernen Automobilbau, 18. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2009
- KINSKY, T.: Development of the Second Generation of the Pedestrian Detection Impactor (PDI-2), Experthearing Testprocedure for APP-Systems, Aachen, 16. September 2011
- KNOLL, T.: Bosch-System bringt mehr Schutz für Fußgänger und Radfahrer, Presseinformation Bosch PI 5898 AE, September 2007
- KOBIELA, A., KOEHNSEN, R., MEINERT, H.-D.: Anordnung einer Frontklappe, DE1020070247 83A1, Anmeldetag 26.05.07, Offenlegungstag: 27.11.08, AKsys GmbH, 2008
- KÜHN, M.: Weiterentwicklung von Fußgänger-Komponententests, Fortschr.-Ber. VDI-Reihe 12 Nr. 573, Düsseldorf, VDI-Verlag, 2004
- KÜHN, M., FRÖMING, R., SCHINDLER, V.: Fußgängerschutz Unfallgeschehen, Fahrzeuggestaltung, Testverfahren, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007
- LAWRENCE, G. J. L., HARDY, B. J., CARROLL, J. A., DONALDSON, W. M. S., VISVIKIS, C., PEEL, D. A., KNIGHT, I. M.: A study on the feasibility of measures relating to the protection of pedestrians and other vulnerable road users, Final project report UPR/VE/045/06, TRL, Oktober 2006
- LEE, K. B., JUNG, H. J., BAE, H. I.: The Study on Developing Active Hood Lift System for Decreasing Pedestrian Head Injury, 20. ESV Conference, Hyundai, 2007
- LIERS, H.: Analyse des Unfallgeschehens zwischen Pkw und Fahrrädern im Hinblick auf passive Schutzmaßnahmen, Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH, 6. Praxis-konferenz Fußgängerschutz, 2011
- MADYMO: Human Models Manual, Release 7.0, November 2008
- MADYMO: Utilities Manual, Release 7.0, December 2008a
- MANNING, J.: Development of a Pedestrian Legform to Assess Sensors Used in Active Pedestrian Protection Systems, ESV Conference, 2007
- MANNING, J.: TRL SensorLeg – User Manual, 2008
- MARX, E.: FE-basierte Simulation von Fußgänger-Fahrzeug-Kollisionen zur Sensorauslegung im Falle aktiver Schutzvorrichtungen, ANSYS Conference & 28th CADFEM Users' Meeting, 2010
- MARX, E.: Einfluss verschiedener Fahrzeugfrontsteifigkeiten auf das Beschleunigungsverhalten des IEE-Impaktors, Projektbezogene Abstimmung mit IEE, 2011
- MARX, E.: FE-based Human model for the simulation of the initial pedestrian-vehicle con-

- tact, 3rd International Symposium on „Human Modelling and Simulation in Automotive Engineering“, 2011a
- MARX, E., BIECK, W., MOUSEL, T.: Impactor Development for the Assessment of Active Pedestrian Protection Systems, ESV-Conference, 11-0177, 2011b
- MASSON, C., SERRE, T., CESARI, D.: Pedestrian-Vehicle Accident: Analysis of 4 Full Scale Tests with PMHS, ESV-Conference, 07-0428, 2007
- MATHEVON, V., WILLERTON, M.: Pedestrian Detecting System, WO2004089704A1, Anmeldetag: 08.04.04, Offenlegungstag: 21.04.04, Autoliv, 2004
- MIEDREICH, M., SCHOBER, H.: Fußgängerschutzsystem mit faseroptischem Sensor, Siemens VDO, ATZ, Jahrgang 107, 3/2005
- MOUSEL, T.: IEE “Lower Limit” Impactor, 2008
- NAGATOMI, K., HANAYAMA, K., ISHIZAKI, T., SASAKI, S., MATSUDA, K.: Development and Full-Scale Dummy Tests of a Pop-Up Hood System for Pedestrian Protection, 19. ESV Conference, Honda, 2005
- Nissan: Pop Up Engine Hood For Pedestrian Protection, www.nissan-global.com, 2010
- ÖSTLING M., LILIEBERG H.: Safety Device, WO07045321A1, Anmeldetag: 21.09.06, Offenlegungstag: 26.04.07, Autoliv, 2007
- OTTE, D.: Head Impact Conditions and Injury Pattern in Car Crashes against Pedestrians versus Bicyclists in German In-Depth-Accident-Study GIDAS, I-Crash Conference, 2010
- OTUBUSHIN, A., PAUER, G.: Further Development of the Pedestrian Detection Impactor – PDI-2, 7. Praxiskonferenz Fußgängerschutz, 2012
- PARK, S.-W.: Identification of Object Impact Location and Bumper Stiffness Curve for Pedestrian Protection Systems, SAE 2011-01-0083
- PINECKI, C., ZEITOUNI, R.: Technical solutions for enhancing the pedestrian protection, ESV, Paper Number 07-0307, PSA Peugeot Citroën, Frankreich, 2007
- PINECKI, C., ADALIAN, C., ZEITOUNI, R., KAZUMBA, P.: The Scatter of Pedestrian Upper-Leg Impactor, SAE 09-0262, 2009
- PUPPINI, R.: Integration of virtual testing in regulatory procedures, APROSYS 2nd Virtual Testing Workshop Helmond, Centro Ricerche Fiat (CRF), Januar 2008
- RATHJE, K., BATTERMANN, J.: Entwicklung der aktiven Motorhaube für die neue E-Klasse, Praxiskonferenz Fußgängerschutz, 2009
- ROOIJ, L., MEISSNER, M., BHALLA, K., CRANDALL, J., LONGHITANO, D., TAKAHASHI, Y., DOKKO, Y., KIKUCHI, Y.: The evaluation of the kinematics of the MADYMO human pedestrian model against the experimental tests and the influence of a more biofidelic knee joint, 5. MADYMO Users Meeting of the Americas, Troy, MI, 2003
- ROTH, F., WEISS, C., von NEUMANN-KOSEL, K., SCHRAMM, S.: Neue Testmethoden im Fußgängerschutz, Praxiskonferenz Fußgängerschutz, 2007
- SAE: Surface Vehicle Recommended Practice, SAE International Document j2782 Dummy Task Group, Draft Recommended Practice for Pedestrian Dummy Performance Specifications for a 50th Percentile Male Pedestrian Dummy, www.sae.org, USA, 2007
- SCHÄFER, J.: Aktuator für eine aktive Haube, DE102006040203A1, Anmeldetag: 28.08.06, Offenlegungstag: 06.03.08, GM Global Technology Operations Inc., 2008
- SCHERF, O.: Development and Performance of Contact Sensors for Active Pedestrian Protection Systems, 19. ESV-Konferenz, 2005
- SCHMITT, K.-U., NIEDERER, P. F., MUSER, M. H., WALZ, F.: Trauma-Biomechanik, Verletzungen in Straßenverkehr und Sport, Springer, 2010
- SILVESTRI, C., RAY, M. H.: Development of a Finite Element Model of the Knee-Thigh-Hip of a 50th Perc Male including Ligaments and Muscles, International Journal of Crashworthiness, Vol.14, No.2, pp:215-229, 2009
- STEINHAEUER, M.: Validierung des Materialverhaltens eines Polypropylen-Schaumstoffs mithilfe der Finite-Elemente-Methode, Studienarbeit, RWTH Aachen, 2007

- TAKAHASHI, Y., AKIYAMA, A., OKAMOTO, M.,
Honda R&D Co. Ltd.: Japan, Polar-II Pedestrian
Dummy, 1. VKU Konferenz Fußgängerunfälle
und Fußgängerschutz, Aachen, Dezember 2007
- TAKEDOMI, A., NAKAMURA, A., Airbag device for
car exterior, WO2008117496A1, Anmeldetag:
05.12.07, Offenlegungstag: 02.10.08, Takata
Corporation, 2008
- TILP, J., WALTHER, R., CARSTEN-BEHRENS, S.,
ZEHDER, C., ZOTT, D.: Pedestrian Protection
Based on Combined Sensor Systems, ESV 05-
0156, 2005
- Toyoda: Toyoda Gosei, Messe-Ausstellungsstück
360°-Airbag-Protection, 2008
- UNTAROIU, C. D., SHIN, J., CRANDALL, J. R.,
FREDRIKSSON, R., BOSTROM, O.,
TAKAHASHI, Y., AKIYAMA, A., OKAMOTO, M.,
KIKUCHI, Y.: Development and validation of
pedestrian sedan bucks using finite-element
simulations: a numerical investigation of the
influence of vehicle automatic braking on the
kinematics of the pedestrian involved in vehicle
collisions, International Journal of Crash-
worthiness, 15:5, 491-503, 2010
- WALLENTOWITZ, H., BOVENKERK, J.: Institut für
Krafftahwesen RWTH Aachen, Abschlussbe-
richt Forschungsprojekt FE 82.229/2002, Schutz
von Fußgängern beim Scheibenaufprall, BAST-
Forschungsbericht, Bergisch Gladbach, 2007
- WALLENTOWITZ, H., BOVENKERK, J.: Institut für
Krafftahwesen Aachen, New Protection
Systems and related Testing Methods for Head
Impact of Pedestrians (Paper No. F2008-08-
072), FISITA2008 World Automotive Congress,
München, 14.-19. September 2008
- WALLNER, S.: Deployable Bonnet Sensor Systems
for the BMW 7 Series and 5 Series, Expert-
hearing Testprocedure for APP-Systems,
Aachen, 29. April 2010
- WU, J., BEAUDET, B.: Optimization of Head Impact
Waveform to Minimize HIC, SAE 2007-01-0759
- YASUKI, T.: Development of THUMS Version 4,
Human Modelling and Simulation in Automotive
Engineering, 3rd International Symposium,
Aschaffenburg, 2011
- ZANDER, A.: Alternative Sensierungskonzepte zur
Seitencrash-Erkennung, Fortschritt-Bericht VDI,
Reihe 12, Nr. 560, Halberstadt, 2003

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

2000

- F 29: Verkehrssicherheit runderneuerter Reifen
Teil 1: Verkehrssicherheit runderneuerter PKW-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 – Fahr-
zeugsicherheit '95 – Analyse aus Erhebungen am Unfallort
Otte € 12,50
- F 32: Die Fahrzeugtechnische Versuchsanlage der BAST – Ein-
weihung mit Verleihung des Verkehrssicherheitspreises 2000 am
4. und 5. Mai 2000 in Bergisch Gladbach € 14,00

2001

- F 33: Sicherheitsbelange aktiver Fahrdynamikregelungen
Gaupp, Wobben, Horn, Seemann € 17,00
- 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 Fußgänger-
schutzes
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: Entwicklung eines Prüfverfahrens 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 Notausstieg-
systems bei Reisebussen
Krieg, Rüter, Weißgerber € 15,00

- F 43: Testverfahren zur Bewertung und Verbesserung von Kin-
derschutzsystemen 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 Fahrerinformations-sys-
temen
Jahn, Oehme, Rösler, Krens € 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, Rucker, Bürkle, 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

- F 53: Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbag
Klanner, Ambos, Paulus, Hummel, Langwieder, Köster € 15,00

- F 54: Gefährdung von Fußgängern und Radfahrern an Kreuzungen
durch rechts abbiegende Lkw
Niewöhner, Berg € 16,50

2005

- F 55: 1st International Conference on ESAR „Expert Symposium
on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on
3rd/4th September 2004 at Hannover Medical School € 29,00

2006

- F 56: Untersuchung von Verkehrssicherheitsaspekten durch die
Verwendung asphärischer Außenspiegel
Bach, Rüter, Carstengerdes, Wender, Otte € 17,00

- F 57: Untersuchung von Reifen mit Notlaufeigenschaften
Gail, Pullwitt, Sander, Lorig, Bartels € 15,00

- F 58: Bestimmung von Nutzfahrzeugemissionsfaktoren
Steven, Kleinebrahm € 15,50

- F 59: Hochrechnung von Daten aus Erhebungen am Unfallort
Hautzinger, Pfeiffer, Schmidt € 15,50

- F 60: Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme
aus Sicht der Verkehrssicherheit
Vollrath, Briest, Schießl, Drewes, Becker € 16,50

2007

- F 61: 2nd International Conference on ESAR „Expert Symposium
on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on
1st/2nd September 2006 at Hannover Medical School € 30,00

- F 62: Einfluss des Versicherungs-Einstufungstests auf die Belan-
ge der passiven Sicherheit
Rüter, Zoppke, Bach, Carstengerdes € 16,50

- F 63: Nutzerseitiger Fehlgebrauch von Fahrerassistenzsystemen
Marberger € 14,50

F 64: Anforderungen an Helme für Motorradfahrer zur Motorradsicherheit

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Schüler, Adolph, Steinmann, Ionescu € 22,00

F 65: Entwicklung von Kriterien zur Bewertung der Fahrzeugbelastung im Hinblick auf ein NCAP für aktive Fahrzeugsicherheit
Manz, Kooß, Klinger, Schellinger € 17,50

2008

F 66: Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen
Jebas, Schellinger, Klinger, Manz, Kooß € 15,50

F 67: Optimierung von Kinderschutzsystemen im Pkw
Weber € 20,00

F 68: Cost-benefit analysis for ABS of motorcycles
Baum, Westerkamp, Geißler € 20,00

F 69: Fahrzeuggestützte Notrufsysteme (eCall) für die Verkehrssicherheit in Deutschland
Auerbach, Issing, Karrer, Steffens € 18,00

F 70: Einfluss verbesserter Fahrzeugsicherheit bei Pkw auf die Entwicklung von Landstraßenunfällen
Gail, Pöppel-Decker, Lorig, Eggers, Lerner, Ellmers € 13,50

2009

F 71: Erkennbarkeit von Motorrädern am Tag – Untersuchungen zum vorderen Signalbild
Bartels, Sander € 13,50

F 72: 3rd International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on 5th / 6th September 2008 at Hannover Medical School € 29,50

F 73: Objektive Erkennung kritischer Fahrsituationen von Motorrädern
Seiniger, Winner € 16,50

2010

F 74: Auswirkungen des Fahrens mit Tempomat und ACC auf das Fahrerverhalten
Vollrath, Briest, Oeltze € 15,50

F 75: Fehlgebrauch der Airbagabschaltung bei der Beförderung von Kindern in Kinderschutzsystemen
Müller, Johannsen, Fastenmaier € 15,50

2011

F 76: Schutz von Fußgängern beim Scheibenanprall II
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Bovenkerk, Gies, Urban € 19,50

F 77: 4th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 29,50

F 78: Elektronische Manipulation von Fahrzeug- und Infrastruktursystemen
Dittmann, Hoppe, Kiltz, Tuchscheerer € 17,50

F 79: Internationale und nationale Telematik-Leitbilder und IST-Architekturen im Straßenverkehr
Boltze, Krüger, Reusswig, Hillebrand € 22,00

F 80: Untersuchungskonzepte für die Evaluation von Systemen zur Erkennung des Fahrerzustands
Eichinger € 15,00

F 81: Potential aktiver Fahrwerke für die Fahrsicherheit von Motorrädern

Wunram, Eckstein, Rettweiler € 15,50

F 82: Qualität von on-trip Verkehrsinformationen im Straßenverkehr – Quality of on-trip road traffic information – BAST-Kolloquium 23. & 24.03.2011

Lotz, Luks € 17,50
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

2012

F 83: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung – Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe
Gasser, Arzt, Ayoubi, Bartels, Bürkle, Eier, Flemisch, Häcker, Hesse, Huber, Lotz, Maurer, Ruth-Schumacher, Schwarz, Vogt € 19,50

F 84: Sicherheitswirkungen von Verkehrsinformationen – Entwicklung und Evaluation verschiedener Warnkonzepte für Stauendwarnungen
Bogenberger, Dinkel, Totzke, Naujoks, Mühlbacher € 17,00

F 85: Cooperative Systems Stakeholder Analysis
Schindhelm, Calderaro, Udin, Larsson, Kernstock, Jandrisits, Ricci, Geißler, Herb, Vierkötter € 15,50

2013

F 86: Experimentelle Untersuchung zur Unterstützung der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen für ältere Kraftfahrer
Hoffmann, Wipking, Blanke, Falkenstein € 16,50

F 87: 5th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 88: Comparative tests with laminated safety glass panes and polycarbonate panes
Gehring, Zander € 14,00

F 89: Erfassung der Fahrermüdigkeit
Platho, Pietrek, Kolrep € 16,50

F 90: Aktive Systeme der passiven Fahrzeugsicherheit
Nuß, Eckstein, Berger € 17,90

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen
Tel. (0421) 3 69 03-53
Fax (0421) 3 69 03-48
www.schuenemann-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.