

Schutz von Fußgängern beim Scheibenanprall II

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 76

bast

Schutz von Fußgängern beim Scheibenanprall II

von

Jens Bovenkerk
Stefan Gies
Peter Urban

Institut für Kraftfahrzeuge
RWTH Aachen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 76

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 beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 82.308/2006:
Schutz von Fußgängern beim Scheibenanprall II

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

ISSN 0943-9307
ISBN 978-3-86918-091-5

Bergisch Gladbach, Dezember 2010

Kurzfassung · Abstract

Schutz von Fußgängern beim Scheibenanprall II

Neben der zunehmenden Bedeutung der aktiven Sicherheit bleiben Maßnahmen der passiven Sicherheit bei der Entwicklung moderner Kraftfahrzeuge unabdingbar. Die Weiterentwicklung von Maßnahmen zum passiven Fußgängerschutz war zunächst größtenteils durch Verbraucherschutztests wie z. B. Euro NCAP oder JNCAP getrieben und ist nun auch durch gesetzliche Regelungen verpflichtend geworden.

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein hybrides Testverfahren bestehend aus Versuch und Simulation ausgearbeitet, das den Bereich der Windschutzscheibe und dabei auch crashaktive Systeme wie Airbags berücksichtigt. Das Testverfahren kombiniert Komponentenversuche mit einem Simulationsteil, in dem Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen und Impaktorsimulationen durchgeführt werden. Zusätzliche Dummyversuche dienen zur Bewertung des Testverfahrens.

Alle erarbeiteten virtuellen und realen Testmethoden wurden an einem Referenzfahrzeug (Opel Signum), welches repräsentativ für eine durchschnittliche Mittelklasselimousine steht, durchgeführt. Das Fahrzeug wurde mit einem Airbagsystem ausgerüstet und der Testprozedur mit und ohne dieses System vergleichend unterzogen.

Innerhalb dieser Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass es neue Testmethoden unter Ausnutzung von Simulationen und Komponententests erlauben, realistischere Versuchsbedingungen unter Berücksichtigung von potenziellen Kopfaufprallpositionen und -zeiten zu definieren. Dabei können sehr gute Übereinstimmungen zwischen Fußgängersimulation und Dummyversuch erreicht werden. Die Randbedingungen für den Kopfaufprall und die Aufprallzeit wurden durch den Einsatz von Fußgängermodellen ermittelt. Weiterhin ermöglichen die Simulationen, zusätzliche Einflussdaten wie Vektoren mit den Kopfaufprallgeschwindigkeiten und -winkeln zu bestimmen.

Pedestrian Protection in Case of Windscreen Impact II

Besides the increasing importance of active safety, measures relating to the passive safety of vehicles remain indispensable. Further development of passive pedestrian protection was mainly driven by consumer testing in Euro NCAP or JNCAP. In addition the pedestrian safety requirements are also mandatory prescribed in legislation.

In the context of this research project a hybrid test procedure containing real-world testing and simulation has been proposed. This testing procedure takes the area of the windscreen and also appropriate vehicle systems like airbags into account, which cover the rigid structures. In this procedure the real-world tests considering impactor tests are combined with a virtual part which contains vehicle-pedestrian-simulations and simulations of impactor tests. Additional dummytests were used for evaluation of the test procedure.

These real-world tests and virtual tests are demonstrated on a reference vehicle (Opel Signum), which is representative for an average sedan shaped medium class vehicle. The vehicle was equipped with an airbag system and has been evaluated in the new testing procedure in a comparative analysis with and without this system.

Within these investigations it could be shown that the new hybrid test procedure containing simulation and real-world testing enables the definition of more realistic testing conditions under consideration of potential head impact locations and the corresponding timings. Furthermore very good correlations between the vehicle-pedestrian-simulations and the dummytest could be achieved. The boundary conditions for the head impact and the timing are derived from the application of pedestrian models. In addition, the simulations allow the determination of influencing parameters like the vectors for head impact velocity and angles.

Inhalt

1	Einleitung	5
2	Stand der Technik zu Testverfahren	7
2.1	Testverfahren.....	7
2.1.1	Aktuelle Testverfahren.....	8
2.1.2	Technische Grundlagen	10
2.2	Weiterentwicklung von Prüfverfahren.....	11
3	Erweiterte Kinematikanalyse mit Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen	15
3.1	Digitale Simulationsmodelle.....	15
3.2	Aufprallkinematik in unterschiedlichen Fahrzeugkategorien	17
3.2.1	Winkel des Geschwindigkeitsvektors zur Horizontalen	19
3.2.2	Relativgeschwindigkeiten und Aufprallzeiten des Kopfes	20
3.2.3	Aufprallorte am Fahrzeug	24
3.3	Aufprallkinematik bei 3D-Modellen aktueller Fahrzeuge.....	25
4	Anforderungen und Randbedingungen zur Ausarbeitung des Testverfahrens	28
4.1	Allgemeine Anforderungen	28
4.1.1	Robustheit.....	28
4.1.2	Prüfkörper	28
4.2	Anforderungen zur Nutzung existierender Methoden	28
4.2.1	Anwendungsbereich	28
4.2.2	Fahrzeugeinteilung und -kategorien	30
4.3	Ableitung von Parametern für den Kopfaufprallversuch	32
4.3.1	Impaktoren.....	32
4.3.2	Geschwindigkeit.....	33
4.3.3	Winkel.....	33
4.3.4	Testbereiche	34
4.3.5	Bedingungen für crashaktive Systeme.....	36
4.3.6	Verletzungskriterium	37
4.3.7	Zusammenfassung der Parameter für den Kopfaufpralltest.....	40
5	Auslegung des Testverfahrens für crashaktive Systeme	41
5.1	Referenzfahrzeug mit Airbag in der Simulation	42
5.2	Modifiziertes Referenzfahrzeug mit Airbagsystem	44
5.3	Dummyversuch.....	48
5.3.1	Polar-II-Fußgängerdummy	48
5.3.2	Testkonfiguration	49
5.3.3	Versuchsdurchführung	52
5.3.4	Messergebnisse.....	54

5.4	Hybrides Testverfahren.....	56
5.4.1	Simulationsmodelle für den virtuellen Test.....	59
5.4.1.1	Bewertung der Modelle.....	59
5.4.1.2	Auswahl zur Simulationsdurchführung.....	59
5.4.2	Funktionsnachweis.....	60
5.4.2.1	Sensortest und Systemantwortzeit.....	60
5.4.2.2	Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen für den Kopfaufprall.....	61
5.4.3	Testpunktauswahl.....	63
5.4.4	Impaktorsimulation.....	65
5.4.5	Impaktorversuche.....	67
5.4.5.1	Versuchsaufbau.....	67
5.4.5.2	Impaktorversuche am Serienfahrzeug.....	68
5.4.5.3	Dynamische Versuche am modifizierten Fahrzeug.....	68
5.4.5.4	Vergleich mit Simulationsergebnissen.....	74
5.4.6	Bewertung von Halsbelastungen.....	75
5.4.6.1	Biomechanische Grundlagen zur Bewertung der Halsbelastung.....	75
5.4.6.2	Bewertung von Halsbelastungen.....	76
5.5	Ablaufplan des Testverfahrens für den Frontscheibenbereich.....	82
6	Bewertung des hybriden Testverfahrens.....	87
7	Zusammenfassung.....	92
8	Formelzeichen und Abkürzungen.....	95
8.1	Formelzeichen und Indizes.....	95
8.2	Abkürzungen.....	96
9	Literatur.....	98
10	Anhang.....	103
10.1	Definitionen.....	103
10.1.1	Definition der Ausnahmeregelung für „FlatFront-Vehicles“.....	103
10.1.2	Vereinfachung der Prüfwinkel.....	103
10.1.3	Seitliche Begrenzungslinien des Prüfbereichs.....	105
10.2	Aufbau des Rasterfeldes.....	105
10.3	Abwickellängen auf 2D-Profilen.....	106
10.4	Mehrkörpersimulationen mit Real- und Profil-Fahrzeugen.....	107
10.5	HIC-Berechnung für den Rechteckverlauf.....	109
10.6	Modellaufbau.....	111
10.7	Versuchsdetails.....	118
10.8	Ergebnisse einer Expertenbefragung.....	122

1 Einleitung

Der Kopfaufprall von Fußgängern im Bereich der Windschutzscheibe weist bei realen Unfällen eine hohe Relevanz auf [BER00] [WAL07] [CAR05]. Derzeit sind weder ein ausgearbeitetes Prüfverfahren noch verbindliche Grenzwerte für diesen Bereich am Fahrzeug vorhanden, die das reale Unfallgeschehen in ausreichendem Maße berücksichtigen würden.

Im vorangegangenen Forschungsprojekt der BASt FE 82.0229/2002 „Schutz von Fußgängern beim Scheibenaufprall“ ist die Grundlage eines modularen Prüfverfahrens für den Kopfaufprall im Bereich der Windschutzscheibe, bestehend aus einem Versuchs- und einem Simulationsteil, erarbeitet worden. Der darin erarbeitete Entwurf für ein Prüfverfahren soll in diesem Folgeprojekt FE 82.308/2006 zu einem einsatzfähigen Verfahren ausgearbeitet werden, dessen Erarbeitung in dem vorliegenden Abschlussbericht dokumentiert ist. Weiterhin werden die Ergebnisse aus dem parallel laufenden EU-Projekt APROSYS (Advanced Protection Systems) genutzt, in dem ebenfalls der Fußgängerschutz eine wesentliche Rolle spielt.

Für das Vorhaben ist im Rahmen dieses Projektes die Einbeziehung eines crashaktiven Airbagsystems mit Aufbau eines Referenzfahrzeugs in Versuch und Simulation vorgesehen. Es werden Fußgängerdummy-Tests sowie Impaktortests und umfangreiche Simulationsmethoden angewendet. Das gesamte Testverfahren wird am Referenzfahrzeug einer durchschnittlichen Mittelklasselimousine demonstriert.

Ziel bei der Erarbeitung des Prüfverfahrens ist eine Anlehnung an bereits existierende Verfahren, um den Bestrebungen der internationalen Harmonisierung von Testprozeduren nachzukommen. Hierzu wird insbesondere die Globale Technische Regelung (GTR) berücksichtigt. Ergebnisse des vorangegangenen Projektes werden in den einzelnen Abschnitten aufgeführt und weiterentwickelt. Die im Vorprojekt dokumentierten biomechanischen Grundlagen werden an den relevanten Stellen in diesem Bericht aufgegriffen.

In Kapitel 2 wird zunächst der derzeitige Stand der Technik zu Prüfverfahren für den Kopfaufprall sowie das vorangegangene Projekt als Ausgangslage zusammengefasst. Es werden die Entwicklung der Gesetze, Testmethoden von Verbraucherschutzorganisationen, aktuelle Forschungstätigkeiten und alternative Vorschläge vergleichend aufgeführt.

Ein Modellaufbau ist jeweils zum Arbeitspunkt (AP) 1 „Kopfaufpralltest“ in Hardware und

AP 2 „Simulation“ virtuell als Simulationsmodelle notwendig. Dieser Modellaufbau wird jeweils an den relevanten Stellen zu Beginn von Kapitel 3 und Kapitel 5 vorgestellt. Am Hardware-Modell werden im Versuchsteil Dummytests und Komponententests durchgeführt. Die virtuellen Tests an den Simulationsmodellen stützen sich auf Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen sowie Simulationen von Komponententests. Der reale Dummyversuch wird zudem in AP 3 „Bewertung“ des entwickelten modularen bzw. hybriden Prüfverfahrens herangezogen.

Im dritten Kapitel werden die Simulationen von Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen aus dem Vorprojekt erweitert. Die aus den Fahrzeugvermessungen hervorgegangenen generischen Fahrzeugfrontkonturen werden für die Ableitung von Randbedingungen zum Kopfaufpralltest einbezogen. Auf diese Weise können durch einen möglichst allgemeinen Ansatz Randbedingungen für ein universelles Testverfahren abgeleitet werden, die auch zukünftig denkbare Frontkonturen einbeziehen.

In Kapitel 4 wird auf Basis allgemeiner Anforderungen an Prüfverfahren der Anwendungsbereich festgelegt, d. h. welche Fahrzeuge in einem derartigen Testverfahren berücksichtigt werden. Hierbei handelt es sich vorwiegend um Fahrzeuge, die im innerstädtischen Verkehr vorkommen und eine entsprechende Geometrie und Anordnung von Motorhaube und Windschutzscheibe aufweisen. Lkw werden hierbei ausgenommen und sind nicht Bestandteil dieses Projekts. Die Definition und Einteilung der Fahrzeuge in vier Frontkategorien auf Basis des vorangegangenen Projektes gehört zu einer robusten Prüfprozedur, die auch gegenüber zukünftig denkbaren Fahrzeugstrukturen Bestand haben soll. Zudem muss zwischen den zu prüfenden Fahrzeugen mit und ohne crashaktivem System unterschieden werden. Die Anforderungen an crashaktive Systeme werden betrachtet, um ihren möglichen Einsatz in das Prüfverfahren einzubeziehen.

Es werden schließlich die Randbedingungen für ein neues Kopfaufprallprüfverfahren unter Einbindung der Simulation abgeleitet. Die Analyse und Ergänzung der vorliegenden Ergebnisse sowie die Durchführung von Versuchen am realen und virtuellen Fahrzeug führen zu notwendigen Kopfaufprallgeschwindigkeiten sowie -winkeln, Abwickellängen, Impaktormassen und Grenzwerten. Unter Berücksichtigung der realen Aufprallkinematik werden alle Parameter für reale und virtuelle Impaktorversuche definiert, die bei der Nutzung exist-

tierender Komponentenversuche die Voraussetzung für das Prüfverfahren sind.

Die Auslegung des hybriden Prüfverfahrens unter Berücksichtigung crashaktiver Systeme wird in Kapitel 5 zusammen mit den in den jeweiligen Arbeitspunkten betrachteten Versuchen und Simulationen dokumentiert. Nach der Beschreibung des Referenzfahrzeuges wird zunächst die Durchführung der Dummyversuche erläutert. Auf Basis dieser Untersuchungen wird das hybride Prüfverfahren ausgearbeitet. Dieses kombiniert durch eine geeignete Verknüpfung von realen Versuchen und Simulationen die einzelnen Testverfahren, so dass deren einzelne positive Eigenschaften genutzt werden. Ihre negativen Eigenschaften sollen dadurch weitgehend ausgeblendet werden. Zum Abschluss des fünften Kapitels wird ein tabellarischer Ablaufplan für das ausgearbeitete Konzept aus dem Vorprojekt zu dem hybriden Prüfverfahren aufgestellt.

Es folgt in Kapitel 6 eine Bewertung des Verfahrens mit Hilfe des Dummyversuchs. Dieses soll gewährleisten, auch zukünftige Fahrzeuge mit crashaktiven Systemen wie z. B. Airbags und aufstellbaren Motorhauben realitätsnah zu prüfen. In Kapitel 7 werden die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes zusammengefasst. Die Ergebnisse einer anschließend dazu durchgeführten Expertenbefragung sind im Anhang Abschnitt 10.8 aufgeführt.

2 Stand der Technik zu Testverfahren

In diesem Kapitel wird nach einem kurzen geschichtlichen Überblick zum Fußgängerschutz die aktuelle Lage zu existierenden Vorschriften dargestellt. Daran anschließend werden die darin relevanten Entwicklungen sowie das Konzept für ein Testverfahren aus dem Vorprojekt aufgegriffen, an das dieses Forschungsprojekt anknüpft.

2.1 Testverfahren

Die ersten Entwicklungen von Testverfahren zum Fußgängerschutz stammen aus den USA in den 60er Jahren. Bedingt durch steigende Unfallzahlen und die daraus resultierenden Verkehrstoten erließ man dort 1966 das so genannte Verkehrssicherungsgesetz. Dieses bestand jedoch nicht aus einem Testverfahren, sondern beinhaltete einen Aktionsplan zur Unfallvermeidung [KÜH07].

Erste Testvorschriften für den Fußgängerschutz in den USA resultierten aus dem Beginn des „Enhanced Safety of Vehicles“-Programms (ESV) von 1971. Darin wurden methodische Lösungen ausgearbeitet, um Fahrzeuge zum Schutz von schwächeren Verkehrsteilnehmern auszuliegen. Auf der ESV-Konferenz findet seitdem regelmäßig ein Austausch der Forschungsergebnisse unter anderem für den Fußgängerschutz statt.

In den 90er Jahren wurde auf ESV-Konferenzen die Gründung von Arbeitsgruppen zur internationalen Harmonisierung beschlossen, in denen ver-

schiedene Forschungseinrichtungen unter dem Namen „International Harmonized Research Activities“ (IHRA) vertreten sind. Darin ist u. a. die Arbeitsgruppe für den Fußgängerschutz gegründet worden. Ziel ist ein gemeinsamer Lösungsansatz, der auf einer Auswertung aller vorhandenen Forschungsergebnisse basiert [KAN98].

Parallel setzte sich dazu 1970 in Europa mit einem ähnlichen Ansatz das „European Enhanced Vehicle-Safety Committee“ (EEVC) bestehend aus staatlichen Forschungsinstituten zusammen. 1981 wurde ein erster Vorschlag für ein Prüfverfahren vorgestellt, wobei Schutzmaßnahmen im Windschutzscheibenbereich zu dem Zeitpunkt als nicht machbar eingestuft und daher nicht mit einbezogen wurden. In der EEVC Working Group (WG)10 entstand 1994 ein erstes Testverfahren zum Schutz von Fußgängern bei Fahrzeugkollisionen basierend auf Komponententests [EEV94]; dieses wurde 1998 von der EEVC WG17 erstmals überarbeitet und 2002 abschließend aktualisiert [EEV03]. Es bildet die technischen Grundlagen für alle aktuellen Testverfahren, welche die Fahrzeugfronten hinsichtlich des Fußgängerschutzes überprüfen [KIN08] [LOR08].

Im Jahr 2001 legte die EU-Kommission aufgrund der vielen Verkehrstoten in Europa im so genannten „Weißbuch“ das übergeordnete Ziel fest, die Zahl der getöteten Verkehrsteilnehmer innerhalb von zehn Jahren zu halbieren. Abb. 2-1 zeigt den Rückgang der getöteten Fußgänger in Gesamtdeutschland und der durch Verkehrsunfälle getöteten Personen in der EU.

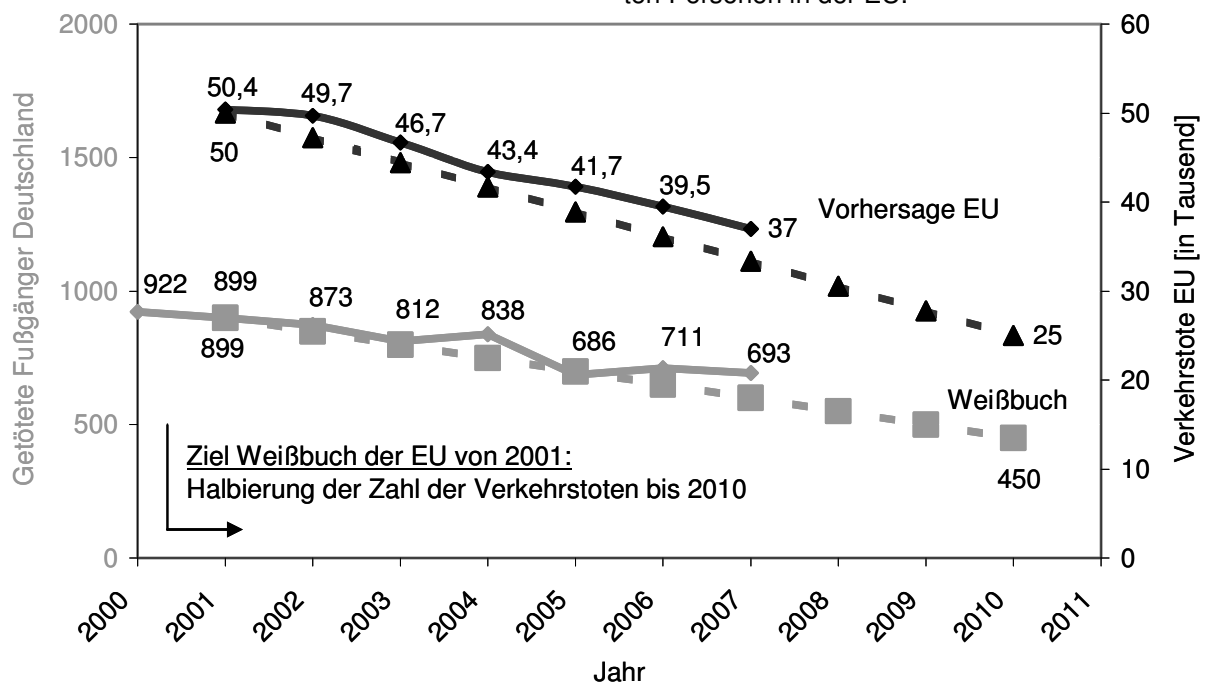


Abb. 2-1: Getötete Fußgänger in Gesamtdeutschland und Europäische Verkehrstote im Vergleich mit den Zielen des Weißbuches der EU [STA08, CAR08]

Mitte 2001 legte der Europäische Automobilhersteller-Verband (European Automobile Manufacturers Association - ACEA) eine freiwillige Selbstverpflichtung zur Gestaltung von Fahrzeugen vor, der sich auch die japanischen und koreanischen Herstellerverbände JAMA und KAMA anschlossen [ACE01]. Die Europäische Kommission stimmte dieser zu, aber erbat die Meinung des EU-Parlamentes und Rates dazu.

Nach der Einforderung einer entsprechenden gesetzlichen Regelung durch das EU-Parlament wurde diese von der Europäischen Kommission auf Grundlage der Selbstverpflichtung ausgearbeitet.

Da in allen vorherigen Diskussionen die technische Machbarkeit des EEVC-Vorschlags nicht untersucht und belegt wurde, folgte der Gesetzesvorschlag einem zwei-stufigen Ansatz. Dabei basiert die erste Phase dieser Richtlinie zunächst auf der Selbstverpflichtung der Industrie. Eine zweite, verschärfte Phase beinhaltete den Vorschlag der EEVC, wobei dessen Durchführbarkeit auf der Basis der ersten Erfahrungen vor der endgültigen Einführung geprüft werden sollte. Die Richtlinie 2003/102/EG [EGR03] wurde schließlich Ende 2003 zur Aufnahme in die Typengenehmigung von Kraftfahrzeugen nach Richtlinie 70/156/EWG [EGR70] verabschiedet und wird seit Februar 2004 durch die technischen Anhänge gemäß Entscheidung 2004/90/EG [EGR04] ergänzt.

2.1.1 Aktuelle Testverfahren

Mit erstmaliger Anwendung der Richtlinie 2003/102/EG in der ersten Phase im Oktober 2005 wurde in Europa erstmals ein Prüfverfahren zum Fußgängerschutz von Fahrzeugen zur gesetzlichen Vorschrift. Die zweite Phase war ursprünglich für September 2010 vorgesehen, allerdings sollte diese zuvor nach Artikel 5 der Richtlinie bis Mitte 2004 der Untersuchung zur technischen Durchführbarkeit unterzogen werden.

Artikel 5 der EU-Richtlinie 2003/102/EG erläutert die Überwachung der Fortschritte der Industrie beim Fußgängerschutz. Die Europäische Kommission hatte die Aufgabe, bis zum 1. Juli 2004 eine unabhängige Durchführbarkeitsbewertung vorzunehmen. Hierbei sollten insbesondere alternative technische Maßnahmen betrachtet werden, die sich entweder aus rein passiven oder einer Kombination aus aktiven und passiven Maßnahmen mit mindestens gleichwertiger Wirksamkeit zusammensetzen können. Basis der Durchführbarkeitsbewertung sind unter anderem praktische Tests

und unabhängige wissenschaftliche Studien. [EGR03]

Die durchgeführten Studien ergeben einheitlich, dass die vorgesehene zweite Phase technisch nicht vollständig umsetzbar ist, wobei die daraus abgeleiteten Anpassungsmaßnahmen zum Teil deutlich voneinander abweichen. Schließlich wurde im Oktober 2006 eine Machbarkeitsstudie des britischen „Transport Research Laboratory“ (TRL) im Auftrag der Kommission veröffentlicht [LAW06], die alle in dem vorherigen Prozess gemachten Vorschläge berücksichtigt. Darin wird festgestellt, dass die technischen Inhalte der zwischenzeitlich entwickelten und im Folgenden erläuterten Globalen Technischen Regelung (GTR) als derzeit beste Lösung übernommen werden sollten. Übereinstimmend mit einer Machbarkeitsstudie der ACEA wird auch die Verwendung eines Bremsassistentensystems (BAS) zur Kombination von aktiver und passiver Sicherheit vorgeschlagen, um die nach Artikel 5 geforderte höhere Effektivität der Schutzmaßnahmen zu erreichen. [KIN08]

Daraufhin wurde im Oktober 2007 ein geänderter Entwurf der zweiten Phase durch die Europäische Kommission vorgelegt [EUP07], der die ursprüngliche zweite Phase gemäß EEVC WG17 ersetzen sollte. Dieser Entwurf wurde im Juni 2008 vom Europäischen Parlament [EUP08] und im Dezember 2008 vom Europäischen Rat verabschiedet und ersetzt zukünftig die Richtlinien 2003/102/EG und 2005/66/EG für Frontschutzsysteme [EGR05]. Er beinhaltet auch die verpflichtende Ausführung mit einem BAS für mehr Effektivität. Nach Veröffentlichung des verabschiedeten Entwurfes im europäischen Amtsblatt wird dieser Entwurf 2009 als Verordnung in Kraft treten.

Parallel zu den Entwicklungen in Europa hatte Japan das Ziel, schnellstmöglich wirksame Fußgängerschutzmaßnahmen umzusetzen. Diese Bestrebungen führten im September 2005 zum Inkrafttreten des Artikels 18 im so genannten „Blue Book“ [BLU05]. Damit war Japan gleichzeitig die weltweit erste Nation mit einer geltenden Fußgängerschutz-Gesetzgebung. Basis zu diesem vom J-MLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Japan) beschlossenen Prüfverfahren bildeten die Vorschläge der IHRA-Arbeitsgruppe. Zukünftig wird die Anwendung der GTR angestrebt, an deren Entwicklung Japan maßgeblich beteiligt ist.

Die Zusammenhänge der Prüfverfahren sind in Abb. 2-2 dargestellt.

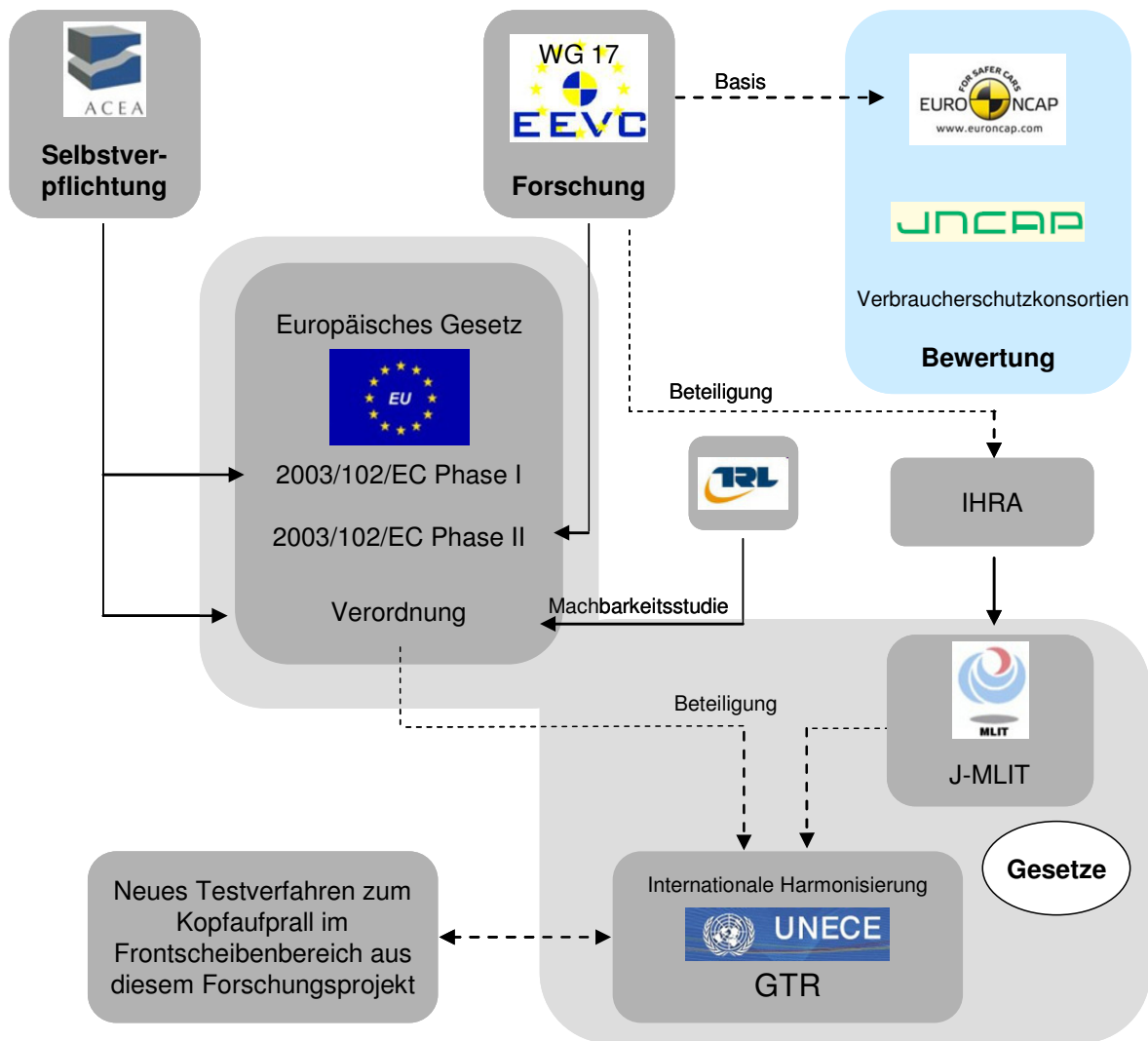


Abb. 2-2: Strukturübersicht Prüfverfahren und Anknüpfung dieses Forschungsprojektes

Die Entwicklung der GTR resultiert aus internationalen Harmonisierungsbestrebungen für Prüfverfahren seitens der UNECE im Rahmen der globalen Expertengruppe „Working Party on Passive Safety“ (GRSP). Die GTR [ECE07] wurde im November 2008 verabschiedet und muss seitdem von den Beitrittsländern umgesetzt werden, zu denen Deutschland ebenfalls zählt. Sie bildet die zukünftige Grundlage für alle weltweiten Gesetze zum Fußgängerschutz.

Neben den gesetzlichen Vorschriften existieren weltweit etablierte Verfahren zur Fahrzeugprüfung bei den Verbraucherschutzorganisationen. In Europa werden seit 1997 im Rahmen von Euro NCAP Neufahrzeuge getestet [EUR08]. Im Unterschied zu den gesetzlichen Verfahren handelt es sich nicht um verbindliche Vorgaben und Grenzwerte, sondern um Bewertungsverfahren. Mit einem Punktesystem werden regelmäßig aktuelle Fahrzeuge untersucht und vergleichend bewertet.

Durch Veröffentlichung der Ergebnisse sollen beispielsweise neuartige Sicherheitslösungen motiviert werden, die über gesetzliche Vorgaben hinaus höhere Anforderungen erfüllen können. Das Testverfahren von Euro NCAP zum Fußgängerschutz basiert auf dem EEVC WG17 Verfahren, das um den Windschutzscheiben- und A-Säulenbereich erweitert ist. Ab Februar 2009 führt Euro NCAP schrittweise ein verändertes Bewertungssystem ein, das die Einzelbewertungen von Insassen-, Kinder- und Fußgängersicherheit sowie „Safety Assist Systems“ in nur einer Wertung verknüpft. Damit kommt dem Fußgängerschutz eine deutlich höhere Bedeutung zuteil.

Neben anderen ähnlichen weltweiten NCAP (New Car Assessment Programme) existiert in Japan das JNCAP [JNC08], das von den Vorschriften der japanischen Gesetzgebung in der Prüfgeschwindigkeit und den HIC-Grenzwerten abweicht. Das australische ANCAP hat seit 1999 sämtliche Prüf-

bedingungen aus Euro NCAP übernommen [ANC08]. Im USNCAP der USA wird über eine entsprechende Einführung eines Prüfverfahrens zum Fußgängerschutz nach Vorliegen der endgültigen GTR entschieden [NHT08].

Die Entwicklung der Testverfahren in Abb. 2-2 gliedert sich in die Prüfung nach Gesetzesanforderung und die Bewertung im Verbraucherschutz. Das in diesem Projekt entwickelte Testverfahren für den Frontscheibenbereich unter Berücksichtigung crashaktiver Systeme knüpft daran an.

Crashaktive Systeme, insbesondere für den Kopfaufprall von Fußgängern im Frontscheibenbereich, bleiben bei den Entwicklungen dieser Testmethoden bisher jedoch weitgehend unberücksichtigt. Im Rahmen der GTR wurde ein Zertifizierungsprotokoll für derartige Systeme entwickelt [ECE05]. Seitens Euro NCAP existieren dazu ebenfalls einige Empfehlungen, die jedoch bisher keine ausgearbeitete Prüfprozedur beinhalten [EUR07].

2.1.2 Technische Grundlagen

Die existierenden Verfahren basieren auf Komponententests, in denen frei fliegende Impaktoren ohne Anbindung am Prüfstand bei Realversuchen zum Einsatz kommen. Der Kopf des Fußgängers wird durch einen Aluminiumkern mit 12 - 14 mm dicker, stoßresistenter Kunststoffhaut abgebildet. Derzeit werden unterschiedliche Impaktoren mit verschiedenen Massen bei identischer Funktion eingesetzt (vgl. Abb. 2-3).

Impaktor	Art (Bezeichnung)	Masse [kg]	Durchmesser [mm]
EEVC	Kinderkopf (EEVC-CH)	2,5	130
	Erwachsenenkopf (EEVC-AH)	4,8	
ISO	Kinderkopf (ISO-CH)	3,5	165
	Erwachsenenkopf (ISO-AH)	4,5	
ACEA	kleiner Erwachsenen- und Kinderkopf (ACEA)	3,5	

Abb. 2-3: Impaktoren [LAW05, LES07, JAM04, EEV03]

Die Masse des Impaktors ist die beim Aufprall durch Interaktion des gesamten Körpers wirksame Masse des Kopfes, d. h. effektive Masse. Dabei wird die Beschleunigung im Schwerpunkt des Im-

paktors mit einem ungedämpften (EG-Richtlinie) bzw. gedämpften (Euro NCAP) Sensor gemessen und nach Filterung (CFC 1000) daraus der HIC-Wert bestimmt (Anm.: „Beschleunigung“ bezieht in den folgenden Untersuchungen im allgemeinen Sinn auch die „Verzögerung“ mit ein).

Zwischen den EEVC-WG17- und den ISO-Impaktoren weichen hinsichtlich der effektiven Masse insbesondere der EEVC-CH mit 2,5 kg und der ISO-CH mit 3,5 kg deutlich voneinander ab. Der 3,5-kg-ACEA-Impaktor als kleiner Erwachsenenkopf ist im Wesentlichen identisch zum ISO-CH. Da bei den ISO- im Vergleich zu den EEVC-Impaktoren der Kinderkopfimpaktor schwerer und gleichzeitig der Erwachsenenkopfimpaktor leichter ist, wird dadurch am Fahrzeug eine gleichmäßigere Auslegung der Struktur hinsichtlich der Steifigkeit erfolgen. Der Durchmesser (\varnothing) beträgt bei allen Impaktoren 165 mm mit der Ausnahme des EEVC-CH mit $\varnothing = 130$ mm (vgl. Abb. 2-3). Eine effektive Masse von 2,5 kg ist für den Durchschnitt eines Kinderkopfes zu gering [LAW06]. Für die Zukunft ist eine vollständige Umstellung auf ISO-Impaktoren in allen Testverfahren zu erwarten. Die Differenz der Massen zwischen ISO-AH (4,5 kg) und EEVC-AH (4,8 kg) ist verhältnismäßig gering, so dass das Aufprallverhalten und die gemessenen Ergebnisse kaum voneinander abweichen (vgl. Vorprojekt FE 82.229/2002).

Die Prüfbedingungen für den Kopfaufpralltest der Globalen Technischen Regelung, an denen sich dieses Projekt im Wesentlichen anlehnt, sind mit denen der neuen EU-Verordnung übereinstimmend. Die EU-Verordnung ist bereits die Umsetzung der GTR für Europa. Charakteristische Merkmale sind die Verwendung der ISO-Impaktoren mit einer Geschwindigkeit von 35 km/h und die Teilung zwischen Kinderkopf- und Erwachsenenkopfaufprallbereich bei einer Abwickellänge („wrap around distance“, WAD) von $WAD_2 = 1700$ mm (vgl. Abb. 2-4).

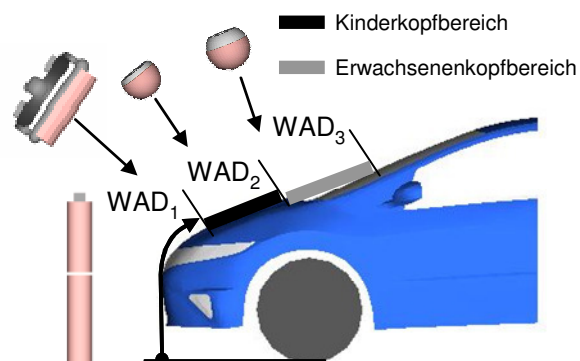


Abb. 2-4: Typische Konfiguration von Fußgängerschutztests mit Abwickellängen

	Vorschrift / Verfahren	Impaktor	Winkel [°]	v [km/h]	Abwickellänge (WAD) [mm]	HIC-Grenzwerte	Testanzahl	Bemerkung
Grundlagen	EEVC WG17	EEVC-CH EEVC-AH	50 65	40	1000 - 1500 1500 - 2100	1000	18	keine WSS keine A-Säule
	TRL Studie	ISO-CH ISO-AH	50 65	40	1000 - 1500 1500 - 2100	1250 (3/4) 2000 (1/4)	-	keine WSS keine A-Säule mit BAS
Gesetzliche Regelungen	Phase I 2003/102/EG ab 01.10.2005	ACEA	50	35	1000 - 2100	1000 (2/3) 2000 (1/3)	18	keine WSS keine A-Säule
		EEVC-AH	35	35	1000 - 2100	Beobachtung	5	Beobachtung WSS keine A-Säule
	Phase II 2003/102/EG	EEVC-CH EEVC-AH	50 65	40	1000 - 1500 1500 - 2100	1000	18	keine WSS keine A-Säule
	Änderung Phase II (Verordnung) R (EC) No. 78/2009 zukünftig	ISO-CH ISO-AH	50 65	35	1000 - 1700 1700 - 2100	1000 (2/3) 1700 (1/3)	18	keine WSS keine A-Säule mit BAS
	J-MLIT Gesetz JP ab 01.09.2005	ISO-CH ISO-AH	Kategorien 25, 50, 60, 65, 90	32	1000 - 1700 1700 - 2100	1000 (2/3) 2000 (1/3)	Mind. 4	keine WSS keine A-Säule
	GTR zukünftig	ISO-CH ISO-AH	50 65	35	1000 - 1700 1700 - 2100	1000 (2/3) 1700 (1/3)	-	keine WSS keine A-Säule mit BAS
Verbraucherschutz	Euro NCAP (ANCAP)	EEVC-CH EEVC-AH	50 65	40	1000 - 1500 1500 - 2100	1000 - 1350	max. 3-24	mit WSS mit A-Säule
	JNCAP	ISO-CH ISO-AH	Kategorien 25, 40, 45, 50, 60, 65, 90	35	1000 - 1350 - 1700 1700 - 2100	650 - 2000	30	mit WSS keine A-Säule

Abb. 2-5: Übersicht der existierenden Testverfahren [LOR08] [JNC08] [BLU05] [EUR08]

Neben den Inhalten der GTR werden in diesem Forschungsprojekt insbesondere die bei den Verbraucherschutz-Testverfahren von Euro NCAP und JNCAP bereits existierenden Erweiterungen des Testbereichs auf die Frontscheibe sowie die Kategorisierungen in den japanischen Verfahren berücksichtigt, die eine Abhängigkeit der Aufprallwinkel sind von der Frontkontur vorsehen.

Abb. 2-5 gibt einen Überblick über die Testkonditionen bestehender und zukünftiger Prüfverfahren. Die derzeitigen Gesetze sind mit dem jeweiligen Einführungsdatum gekennzeichnet.

2.2 Weiterentwicklung von Prüfverfahren

Da Fahrzeugsysteme im Gegensatz zu Testverfahren stetig weiterentwickelt werden, muss die Notwendigkeit einer Anpassung der Testverfahren an neue Anforderungen überprüft werden. Bei den existierenden Verfahren liegt der Bedarf einer Weiterentwicklung in der Berücksichtigung crashaktiver Systeme wie Airbags und aktiver Hauben. So-

wohl die anforderungsgerechte Funktion als auch mögliche Nachteile beim Aufprall müssen berücksichtigt werden.

Für die Entwicklung eines globalen Standards wurde im Rahmen der GTR-Diskussionen ein Zertifizierungsprotokoll für crashaktive Systeme nach Abb. 2-6 vorgeschlagen und akzeptiert. Die Kopfaufprallzeit (HIT) verschiedener Fußgängermodelle wird im ersten Schritt bei definierter Schrittstellung und einer Kollisionsgeschwindigkeit gemäß der vorgesehenen Geschwindigkeit für den Beianprall von 40 km/h ermittelt. In einem zweiten Schritt wird ein Abgleich mit der Systemantwortzeit (Total Response Time, TRT) durchgeführt. Die TRT ergibt sich aus der Sensierzeit (ST) des Kontaktsensors und der Aktivierungszeit (DT) des crashaktiven Systems. Die ermittelte TRT muss kleiner sein als die HIT, so dass sich das crashaktive System vor dem Kopfaufprall in der Endposition befindet. Das System muss sich durch eine ausreichende Standzeit beim Kopfaufprall in aktivierter Stellung befinden.

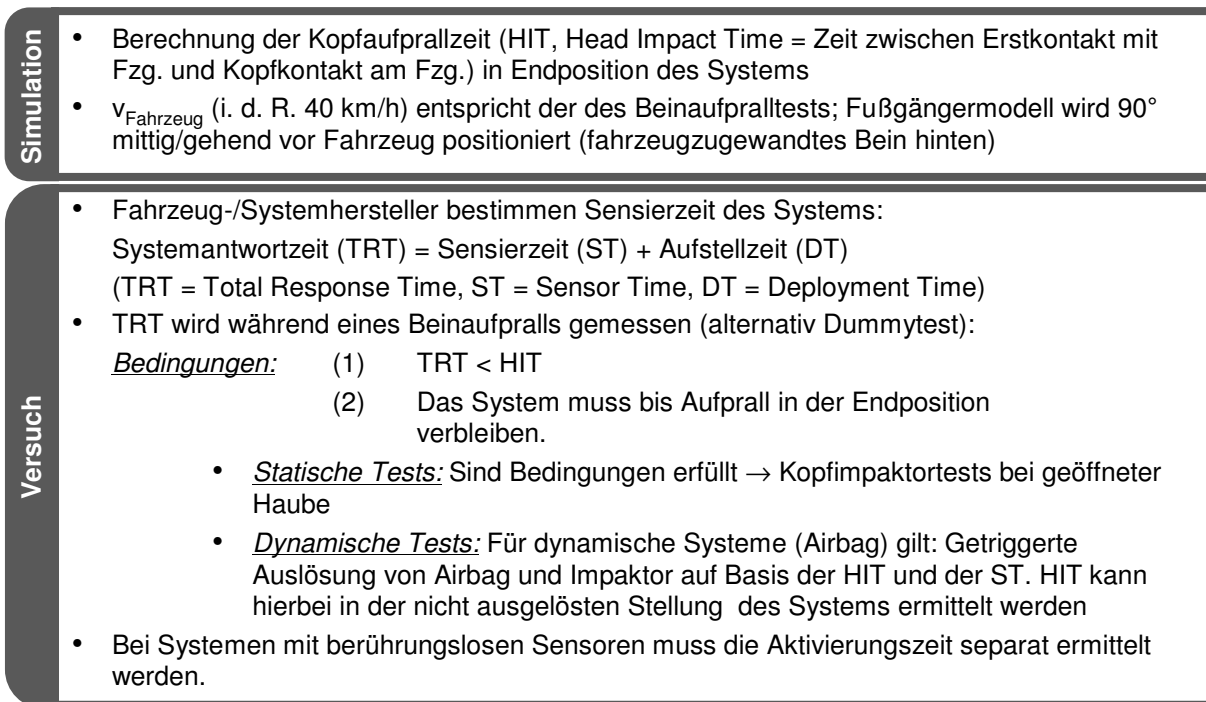


Abb. 2-6: Testprozedur für crashaktive Systeme nach UNECE [ECE05]

Bei den nach der Überprüfung der Systemantwortzeit durchgeführten Impaktortests wird abhängig vom jeweiligen System zwischen statischen und dynamischen Tests unterschieden. Für ein Airbagsystem wird somit in der Regel ein dynamischer Test erforderlich, indem es entsprechend dem realen Unfallgeschehen mit Zeitversatz zu dem Impaktor ausgelöst wird. Durch ein statisches Aufblasen sind derartige Tests im Hinblick auf realistische Verläufe der Airbaginnendrucke nur schwierig zu realisieren

(vgl. Kapitel 5). Der Ablauf dieser Prüfprozedur in Abb. 2-6 ist in die zwei Bereiche Simulation und Versuch gegliedert.

Im vorangegangenen Projekt FE 82.229/2002 wurde die Basis für ein modulares Testverfahren bestehend aus Versuch und Simulation entwickelt. Der Ablauf von Simulation und Versuch ist im Vergleich zum o. g. seriell ausgeführten GTR-Verfahren zunächst parallel (vgl. Abb. 2-7).

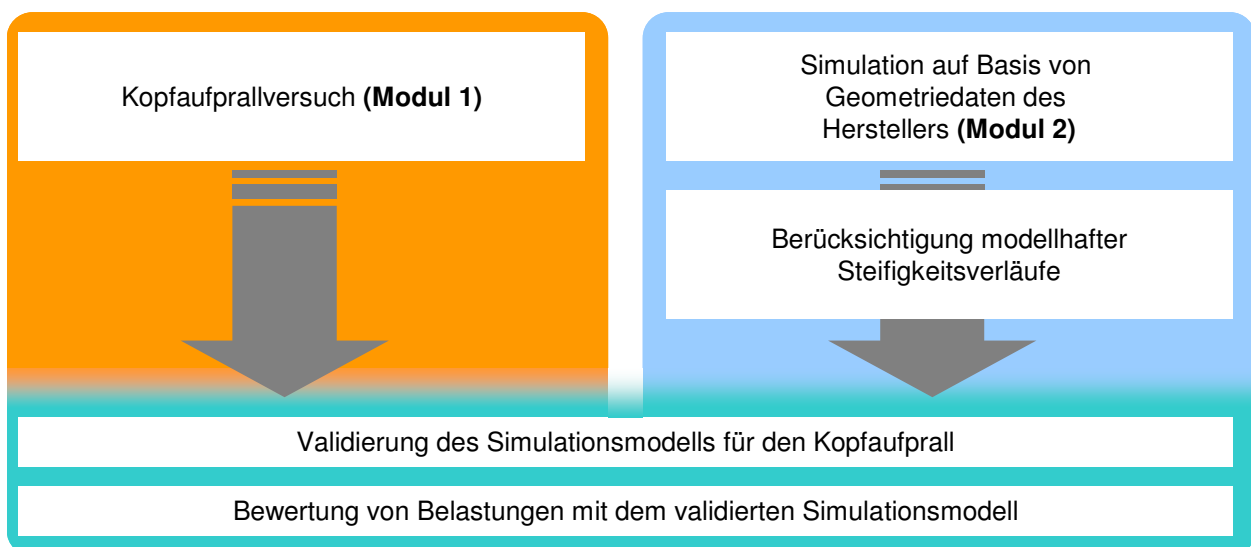


Abb. 2-7: Parallele Struktur des modularen Prüfverfahrens aus FE 82.229/2002 [WAL07]

Mit Hilfe von Impaktorversuchen wird im Versuchsteil die Kopfbelastung getestet. Im Simulationsteil werden insbesondere Halsbelastungen in Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen unter Verwendung von vereinfachten numerischen Fahrzeugfrontmodellen untersucht. Die Simulation der Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen im zweiten Modul stützt sich auf digitalisierte Fahrzeugfronten und berücksichtigt modellhafte Steifigkeitsverläufe für die einzelnen Komponenten, die durch die Impaktortests validiert werden. Die Bewertung von Kopfbelastungen erfolgt durch die Auswertung der Impaktortests im Modul 1 auf Grundlage der HIC-Werte. Aussagen zu Halsbelastungen werden durch Aufzeichnung von Kräften und Momenten in der Simulation ermittelt.

Für diese Entwicklung wurden im Vorprojekt Methoden aus Versuch und Simulation eingesetzt. Zur Analyse der Kinematik dienten verschiedene Multibody-FE-Simulationen, die Aufschluss über die Belastung und den Bewegungsablauf des Fußgängers bei der Kollision geben. Der Simulationsaufbau erfolgte für sechs

unterschiedliche Fahrzeugmodelle, die zuvor entsprechend einer statistischen Auswertung von über 100 am Markt befindlichen Fahrzeugen als geeignete Repräsentanten ausgewählt wurden.

Diese Fahrzeugmodelle sind Bestandteil der Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen, die mit verschiedenen Fußgängermodellen in verschiedenen Positionen und unterschiedlichen Orientierungen durchgeführt wurden (vgl. Abb. 2-8).

Auf Basis dieser Kinematikuntersuchungen wurde das dargestellte Konzept für das Prüfverfahren des Windschutzscheibenaufpralls von Fußgängern entwickelt.

Entsprechend den ermittelten notwendigen Randbedingungen aus dem simulierten Unfallgeschehen wurden Prüfbereiche, Impaktormassen und Aufprallwinkel an einem Realfahrzeug festgelegt und daran anschließend unterschiedliche Impaktortests in den kritischen Randbereichen der Windschutzscheibe sowie am Windlauf eines Beispielfahrzeugs durchgeführt (vgl. Abb. 2-9).

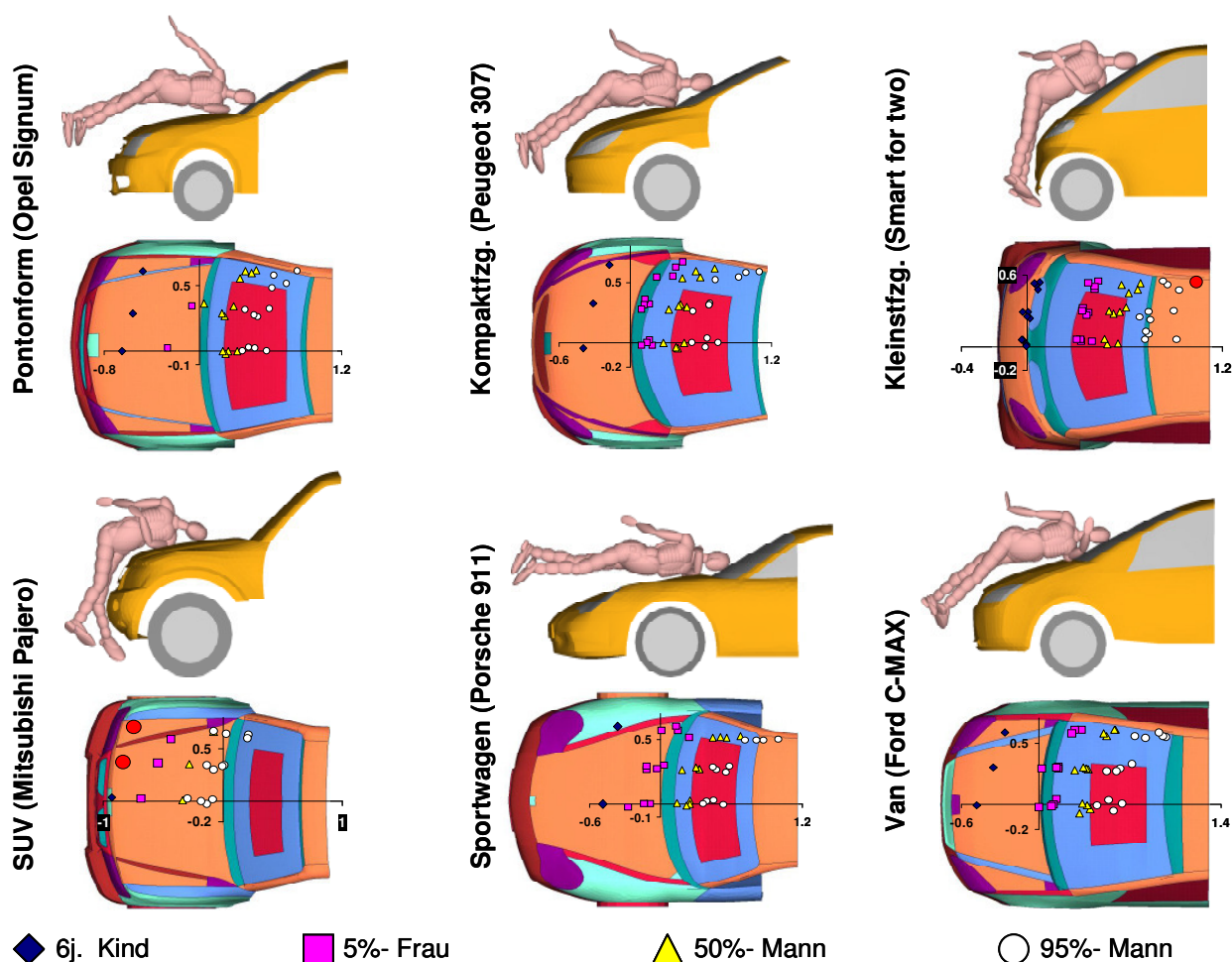


Abb. 2-8: Referenzfahrzeuge aus Vorprojekt FE 82.229/2002 [WAL07]

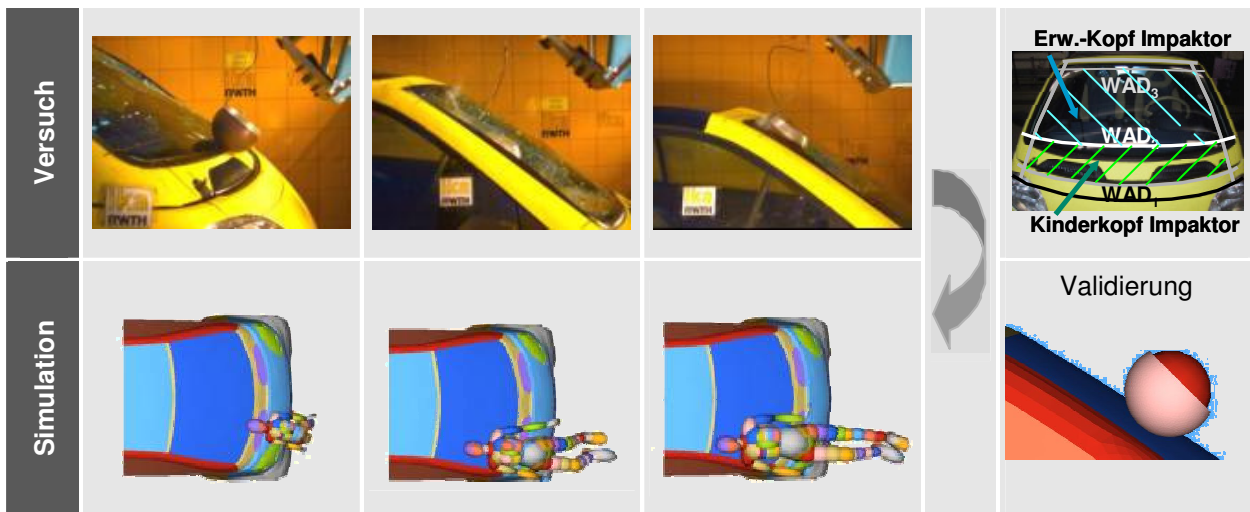


Abb. 2-9: Ablauf des Prüfverfahren-Konzeptes aus dem Vorprojekt

In einer dazu geführten Expertenbefragung [BOV06] (BAST, 4. Dezember 2006) aus dem Vorprojekt sind für die Weiterentwicklung des modularen Prüfverfahrens, dessen Konzept im Rahmen dieses Projektes ausgearbeitet werden soll, folgende Bedingungen festgehalten worden:

- Vereinfachte Simulationsmodelle lassen derzeit lediglich Trendaussagen, jedoch keine detaillierten Verletzungsanalysen zu;
- Grenzen bei der Realisierung der numerischen Simulation in einem Testverfahren sind aufzuzeigen;
- Simulationsmodelle sind für den Anstoß der Fußgänger in Front-/Rückposition (Extremstellung) nicht ausgelegt;
- Der Rotationseffekt, d. h. die gegenüber der Fahrzeuggeschwindigkeit deutlich höhere Kopfaufprallgeschwindigkeit, ist zu erforschen.

Die Möglichkeiten und Grenzen der Kombination von Versuch und Simulation sollen im weiteren Verlauf untersucht, und ein detailliertes Testverfahren mit Ablaufplan soll entwickelt werden. Da die beiden Module im Testverfahren eng miteinander verzahnt sind und aufeinander aufbauen, werden die virtuellen und realen Teile in den folgenden Kapiteln nicht getrennt dargestellt sondern stets zusammen weiterentwickelt und aufgeführt. Im Ablaufplan sind anschließend die einzelnen Versuchs- und Simulationsteile markiert.

Dabei werden in diesem Projekt insbesondere die folgenden Punkte untersucht und im Folgenden dokumentiert, die über die Inhalte des Vorprojektes hinausgehen:

Zu Modul 1:

- Definition von Randbedingungen zur Kinematik und Grenzwerten zu Belastungen für Fahrzeugkategorien unter Verwendung von generischen Modellen;
- Methoden zur vereinfachten Fahrzeugvermessung;
- Auslegung der Testprozedur für nicht stationäre, crashaktive Systeme (z. B. aktive Hauben oder Airbags);
- Entwicklung einer anwendbaren Testprozedur (Darstellung als Ablaufplan) auf Basis notwendiger Anforderungen.

Zu Modul 2:

- Analyse der praktischen Anwendbarkeit von Simulationsmodellen in einem Testverfahren;
- Einbeziehung von crashaktiven Systemen;
- Betrachtung verschiedener Modellierungen für die Simulationen (Mehrkörper und Finite Elemente);
- Entwicklung von Methoden, Simulationsergebnisse in einer Testprozedur zu nutzen.

3 Erweiterte Kinematikanalyse mit Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen

Ziel des zu entwickelnden Testverfahrens ist die Verwendung sowohl realer als auch virtueller Testmethoden. Somit ist die Notwendigkeit verschiedener Fahrzeugmodelle vorausgesetzt. Es wird daher zwischen digitalen Modellen für numerische Simulationen und realen Fahrzeugen unterschieden. Wesentliche Schwerpunkte bilden in diesem Projekt die Einbeziehung von allgemeinen, generischen Fahrzeugfronten und eine konkrete detailliert untersuchte Fahrzeugfront eines Referenzfahrzeugs. Es sollen entstehende Konflikte und Anforderungen an ein Testverfahren aufgedeckt und auf diese eingegangen werden.

In diesem Kapitel werden auf Grundlage von numerischen Simulationen der Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen die charakteristischen kinematischen Kenngrößen wie Kopfaufprallorte, -zeiten, -winkel und -geschwindigkeiten zusammengefasst. Hierzu wird zunächst der Aufbau der digitalen Simulationsmodelle beschrieben. Es werden auf Basis der Vermessungen und Simulationen aus dem Vorprojekt generische Fahrzeugfrontprofile erzeugt und den Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen unterzogen. Auf diese Weise soll ein möglichst breiter Überblick entstehen, um kritische Aufprallbereiche an der Fahrzeugfront zu identifizieren und kinematische Randbedingungen für das Testverfahren abzuleiten.

Aufgrund des verwendeten Referenzfahrzeugs durchschnittlicher Mittelklassegröße werden in diesem Projekt die einzelnen Testmethoden exemplarisch durchgeführt. An diesem Fahrzeug erfolgen alle Untersuchungen in hoher Detailliertheit sowohl am Serienfahrzeug als auch in modifizierter Version mit crashaktivem System mit aktiver Haube und Airbag.

3.1 Digitale Simulationsmodelle

Um die Untersuchungen in der numerischen Simulation durchzuführen, müssen die Fahrzeugmodelle in digitaler Form vorliegen. Es kommen 3D-FE-Modelle, 3D-Mehrkörpermodelle sowie extrudierte 2D-Mehrkörpermodelle (im Folgenden als 2D-Profile bezeichnet) zum Einsatz (vgl. Abb. 3-1).

Für FE-Modelle ist die Güte der erstellten Flächen ausschlaggebend für den gesamten folgenden Prozess der Vernetzung und Berech-

nung. Neben der Qualität der einzelnen Flächen ist auch deren Anordnung im dreidimensionalen Raum zu überprüfen. Einen Überblick über die Schritte der Digitalisierung findet sich in der detaillierten Beschreibung des digitalen Fahrzeugmodells in Abschnitt 5.1 in Abb. 5-2.

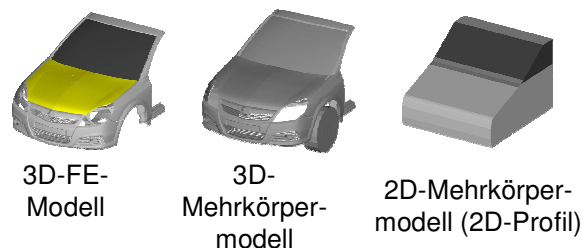


Abb. 3-1: Digitale Simulationsmodelle

Die verwendeten FE-Modelle sind durch den Aufbau bestehend aus 4-8 mm großen Schalenelementen besonders detailliert und ermöglichen es auch, Verformungen in der Karosseriestruktur abzubilden. Den einzelnen Elementen werden spezielle Materialeigenschaften zugeordnet. Um die später in der Realität durchgeführten Versuche in numerischen Simulationen abbilden zu können, muss einerseits ein Modell der Serienversion vorliegen und andererseits ein Modell mit den Modifikationen, die für die Ausführung mit crashaktivem System nötig sind. Die systemrelevanten Bauteile werden in das 3D-FE-Modell integriert und sind in Abb. 5-6 dargestellt.

Bei den verwendeten 3-dimensionalen Mehrkörpermodellen liegt nur die Außenhaut des Fahrzeugs als Facette vor. Hiermit können keine strukturellen Verformungen durch Kräfteinwirkungen dargestellt werden. Die Kontaktcharakteristik wird den Fahrzeugteilen durch Kraft-Weg-Verläufe als Kontaktsteifigkeiten zugeordnet. Versuchsergebnisse können jeweils zur Anpassung dieser Charakteristiken dienen. Diese Modelle werden für Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen eingesetzt (vgl. Abschnitt 6.2).

2-dimensionale Mehrkörpermodelle (2D-Profile) werden als stark vereinfachte Modelle basierend auf dem Mittelschnitt des Fahrzeugs in den Simulationen eingesetzt (vgl. Abb. 3-2).

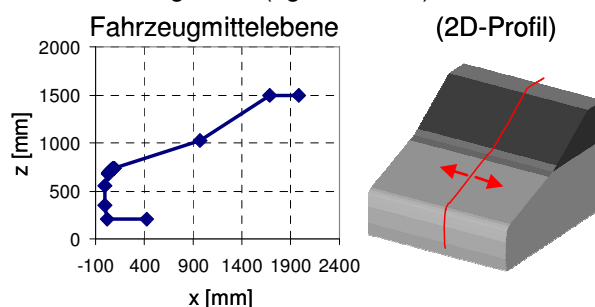


Abb. 3-2: Fahrzeugmittellachse und 2D-Profil

Aus technischen Fahrzeugdaten oder durch Vermessung von Realfahrzeugen werden die Geometrien der Mittelebene (im Längsschnitt) ermittelt. Aus dieser Mittelfläche wird im Anschluss mit einem Simulationstool eine vereinfachte Fahrzeuggeometrie erstellt und durch Extrusion in die Breite gezogen. Somit entsteht eine Kontur der Fahrzeugfront, die aus einer verbreiterten Fahrzeugmittelfläche besteht.

Die 2D-Profile werden in diesem Projekt zur Bestimmung von Randbedingungen verwendet und sind geeignet, Aufprallzeiten, -positionen und die Kinematik in Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen zu ermitteln. Hierzu werden für alle Fahrzeugkonturen minimal und maximal denkbare 2D-Profile erstellt. Ebenso wird ein durchschnittliches Profil erzeugt, (vgl. Abb. 3-3). Um die Anwendbarkeit der 2D-Profile zu zeigen, wurden im europäischen Forschungsprojekt des 6. Rahmenprogramms APROSYS (Advanced PROtection SYStems, Subproject 3 „Pedestrians and Cyclists Accidents“) die Aufprallkinematiken aus den Simulationen von 3D-Mehrkörpermodellen (3D-MKS) und 2D-Profilen bei-

spielhaft verglichen. In Abb. 3-4 ist hierzu ein Auszug der Ergebnisse dargestellt, der nach einer Darstellung der Bestimmung einzelner Kinematik-Parameter im Folgenden erläutert wird. Abb. 3-5 zeigt für alle Fahrzeugkategorien die generierten Profile. Bei der Verwendung dieser theoretischen Fahrzeugmodelle ist zu beachten, dass die maximalen und minimalen 2D-Profile kombinierte Extremwerte realer Frontgeometrien darstellen. Ziel ist es, durch die Kombination auch möglichst viele in Zukunft auftretende Frontformen abzudecken. Das Auftreten derartiger Frontgeometrien in der Realität ist von geringerer Wahrscheinlichkeit als der Mittelwert und daher als maßgeblich betrachtet. Die Abmessungen und Konturlinien resultieren aus umfangreichen Fahrzeugvermessungen aus dem Vorprojekt. Um das Testverfahren beständig gegenüber Fahrzeugen mit Abmessungen weit außerhalb der Durchschnittswerte zu erstellen, werden die Ergebnisse resultierend aus diesen Modellen in die Bestimmung der Randbedingungen des Testverfahrens mit einbezogen (vgl. Abschnitt 4.1.1).

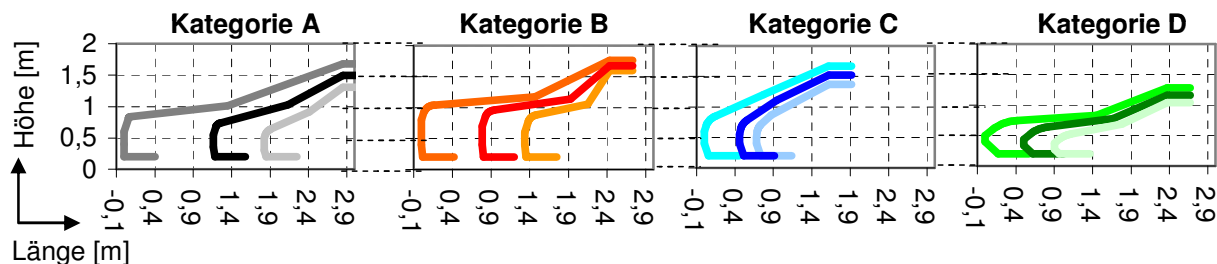


Abb. 3-3: Profile von Fahrzeugfronten in einzelnen Kategorien A - D, vgl. Abschnitt 4.2.2

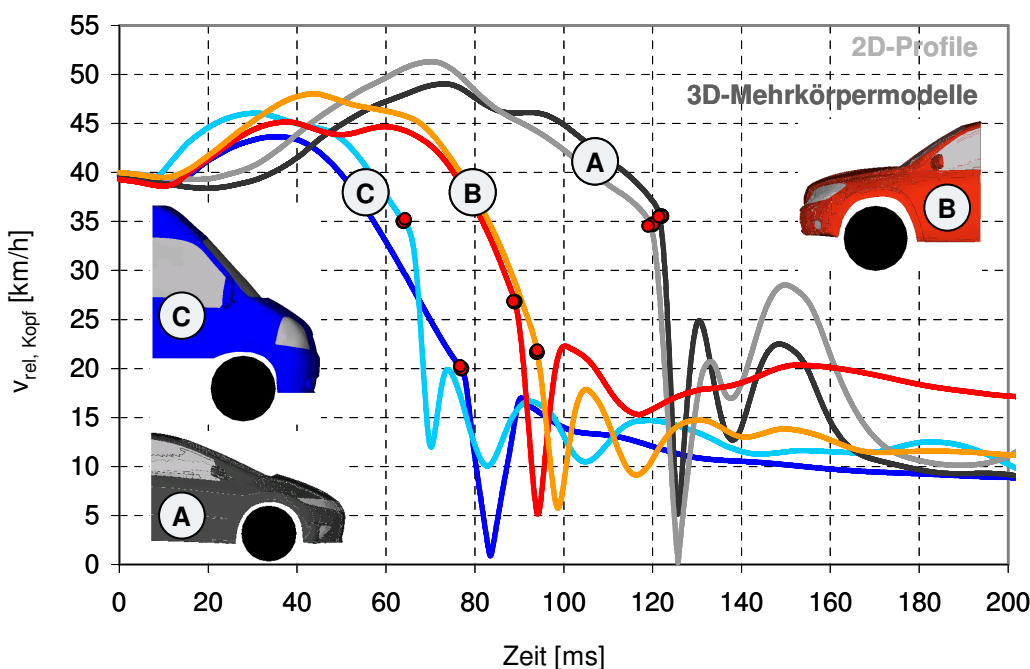


Abb. 3-4: Vergleich der Relativgeschwindigkeiten bei einem dreidimensionalen Oberflächenmodell und bei 2D-Profilen

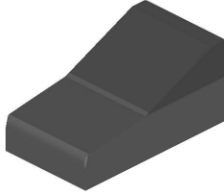
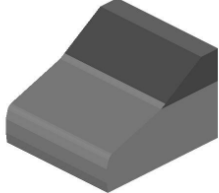
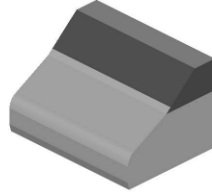

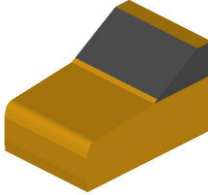
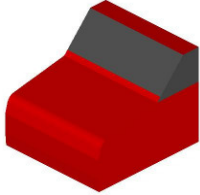
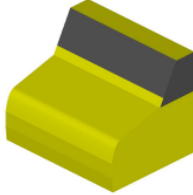

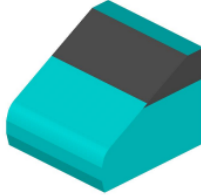
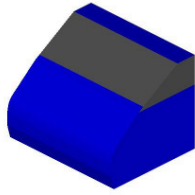
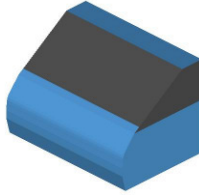
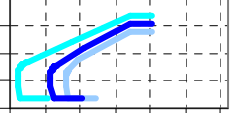
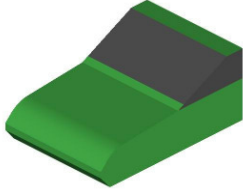
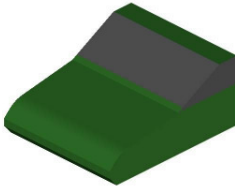
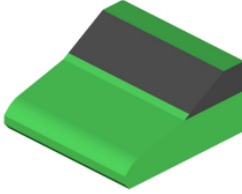
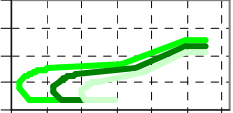
Kategorie	Frontprofile			Seitenansicht
	Maximum	Durchschnitt	Minimum	
A Sedan				
B SUV				
C OneBox				
D Sportwagen				

Abb. 3-5: Frontprofile nach Extrusion auf Basis der Vermessungen aus dem Vorprojekt

3.2 Aufprallkinematik in unterschiedlichen Fahrzeugkategorien

In diesem Projektabschnitt werden die im Vorprojekt um Sportwagen als Kategorie D erweiterten IHRA-Fahrzeugkategorien bestehend aus Kategorie A „Sedan“, Kategorie B „SUV“ und Kategorie C „OneBox“ genutzt (vgl. Abb. 3-5). Für alle Fahrzeugkonturen werden die o. g. 2D-Profile erzeugt (vgl. Abschnitt 4.2, Abb. 4-5).

Diese Kategorisierung der daraus erstellten extrudierten Frontprofile in Abb. 3-5 soll im Folgenden im Rahmen von Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen mit diesen Konturen weiter untersucht werden.

Die sich aus Abb. 3-6 ergebene Simulationsmatrix zur Untersuchung der Aufprallkinematik mit generischen Modellen aus Abb. 3-5 besteht aus der Kombination der vier Fahrzeugkategorien A bis D und der Fußgängermodelle vom 6-jährigen Kind bis zum 95 %-Mann (c6, f5, m50 und m95). Es wird eine einheitliche Schrittstellung mit fahrzeug-

seitigem Bein hinten sowie eine Fahrzeuggeschwindigkeit von 40 km/h gemäß der Definition aus [ECE05] (vgl. Abb. 2-6) gewählt. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den Kategorien ist das Verhältnis der Haubenvorderkantenhöhe bzw. der Lage des Stoßpunktes zum Schwerpunkt des Fußgängers.

Die Überdeckungen zwischen Fahrzeug und Fußgänger sowie die Schwerpunktlagen des Fußgängermodells im Verhältnis zum Stoßpunkt am Fahrzeug üben den entscheidenden Einfluss auf die Aufprallkinematik aus. Die daraus resultierende Paarung von Fahrzeug und Fußgänger bestimmt durch den Abstand von Schwerpunkt und Stoßpunkt den Anteil der Rotation beim Aufprall. Mögliche Anpassungen der existierenden Komponententests, die den Aufprall durch relative lineare und rotierende Bewegung zum Fahrzeug abbilden, sind in Abb. 3-6 neben den relevanten Aufprallbereichen skizziert.

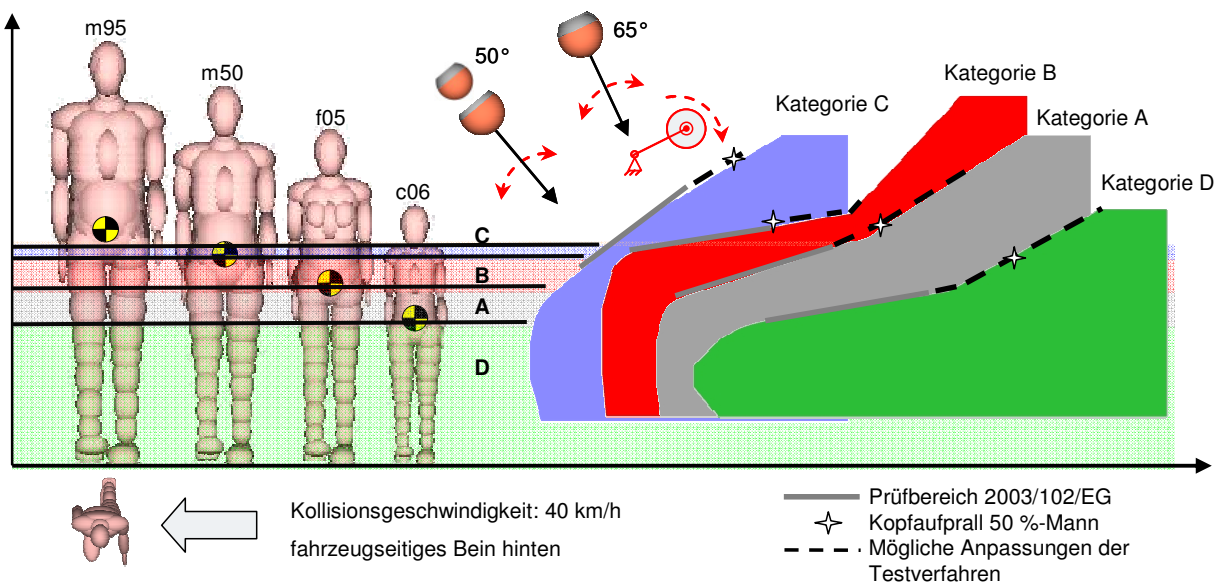


Abb. 3-6: Simulationsparameter für die Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen

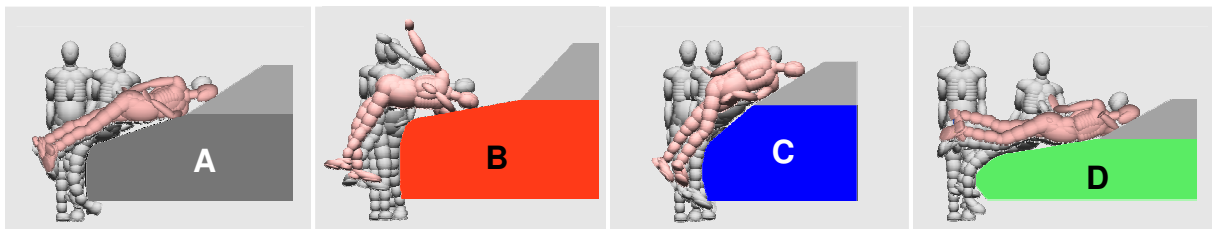


Abb. 3-7: Simulation von Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen in Kategorien

Die Aufprallkinematik des 50 %-Mannes bei Verwendung der o. g. Randbedingungen wird in Abb. 3-7 für die verschiedenen Fahrzeugfronten gezeigt. Die unterschiedlichen Kategorien grenzen sich zueinander durch die Relativbewegung zum Fahrzeug und die Relevanz der Frontscheibe für den Aufprall ab. Hieraus ergeben sich für die unterschiedlichen Kategorien abweichende kinematische Kenngrößen, die im Folgenden näher erläutert werden. Weitere Simulationen sind im Anhang aufgeführt.

Als Kinematik-Parameter wird wie im Vorprojekt die Kopfbewegung anhand der Bewegung des Schwerpunktes verfolgt. Der Vektor für die relative Anfluggeschwindigkeit des Kopfes $v_{rel, Kopf}$ in x-z-Richtung lässt sich mit Gl. 3-1 hinsichtlich des Betrags berechnen und durch Verwendung von Gl. 3-2 mit dem Anflug- bzw. Aufprallwinkel auf die Fahrzeugkontur α_{Kopf} beschreiben.

$$|\vec{v}_{rel, Kopf}| = \sqrt{(v_{Kopf,x} - v_{Fzg,x})^2 + v_{Kopf,z}^2} \tag{Gl. 3-1}$$

$$\alpha_{Kopf} = \arctan\left(\frac{v_{Kopf,z}}{v_{Kopf,x} - v_{Fzg,x}}\right) \tag{Gl. 3-2}$$

Der Winkel ist zwischen dem Vektor der relativen Anfluggeschwindigkeit des Kopfes und der Horizontalen definiert (vgl. Abb. 3-8). Die Relativwerte beziehen sich jeweils auf den Kopfschwerpunkt und sind deshalb als Randbedingungen für Impaktorversuche bei stehendem Fahrzeug übertragbar.

Abb. 3-4 weist die Anwendbarkeit der 2D-Profile anhand der Relativgeschwindigkeit beim Kopfaufprall nach, wobei der Beginn des Kopfkontaktes durch einen Punkt gekennzeichnet ist. Die Aufprallkinematik aus Simulationen von 3D-Mehrkörpermodellen und 2D-Profilen wird für unterschiedliche Frontformen verglichen. Sowohl qualitativ als auch quantitativ sind bei den 2D- und 3D-Modellen gute Übereinstimmungen zu finden. Lokale Einflüsse der Fahrzeugfront bleiben allerdings bei den 2D-Modellen vernachlässigt.

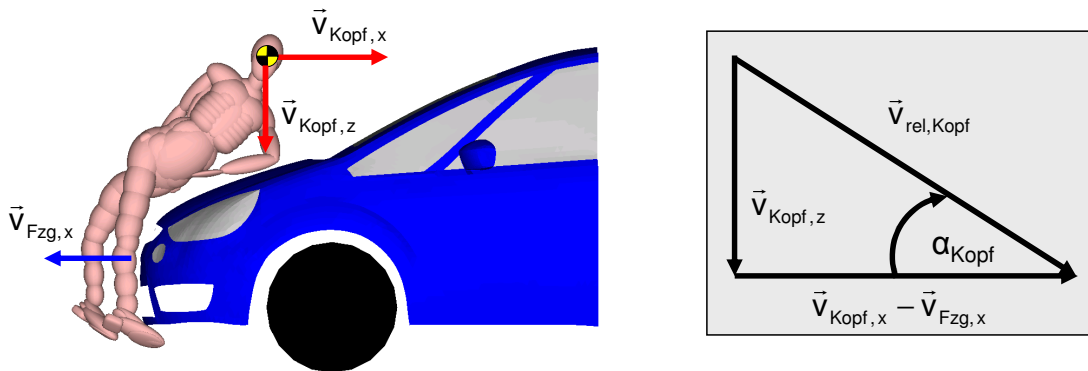


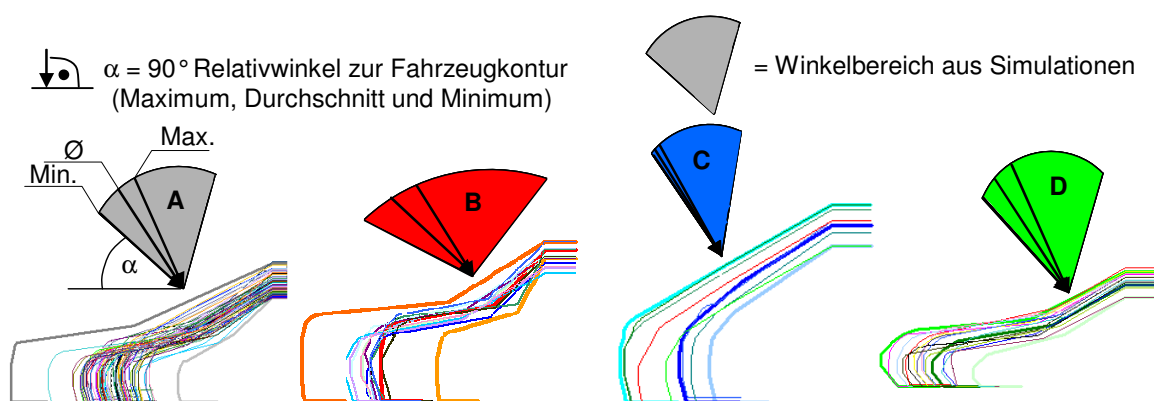
Abb. 3-8: Berechnung von Relativgeschwindigkeit und -winkel

3.2.1 Winkel des Geschwindigkeitsvektors zur Horizontalen

Die bei Realunfällen auftretenden Relativwinkel können nur als Streubereich angegeben werden. Bei einer Fahrzeug-Fußgänger-Kollision sind die tatsächlichen Aufprallwinkel von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, wie z. B. der Schrittstellung und der Orientierung zum Fahrzeug. Abb. 3-9 zeigt die in den MKS-Simulationen ermittelten Verteilungen der Kopfaufprallwinkel im Bereich der Windschutzscheibe.

Aufgrund des Anstellwinkels zwischen Haube und Frontscheibe werden die Bereiche Haube/Windlauf und Windschutzscheibe unterschieden. Zusätzlich sind die Winkel markiert, die relativ zum 2D-Profil der Fahrzeuge senkrecht sind. Beim Aufprall senkrecht zur Struktur sind die größten Belastungswerte zu erwarten, da der notwendige Deformationsweg am höchsten ist.

Die Kinematik beim Aufprall aus den Simulationen ruft breite Streuungen der Aufprallwinkel sowohl allgemein als auch auf Kategorien bezogen wider. Allen Aufprallwinkeln gemeinsam ist, dass die Winkel senkrecht zur Fahrzeugstruktur, die als potenzielle „Worst-Case“-Szenarien betrachtet werden, innerhalb der Streuung aus den Simulationen der Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen liegen (vgl. Abb. 3-10). Abgrenzungen innerhalb der Kategorien sind in der Breite der Streuung vorzufinden. Die kastenförmige Frontstruktur der Fahrzeuge innerhalb der Kategorie C „OneBox“ führt zu einer geringeren globalen Rotation des gesamten Fußgängers und damit zu einer vergleichsweise schmalen Streuung der Aufprallwinkel.



Kategorie	A			B			C			D		
Korridor	Max	Ø	Min	Max	Ø	Min	Max	Ø	Min	Max	Ø	Min
α	66	57	48	58	43	27	61	58	56	66	57	48

Abb. 3-9: Verteilung der Aufprallwinkel in den Kategorien

Kategorie	Definition für Aufprallwinkel zu Impaktortests [°]								
	Windlauf					Frontscheibe			
	Vorprojekt	GTR	2D-Profile	IHRA (Japan)	90°-Winkel	Vorprojekt	2D-Profile	IHRA (Japan)	90°-Winkel
A	60	50*	89	65	66	40, 50, 55	52, 53	40	48, 57
B	85		87	60*, 90	59	75	66	40	28
C	60	65	46	25*, 50	61	40, 45, 60, 35*	49, 69, 46	25*, 50	56, 58, 61
D	60		78	65	66	45, 55, 60, 65	68, 63, 78	40	48, 57, 66

* Nur für den Kinderkopf / Winkel Frontscheibe in der Reihenfolge von Zonen „unten, Mitte, oben“

Abb. 3-10: Aufprallwinkel aus verschiedenen Quellen

Winkel oberhalb von 90° und eine sehr breite Streuung treten insbesondere bei Kategorie B „SUV“ auf. Da bei dieser Kategorie in vielen Konstellationen der Schwerpunkt des Fußgängers mit dem Stoßpunkt am Fahrzeug nahezu auf einer Höhe liegt, erfolgt der Aufprall hinsichtlich der Rotation sowohl zum Fahrzeug hin als auch in einigen Fällen vom Fahrzeug weg.

Die Aufprallwinkel aus den Simulationen sind in Abb. 3-10 zusammengefasst und werden sowohl den derzeit in Testverfahren eingesetzten 50°- und 65°-Winkeln sowie den Aufprallwinkeln aus dem Vorprojekt gegenübergestellt. Die Streuung der Winkel wird in allen Aufprallbereichen und Kategorien deutlich. Bei den Simulationen der Realunfälle liegt immer eine breite Streuung der Aufprallwinkel vor.

Bei allen Kategorien liegt eine einheitliche Tendenz für die Winkel im Aufprallbereich des Windlaufs vor. In den Simulationen ergeben sich im hinteren Haubenbereich Winkel um 65°. Der als „Worst Case“ identifizierte senkrechte Aufprall auf den Windlauf findet ebenfalls bei Aufprallwinkeln von ca. 65° zur Horizontalen statt. Es finden sich insbesondere flachere Winkel für den Kinderkopf bei Kategorie C „OneBox“ und steilere Winkel für den Erwachsenenkopf bei Kategorie B „SUV“. Aufprallwinkel auf der Frontscheibe liegen in verschiedenen Aufprallzonen unterhalb dieser Winkel bei ca. 40° bis 65°. Diese Aussagen decken sich weiterhin mit den Ergebnissen der IHRA aus den japanischen Testverfahren.

3.2.2 Relativgeschwindigkeiten und Aufprallzeiten des Kopfes

Die Geschwindigkeitsverläufe für die durchschnittlichen Profile der vier Fahrzeugkategorien und die Unterschiede in den Kopfaufprallgeschwindigkeiten sowie Aufprallzeiten von Kopf und Schulter sind in Abb. 3-11 wiedergegeben. Die einzelnen Aufprallphasen beginnen mit dem Erstkontakt des Beines bei einer Relativgeschwindigkeit des Kopfschwerpunktes von 40 km/h. Eine Beschleunigung des Kopfschwerpunktes folgt durch den Beginn der überlagerten Rotationsphase beim Hüftaufprall und führt zu der Geschwindigkeitserhöhung (vgl. Abb. 3-7). Beim Schulteraufprall kommt es zu einer deutlichen Verzögerung des Kopfschwerpunktes. Nach dem Kopfaufprall weist der Verlauf der Relativgeschwindigkeit ein wesentlich geringeres Niveau und keinen definierten Ablauf mehr auf.

Durch den stumpfen Aufprall des Fußgängers an Fahrzeugen der Kategorie B (SUV) und C (One-Box) mit hoher Haubenvorderkante bzw. mit Kastenform wird der Kopf frühzeitig verzögert. Der Fußgänger wird im Extremfall bei Rotation des gesamten Körpers vom Fahrzeug weg unter dieses gezogen.

Bevor es beim Aufwerfen auf die Fahrzeugfront zum Kontakt der Schulter kommt, liegen bei Fahrzeugen der Kategorie A (Sedan) und insbesondere der Kategorie D (Sportwagen) Relativgeschwindigkeiten des Kopfes höher als die Fahrzeuggeschwindigkeit vor, weil der Kopf durch die Rotation beschleunigt wurde. In diesem Fall kann die Relativgeschwindigkeit zum Zeitpunkt des Kopfaufpralls nach 120 ms bis 140 ms höher sein als die Fahrzeuggeschwindigkeit. Der Kopfaufprall bei Fahr-

zeugen mit flacher Haubenvorderkante insbesondere in Kategorie D (Sportwagen) findet somit aufgrund einer ausgeprägten Rotation bei gleichzeitig wesentlich höherer Kopfaufprallgeschwindigkeit später statt. Die Beträge der Geschwindigkeitsvektoren der Fahrzeuge aus Kategorie A mit typischer Limousinenform liegen wie auch die Aufprallwinkel entsprechend ihrer geometrischen Abmessungen zwischen den Beträgen der Geschwindigkeiten aus den Kategorien B und C (OneBox und SUV) sowie Kategorie D (Sportwagen).

Die Kopfaufprallgeschwindigkeiten zum Zeitpunkt des tatsächlichen Kontaktes betragen 20 km/h bis 60 km/h. Ähnlich wie bei den Aufprallwinkeln liegen die in den derzeitigen Testverfahren für die Impaktoren eingesetzten Geschwindigkeiten von 32 bis 40 km/h im Bereich der in diesen Untersuchungen aufgetretenen Werte (vgl. [MIZ03]). Das Verhältnis von Kopfaufprallgeschwindigkeit zu Fahrzeuggeschwindigkeit kann mit dem so genannten k-Faktor zusammengefasst werden [ISO03]:

$$k = \frac{V_{\text{Kopf}}}{V_{\text{Fahrzeug}}} = 0,5 \dots 1,5 \quad \text{Gl. 3-3}$$

Die unterschiedlichen k-Faktoren lassen auf die abweichende Kinematik in den Kollisionsverläufen schließen. Die Kinematik des 50 %-Mannes bei der Kollision mit den durchschnittlichen 2D-Fahrzeugprofilen der verschiedenen Kategorien zeigt die genauen Unterschiede im Bewegungsablauf der Fußgänger, die Auswirkungen auf die Kopfaufprallgeschwindigkeit haben.

Die unterschiedlichen Bewegungsabläufe in Abb. 3-12 führen neben den verschiedenen k-Faktoren zu unterschiedlichen Geschwindigkeiten des Kopfes während des Schulterkontaktes. Für Kategorie D (Sportwagen) ergibt sich ein Anstieg der Kopfaufprallgeschwindigkeit bei $k \gg 1$, d. h. es tritt ein Hebeleffekt bzw. „Peitschenschlageffekt“ auf. Ein umgekehrtes Verhalten dazu weisen Kategorie B und Kategorie C (SUV und OneBox) mit $k < 1$ auf. Im Vergleich zu diesen geringen k-Faktoren und hohen k-Faktoren bei Kategorie D werden die durchschnittlichen Geschwindigkeiten des Kopfschwerpunktes bei Kategorie A mit $k \approx 1$ wiedergegeben.

Die vier Kategorien A bis D beziehen sich auf Pkw ohne hohe Aufbauten. Eine Ausnahme bilden die Transporter innerhalb der „OneBox“-Fahrzeuge, die im Vergleich zu den darin ebenfalls enthaltenen Kleinfahrzeugen mit steilen Haubenwinkeln deutlich höhere Fahrzeugfronten aufweisen. Diese Fahrzeuge wurden aufgrund der Beschränkung auf Fahrzeugen unterhalb von 2,5 t zulässige Gesamtmasse (zGM) im Vorprojekt nicht berücksichtigt. Der Einfluss von Höhenunterschieden der Fahrzeuge soll daher im Folgenden am Beispiel der Kategorie C „OneBox“ aufgezeigt werden. Abb. 3-13 fasst die Verläufe der Geschwindigkeiten beim Kopfaufprall für die unterschiedlichen Kategorien unter Berücksichtigung der durchschnittlichen sowie oberen und unteren Abmessungen zusammen, wobei Transporter (C1) und Kleinfahrzeuge (C2) darin separat aufgeführt sind.

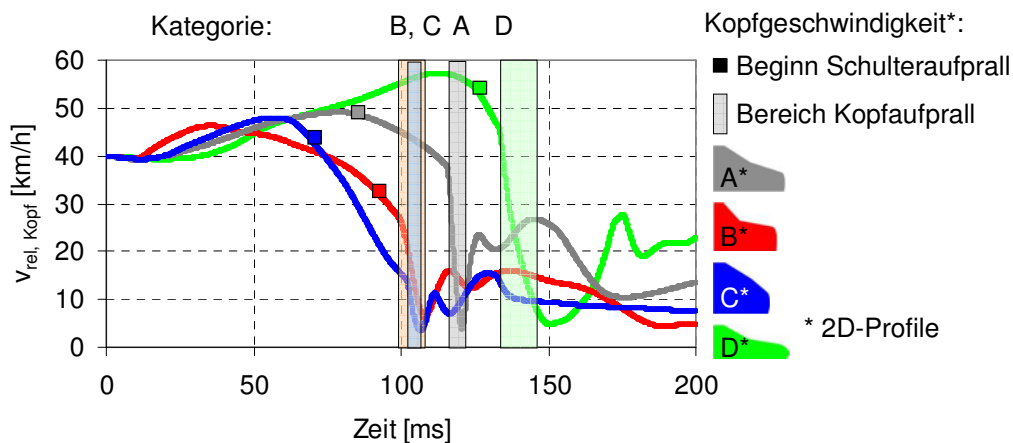
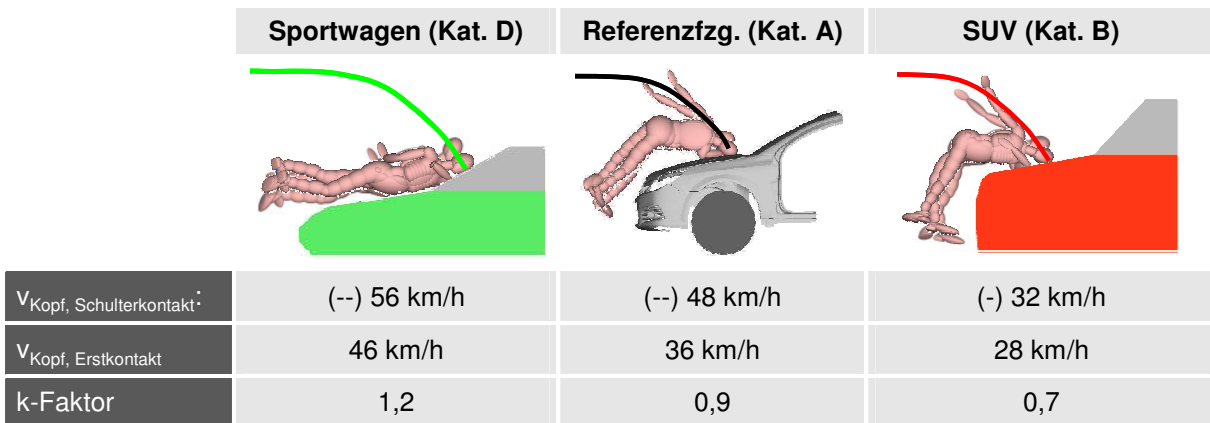


Abb. 3-11: Kopfgeschwindigkeitsverläufe bei unterschiedlichen Kategorien (m50)



Verlauf Kopfgeschwindigkeit zwischen Schulter- und Kopfaufprall (-): fallend / (--) stark fallend

Abb. 3-12: Auswirkung des k-Faktors auf die Kinematik (Ø-2D-Profile, 50 %-Mann)

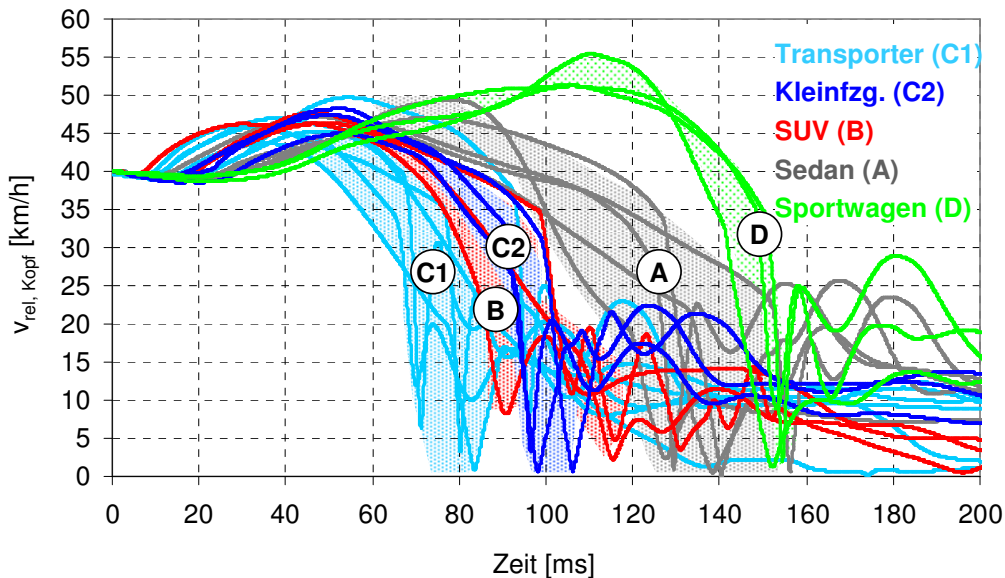


Abb. 3-13: Vergleich der Relativgeschwindigkeiten des Kopfes für alle Kategorien

Ausschlaggebend für die globale Rotationsgeschwindigkeit des Dummykörpers ist das Verhältnis von der Höhe des fahrzeugseitigen Stoßpunktes zur Fußgängerschwerpunkthöhe (h_F/h_{SP} , vgl. Abb. 3-14). Beim SUV in Kategorie B ist der Dummykörper bereits vor dem Schulteraufprall durch eine entgegengesetzte Rotation vom Fahrzeug verzögert worden. Die geometrische Auslegung der Fahrzeugfront beeinflusst die Körperkinematik und damit die Kopfaufprallgeschwindigkeit des Dummies maßgeblich.

Für Kategorie C „OneBox“ sind trotz der großen Höhenunterschiede Übereinstimmungen der Geschwindigkeitsverläufe zwischen den Transportern und den Kleinfahrzeugen sowie der Ka-

tegorie B „SUV“ zu finden. Diese Fahrzeuge weisen alle eine steile Geometrie im unteren Bereich der Front auf.

Bei gleichem Verhältnis von Stoßpunkthöhe zu Schwerpunkthöhe der Fußgänger (h_F/h_{SP}) ist die Kinematik nach Abb. 3-14 innerhalb der Kategorie-C-Fahrzeuge ähnlich. Abweichungen treten im Bereich der Aufprallpunkte durch die unterschiedliche Fahrzeuggröße auf. Für den Transporter trifft lediglich der Kopf des 95 %-Mannes auf die Frontscheibe auf. Bei den kleineren Kategorie-C-Fahrzeugen liegen dagegen alle Kopfaufprallpunkte im Scheibenbereich oder höher. Fahrzeuge mit einer Kastenform können somit unabhängig der Fronthöhe in eine Kategorie C „OneBox“ zusammengefasst werden.

Bei der Gegenüberstellung der Relativgeschwindigkeitsverläufe für den 50 %-Mann (m50) und das 6-jährige Kind (c6) bei Zusammenstoß mit unterschiedlichen Kategorie C „OneBox“ Fahrzeugen in Abb. 3-15 ergeben sich verringerte Aufprallzeiten mit zunehmender Fahrzeuggröße, d. h. mit der „Kastengröße“ und dem damit in der Regel verbundenen höheren Anstellwinkel des Kategorie-C-Fahrzeugs.

Bei der Berücksichtigung von crashaktiven Systemen müssen die Aufprallzeitverläufe des Kopf-

fes für die jeweilige Fahrzeugfront für verschiedene Fußgängergrößen bestimmt werden, um die Einsetzbarkeit der Systeme hinsichtlich benötigter Aufstellzeiten zu prüfen. Diese Zeiten sind insbesondere beim Aufprall kleiner Fußgänger auf Transporter oder Kleinfahrzeuge der Kategorie C und SUVs der Kategorie B sehr gering (ca. 20 ms) und ermöglichen daher in der Regel keinen Einsatz crashaktiver Systeme.

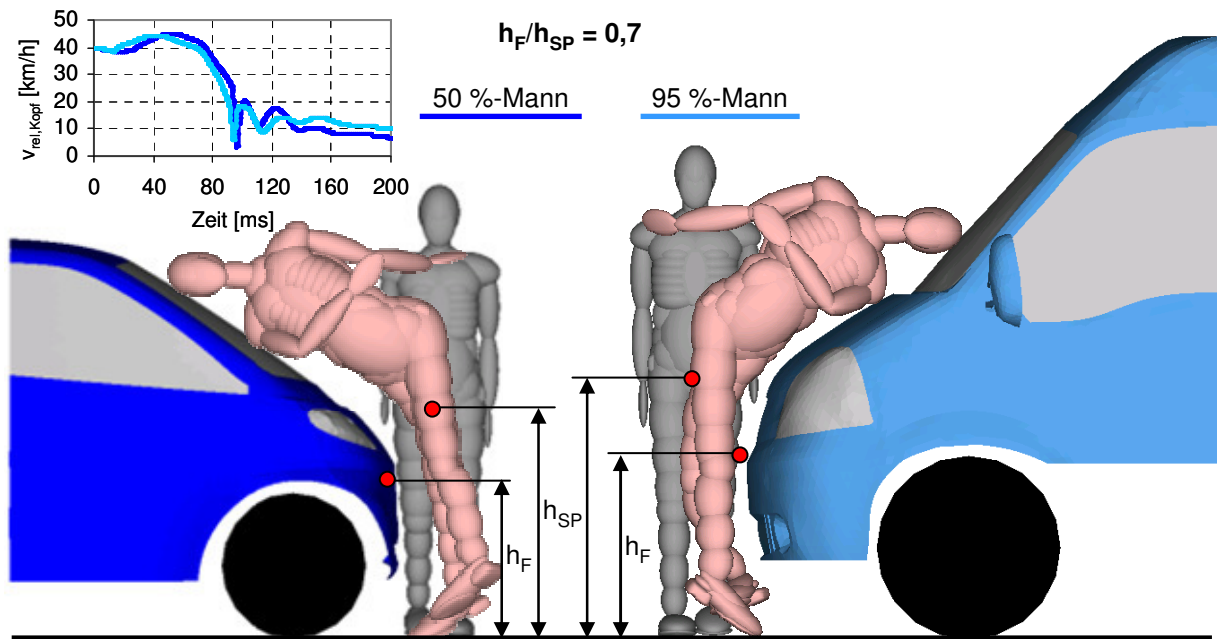


Abb. 3-14: Übereinstimmung der Kinematik durch gleiches Stoßpunktverhältnis

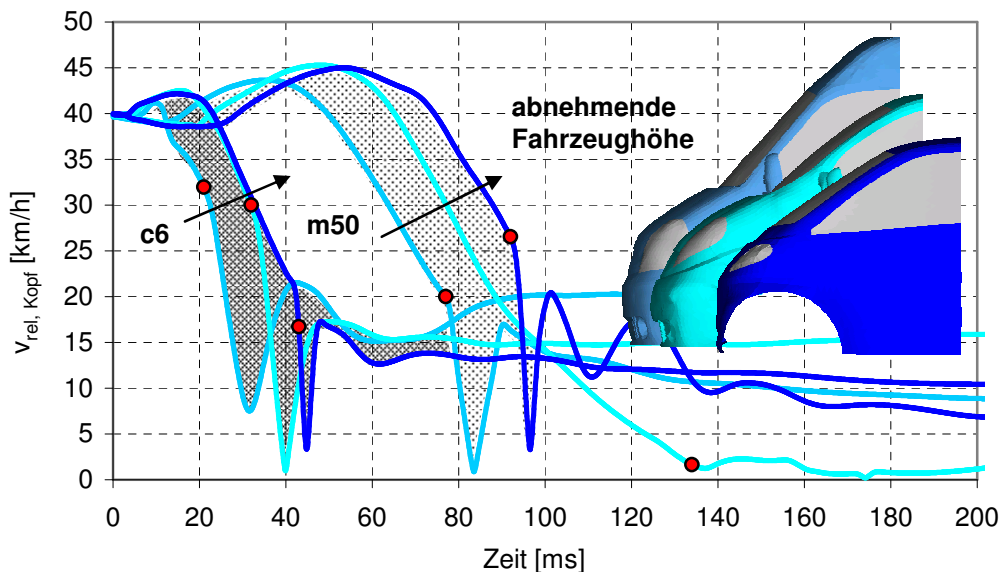


Abb. 3-15: Kinematik für die unterschiedlichen Höhen der Kategorie-C-Fahrzeuge

3.2.3 Aufprallorte am Fahrzeug

Die aufgetretenen Kopfaufprallpunkte der vier Fußgängermodelle (c6, f5, m50, m95) werden den Abwickellängen (WAD) in den jeweiligen Kategorien zugeordnet. Die Vermessung der Abwickellängen erfolgt entsprechend der Definition aus existierenden Testverfahren gemäß Abb. 4-11 und auch dem Vorprojekt. In Abb. 10-9 im Anhang befinden sich die gemessenen Abwickellängen aller Fußgängermodelle mit den jeweiligen Fahrzeugprofilen. Daraus lassen sich bei konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit die maximalen und minimalen WAD für jedes Fußgängermodell innerhalb der jeweiligen Fahrzeugkategorie mit den unterschiedlichen generischen Frontprofilen aus Abb. 3-5 ermitteln. Da die Profile unter Verwendung von Daten realer Fahrzeuge aus den Vermessungen im Vorprojekt zustande kommen, geben die Abwickellängen ein realistisches Maß an, in dessen Bereich bei einem Realunfall mit dem Kopfaufprall zu rechnen ist. Die entstehenden Bereiche der Abwickellängen sind in Abb. 3-16 zusammengefasst.

Hinsichtlich der Aufprallorte am Fahrzeug lassen sich ähnlich wie bei den Aufprallgeschwindigkeiten

und -winkeln die Kategorien abgrenzen. Durch die Rotationsbewegung vom Fahrzeug weg bzw. zum Fahrzeug hin weist Kategorie B, gefolgt von Kategorie C, gemessen anhand der Abwickellänge die geringsten Aufprallweiten am Fahrzeug auf. Daraus ergibt sich bei den Kategorien B und C in den meisten Fällen ein Verhältnis der Aufwurfweite zur Körpergröße des Fußgängers $WAD_{FG}/h_{FG} < 1$. Kategorie A liefert bei den Aufprallorten und ihrer Relevanz für den Frontscheibenaufprall durchschnittliche Ergebnisse mit $WAD_{FG}/h_{FG} \approx 1,1$, wobei dieses Verhältnis bei Kategorie D mit $WAD_{FG}/h_{FG} \approx 1,2$ maximal wird.

Die Abwickellänge für den Kopfaufprall des größten Fußgängers (m95-Dummy) lässt in Kategorie A darauf schließen, dass ab einer oberen Abwickellänge von ca. 2300 mm bei der betrachteten Fahrzeuggeschwindigkeit nicht mehr von einem Kopfaufprall eines Fußgängers auszugehen ist. Der Aufprall im Frontscheibenbereich selbst weist in den einzelnen Kategorien eine unterschiedliche Relevanz auf. Die Erkenntnisse über die Aufprallorte der übrigen Kategorien werden analog gewonnen und im nächsten Kapitel zur Ableitung der Randbedingungen für ein Testverfahren eingesetzt (vgl. Abb. 3-16 und Abb. 3-17).

Dummy	Kategorie A „Sedan“		Kategorie B „SUV“	
	minimal	maximal	minimal	maximal
c6	1050	1130	989	1040
f5	1370	1695	1240	1330
m50	1790	1940	1540	1781
m95	2210	2240	1820	2110
	Kategorie C „OneBox“		Kategorie D „Sportwagen“	
c6	1049	1110	1220	1350
f5	1420	1525	1640	1818
m50	1770	1830	2010	2056
m95	2010	2104	2281	2352

Relevanz hinsichtlich Kontakt Frontscheibenbereich: **hoch** - mäßig - gering

Abb. 3-16: Abwickellängen für den Kopfaufprall in den Kategorien, WAD in [mm]

3.3 Aufprallkinematik bei 3D-Modellen aktueller Fahrzeuge

Die vorangegangene Analyse realer Fußgängerunfälle mit Hilfe der numerischen Simulation lässt sich für aktuelle Fahrzeuge, die bereits hinsichtlich der Phase I der EU-Richtlinie 2003/102/EG ausgelegt worden sind, fortführen. Im Rahmen des APROSYS-Projektes (Advanced Protection Systems) wurden in [BOV07] aktuelle Fahrzeugmodelle hinsichtlich der Aufprallkinematik in unterschiedlichen Kategorien vorgestellt. Durch die 3D-MKS-Modelle aus APROSYS können sowohl Simulationen mit Realunfällen abgeglichen werden als auch zukünftige potenzielle Unfallszenarien mit aktuellen Fahrzeugen simuliert werden, zu denen noch keine Unfalldaten verfügbar sind. Durch die 2D-Profile wurde bereits, unabhängig von bestimmten Fahrzeugmodellen oder Herstellern, die allgemeine Aufprallkinematik bestimmt.

Der Kopfaufprall des 50 %-Mannes in Abb. 3-18 findet bei allen Fahrzeuggeometrien mit Ausnahme des SUVs im oberen Bereich der Motorhaube bzw. im unteren Bereich der Frontscheibe statt. Aktuelle Fahrzeuge mit implementierten Maßnahmen zum

Fußgängerschutz können größtenteils der Kategorie A zugeordnet werden.

Die Kopfaufprallorte von Fußgängern unterschiedlicher Größe bei den 3D-MKS-Modellen sind in Abb. 3-17 zusammengefasst. Der Bereich der oberen Haube sowie der unteren Windschutzscheibe ist für den Kopfaufprall der 5 %-Frau, des 50 %-Mannes und des 95 %-Mannes in den Kategorien A, C und D besonders relevant. Damit sind näherungsweise Fußgänger ab einer Körpergröße von 1,50 cm erfasst. Maßnahmen zur passiven Sicherheit in der Phase 1 der EU-Richtlinie betreffen daher maßgeblich den Aufprallbereich des Kinderkopfes.

Abb. 3-19 zeigt beispielhaft ein aktuelles Fahrzeug mit aktiver Haube. Solche Fahrzeuge weisen insbesondere im direkten Aufstellspalt des Windlaufbereichs potenzielle Gefahrenstellen auf. Ein Aufprall direkt im Bereich der hinteren Haubenöffnung wirkt sich auf die Kinematik aus, indem die Schulter auf der Haube aufschlägt und der Kopf mit dem Genick aufgrund der geöffneten Haube eine Pendelbewegung ausführt. Das Ziel der Bereitstellung zusätzlichen Deformationsraums beim Kopfaufprall kann in diesem Fall nicht realisiert werden.

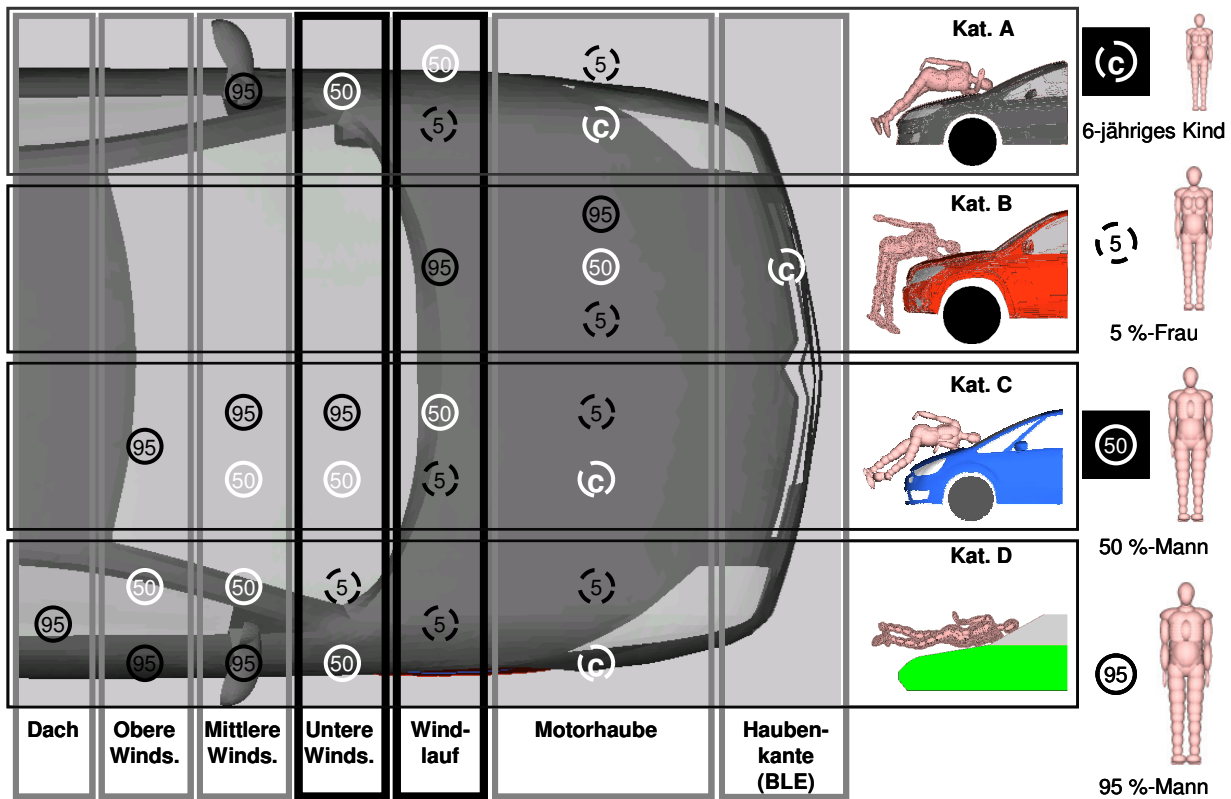
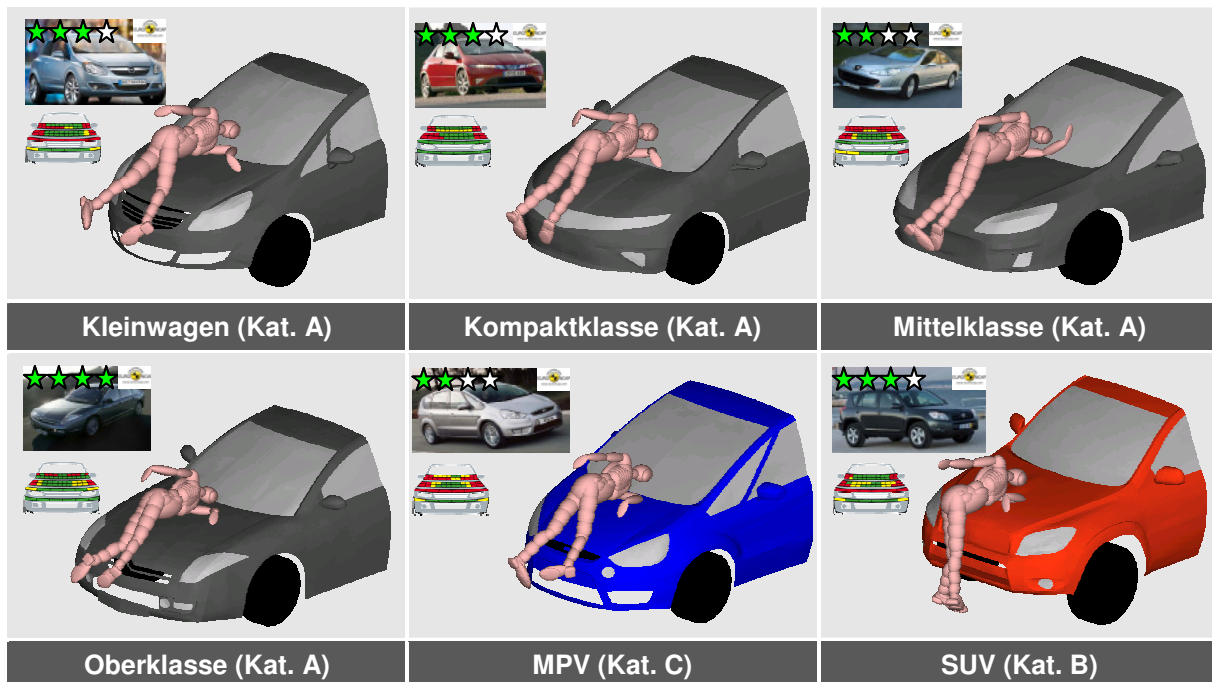


Abb. 3-17: Kopfaufprallorte bei unterschiedlichen Frontformen [BOV08]



Testergebnisse (Sternbewertungen) aus Euro NCAP

Abb. 3-18: Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen bei aktuellen Fahrzeugen aus APROSYS [BOV07]

Die aktive Haube verändert durch ihre Anstellung die Geometrie der Frontform und damit die Aufprallkinematik (Abb. 3-19 und Abb. 3-20). Sofern der Kopfaufprall auf der Haube selbst stattfindet, kann der zur Verfügung stehende Deformationsraum optimal genutzt werden, und der Zweck dieser Schutzmaßnahme wird erfüllt. Bei einem Kopfaufprall direkt im Aufstellspalt der Haube im Windlaufbereich setzt zunächst die Schulter auf und der Kopf führt bei undefiniertem Kopfaufprallwinkel eine pendelnde Bewegung aus.

Bei dieser pendelnden Kopfaufprallbewegung hinter der geöffneten Haube kann der Kopfkontakt vollständig ausbleiben. Beim Schließen des Aufstellspaltes am hinteren Ende der Motorhaube, z. B. durch einen Airbag, wird die Überstreckung der Halswirbelsäule bzw. des Nackens durch Beeinflussung der pendelnden Kinematik reduziert. Neben der Beeinflussung der Aufprallkinematik werden die Beschleunigungen im Kopfschwerpunkt bei dem Einsatz einer aktiven Haube mit Airbag reduziert und der HIC-Wert abgesenkt.

Erkenntnisse zum Kopfaufprall in verschiedenen Fahrzeugkategorien, insbesondere aktueller Fahrzeuge mit aktiven Haubensystemen, werden bei der Definition von Randbedingungen eines Testverfahrens für den Frontscheibenbereich aufgegriffen.

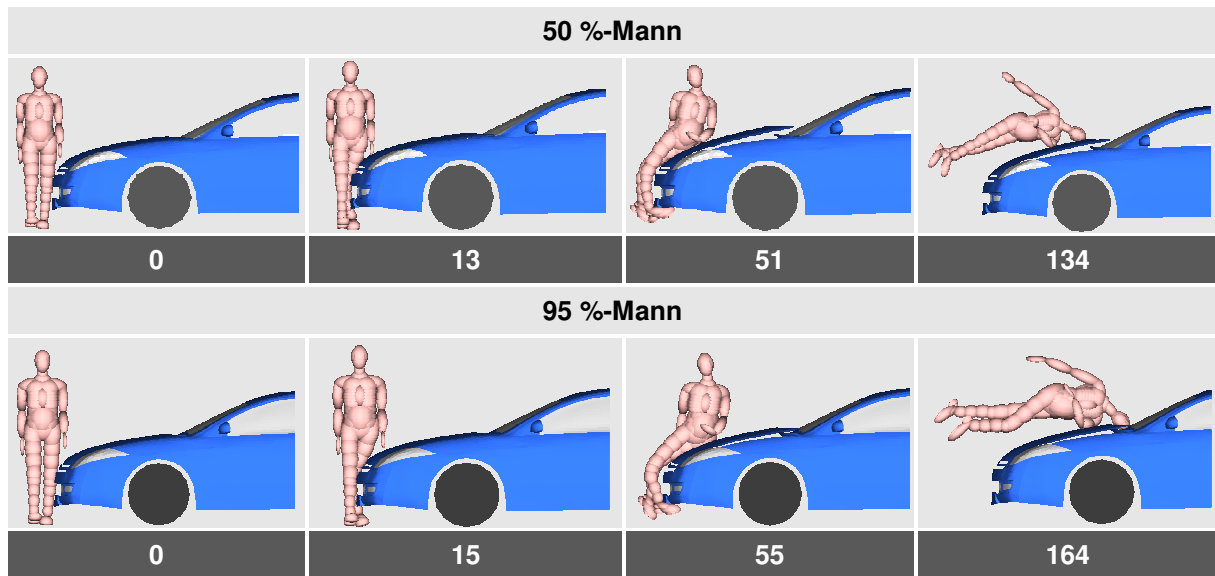


Abb. 3-19: Vergleich der aktiven Haube beim 50 %- und 95 %-Mann aus APROSYS, t in [ms], [BOV07]

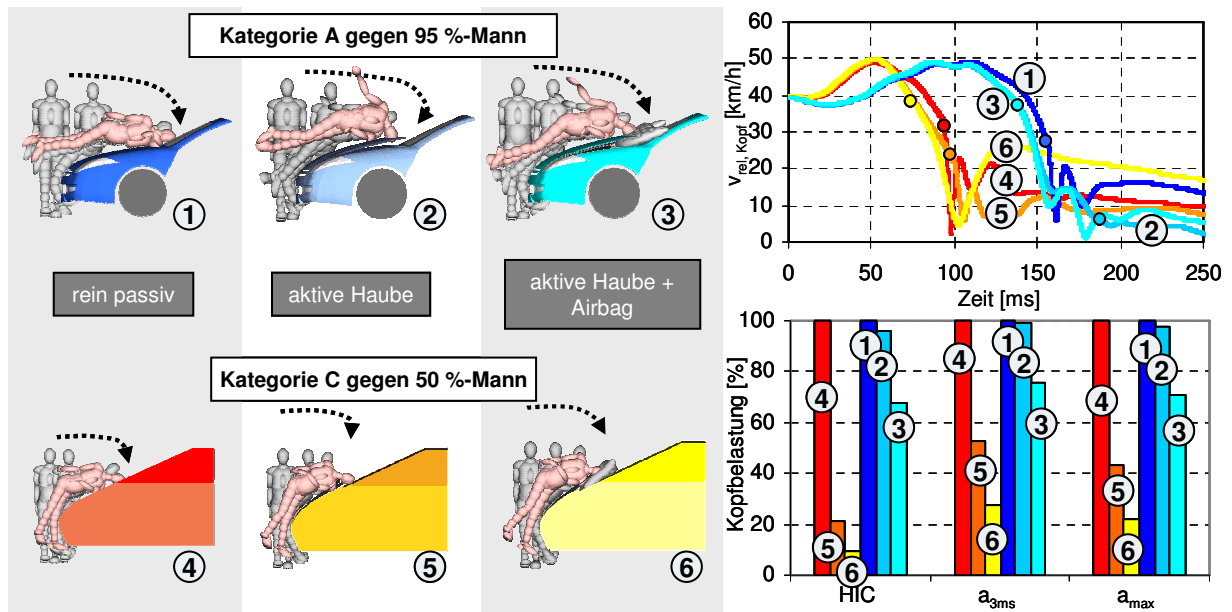


Abb. 3-20: Einfluss crashaktiver Systeme auf die Kopfbelastung [BOV07]

4 Anforderungen und Randbedingungen zur Ausarbeitung des Testverfahrens

Bei der Entwicklung verbesserter Testverfahren müssen sowohl grundlegende Anforderungen für die Durchführbarkeit als auch die notwendigen Voraussetzungen zur Nutzung existierender Methoden berücksichtigt werden. Die notwendigen technischen Parameter, im Wesentlichen zunächst für den Kopfaufpralltest, werden mit Hilfe der Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen aus Kapitel 3 abgeleitet. Ziel ist die möglichst gute Abbildung der Unfallrealität bei gleichzeitiger effektiver Verwendung von bestehenden Testverfahren und Prüfkörpern.

4.1 Allgemeine Anforderungen

4.1.1 Robustheit

Ein robustes Testverfahren bleibt gegenüber Neuerungen und Veränderungen sowie äußeren Einflüssen beständig, d. h. Änderungen von Fahrzeugparametern dürfen die Anwendbarkeit des Testverfahrens nicht beeinträchtigen. Die Gültigkeit muss auch bei neuartigen Geometrien oder Designänderungen der Fahrzeuge Bestand haben.

Weiterhin werden durch die Robustheit eine bewusste Fehlinterpretation in der Anwendung und damit nicht objektive Ergebnisse vermieden. Geforderte Eigenschaften für das zu entwickelnde Testverfahren sind:

- Beständigkeit gegenüber jeglicher Art von Neuerung oder Veränderung aus Produktspektrum der Fahrzeughersteller;
- Eindeutig definierte Fahrzeugkategorien;
- Identifikation von stabilen und instabilen Variablen (z. B. Abwickellänge, Fahrzeugvermessung, Aufprallgeschwindigkeit, Aufprallzeit);
- Beständigkeit gegenüber bewusstem Missbrauch und bewusster Fehlinterpretation;
- Berücksichtigung von Add-on-Systemen.

4.1.2 Prüfkörper

Durch die Prüfkörper werden die Messwerte für die jeweils zugeordneten Belastungen generiert, um dann mit den Grenzwerten verglichen zu werden. Unterschieden werden Dummies für den gesamten Körper und Komponentenprüfkörper, die durch entsprechende Impaktoren einzelne Körperteile

repräsentieren. Die im Folgenden aufgeführten Anforderungen an Prüfkörper [SEI07] gelten für beide Arten:

- Hoher Grad der Biofidelität, Sensitivität hinsichtlich Verletzungsparametern;
- Wiederholbarkeit;
- Reproduzierbarkeit;
- Hohe Haltbarkeit, Lebensdauer, Standzeit;
- Instandsetzbarkeit;
- Einfache Kalibriermethode, Kalibrierbarkeit;
- Niedrige Kosten, Gesamtkosten;
- Verschleißbeständigkeit.

4.2 Anforderungen zur Nutzung existierender Methoden

Das in diesem Projekt weiterentwickelte, modulare Testverfahren soll unter Nutzung aktueller und möglicher zukünftiger Testverfahren als Erweiterung für den Frontscheibenbereich an das GTR-Verfahren [ECE07] angegliedert werden. Die GTR wird voraussichtlich zukünftig die Fußgänger-schutztests international vereinheitlichen, und damit werden sich alle bereits bestehenden Verfahren an ihr orientieren (vgl. Kapitel 2). Um eine Anpassung der Randbedingungen an das existierende GTR-Verfahren zu erzielen, wird bei der Auslegung des Testverfahrens die Anknüpfung an die bestehenden Testbereiche und Aufprallparameter für die Haube angestrebt. Soweit die Erkenntnisse aus Biomechanik und Realunfall dieses festigen, wird weitgehend eine Übernahme von den in der GTR vorgeschlagenen Randbedingungen bevorzugt.

4.2.1 Anwendungsbereich

Der Anwendungsbereich definiert die in das Testverfahren einbezogenen Fahrzeuge. Es werden vor allem die Fahrzeuge mit dem höchsten Anteil am Straßenverkehr berücksichtigt. Da die meisten Fußgängerunfälle innerorts geschehen [CAR08], sind in erster Linie Fahrzeuge zur Personenbeförderung betroffen. Eine weitere Gruppe innerstädtisch häufig eingesetzter Fahrzeuge sind Lieferwagen und kleine Transporter, die oft einen ähnlichen oder identischen Vorderwagen haben. Die Definitionen in der GTR und in den EG-Fahrzeugklassen unterscheiden sich in Details, werden in diesem Projekt aber als äquivalent betrachtet. Der Anwendungsbereich wird auf Grundlage der Fahrzeugein-

teilungen in der GTR (und EG aus 70/156/EWG) verwendet:

Fahrzeugklasse 1: Fahrzeuge zur Personenbeförderung mit mindestens 4 Rädern

Klasse 1-1 (M1): Fahrzeuge innerhalb der Klasse 1 mit nicht mehr als acht Sitzplätzen außer dem Fahrersitz.

Klasse 1-2 (M2): Fahrzeuge innerhalb der Klasse 1 mit mehr als acht Sitzplätzen außer dem Fahrersitz. (Klasse M2 in der EG ist begrenzt auf 5 t zulässige Gesamtmasse (zGM).)

Fahrzeugklasse 2 (N1): Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit mindestens 4 Rädern (Klasse N1 in der EG ist begrenzt auf 3,5 t zGM.)

Die GTR begrenzt den Geltungsbereich der Vorschriften zum Fußgängerschutz für die Klassen 1-2

und 2 auf 4 t zGM. Fahrzeuge unter 500 kg zGM sind generell ausgenommen. Außerdem werden bei den Kategorien 1-2 und 2 Fahrzeuge mit einer besonders steilen Front mit horizontalem Abstand vom Seating-reference Point bis zur Vorderradachse „D“ kleiner als 1000 mm (vgl. Anhang Abb. 10-1) ausgenommen.

Die geänderte Gesetzgebung für die EU wird den Geltungsbereich auf Pkw (M1) und Nutzfahrzeuge (N1 bis 3,5 t zGM) beschränken. Zudem wird für die Ausnahme der Fahrzeuge mit steiler Frontkontur der Abstand D voraussichtlich auf 1100 mm ausgedehnt, um so im Wesentlichen alle Transporter von der Regelung auszunehmen. Fahrzeuge bis 3,5 t Gesamtmasse sind von den Kinematik-Kategorien A bis D abgedeckt [KBA07]. Angesichts der Zulassungsverteilung nach Gesamtmasse aus Abb. 4-1 ist damit der überwiegende Teil der Fahrzeuge erfasst.

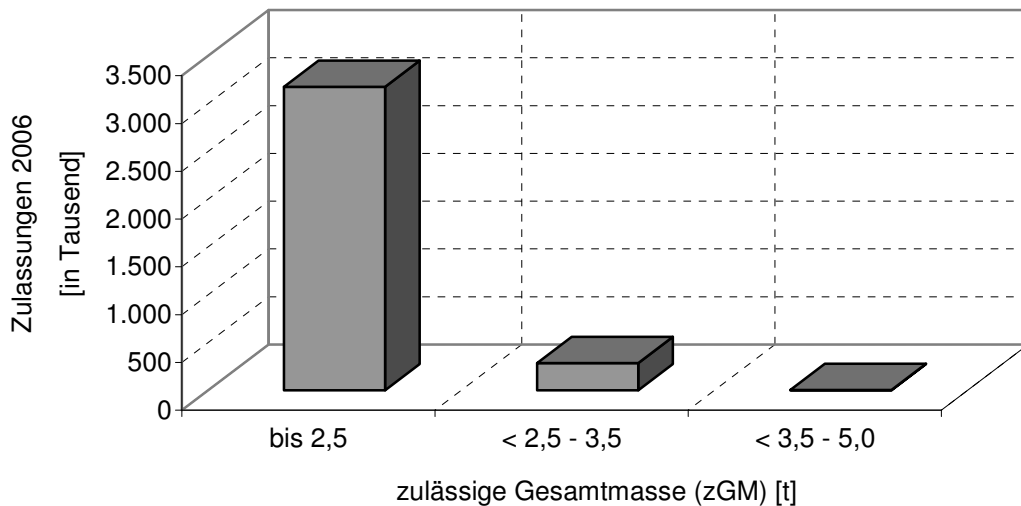


Abb. 4-1: Zulassungsstatistik 2006 für Deutschland nach zulässiger Gesamtmasse [KBA07]

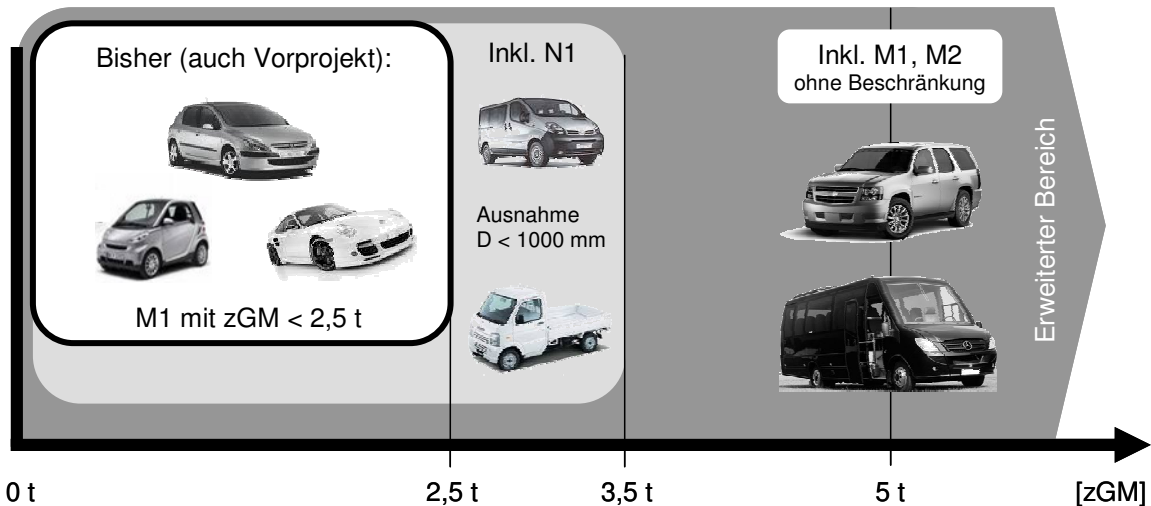


Abb. 4-2: Massenverteilung der Fahrzeuge im erweiterten Anwendungsbereich

	Pkw (9-Sitzer)	Bus (16-Sitzer)	Transporter
			
GTR-(EG)-Klasse	1-1 (M1)	1-2 (M2)	2 (N1)
Ausnahmeregel	Nein	Ja	Ja

Abb. 4-3: Dreifach-Einordnung einer identischen Front in den Anwendungsbereich

Es werden nach der Einteilung in Abb. 4-2 auch schwere SUV der Kategorie B mit einer zulässigen Gesamtmasse zwischen 2,5 t und 3,5 t berücksichtigt, die innerorts eine Relevanz aufweisen (vgl. Abb. 4-1). Die bisherige Richtlinie 2003/102/EG [EGR03] sieht im Vergleich dazu den Anwendungsbereich für M1-Fahrzeuge bis zu einer zulässigen Gesamtmasse von 2,5 t vor, d. h. vorwiegend Fahrzeuge der Kategorie A und D, für welche die Kopfpunkttests ursprünglich entwickelt wurden. Fahrzeuge mit steiler Front erfordern aufgrund der Frontgeometrie, der sehr kurzen oder nicht vorhandenen Motorhaube und oft steil stehenden Frontscheibe separate Maßnahmen, die im betrachteten Anwendungsbereich unberücksichtigt bleiben. Bei einem Anstellwinkel der Front von über 40° ist eine Markierung und Definition eines Testbereichs darauf kaum möglich (vgl. Abb. 4-4).

Der Anwendungsbereich nach der GTR schließt alle M1 Fahrzeuge ein und damit auch einige Fahrzeuge mit kurzer Front. Verschiedene Derivate der gleichen Modellreihe werden durch ihren unterschiedlichen Verwendungszweck in alle drei Fahrzeugkategorien eingeordnet, so dass die Ausnahmeregelung für:

$$D_{(R\text{-Point Fahrersitz} - \text{Frontachse})} < 1000 \text{ mm}$$

nicht mehr greift. Die Frontstrukturen und die für die Fußgängerkollision relevanten Bereiche insbesondere bei Transportern sind identisch (vgl. Abb. 4-3). Ähnlich wie in der geltenden EU-Richtlinie könnte in diesem Fall z. B. eine zusätzliche Regel eingesetzt werden, so dass die aus den bereits ausgenommenen Fahrzeugen abgeleiteten Modelle ebenfalls unberücksichtigt bleiben. Diese zusätzliche Ausnahme ist derzeit in der GTR allerdings nicht vorgesehen. Daher müssen voraussichtlich zukünftig die OneBox-Frontkonturen der Transporter Anforderungen zum Fußgängerschutz erfüllen.

Kleinserien-Zulassungen und Einzelzulassungen von Fahrzeugen wie beispielsweise von Sport-

wagenmanufakturen bilden weiterhin eine Ausnahme und unterliegen in der Regel keinen Fußgängerschutz-Anforderungen.

4.2.2 Fahrzeugeinteilung und -kategorien

Die Fahrzeuge des betreffenden Anwendungsbereichs sind in vier Kategorien gemäß Vorprojekt für das zu entwickelnde Testverfahren eingeteilt:

- Kategorie A - Sedan, Limousine
- Kategorie B - SUV
- Kategorie C - OneBox
- Kategorie D - Sportwagen

Die Bezeichnung der Kategorien orientiert sich zur Veranschaulichung an den jeweiligen charakteristischen Fahrzeugfrontformen Limousine (Sedan), SUV, OneBox (Kastenwagen) und Sportwagen. Ein Fahrzeug innerhalb dieser Kategorien muss aber nicht zwingend der exakten Bezeichnung wie z. B. Sportwagen entsprechen. Durch die Abmessungen Haubenwinkel α_B und Höhe der Haubenvorderkante h_{BLE} ("Bonnet Leading Edge", gängige Abk.: BLE) können die Fahrzeuge eindeutig einer Kategorie zugeordnet werden. Die Bestimmung aller erforderlichen Bezugspunkte wird in der senkrecht zur Fahrzeugaufstandsfläche in Längsrichtung verlaufenden Fahrzeugmittelebene nach Abb. 4-4 vorgenommen.

Die Ermittlung der BLE-Referenzlinie erfolgt auf Basis des technischen Anhangs aus 2004/90/EG [EGR04] für die Richtlinie 2003/102/EG. Zur Ermittlung des Bezugspunktes der Haubenvorderkante (vorderer Punkt) wird eine Gerade (in der Praxis: Kantenlineal) um 50° aus der Vertikalen gekippt und an die Fahrzeugfront gelegt. In Ausnahmefällen (Mehrfachkontakt) wird das Kantenlineal bei 40° angelegt. Der vertikale Abstand zwischen diesem Bezugspunkt und der Bodenebene ist die Höhe

der Haubenvorderkante (vgl. Abb. 4-4). Die Höhe der Haubenvorderkante grenzt die Kategorie B (SUV) mit $h_{BLE} > 840$ mm und Kategorie D mit $h_{BLE} < 600$ mm von Kategorie A ab (vgl. Abb. 4-6).

Der Haubenwinkel α_B wird entsprechend der japanischen Gesetzgebung bestimmt [BLU05]. Lokale Designmaßnahmen wie z. B. Fugen sind bei der Winkelbestimmung vernachlässigt. Hierzu wird zusätzlich der Bezugspunkt der hinteren Haubenkante benötigt, der durch eine Kugel mit einem Durchmesser von 165 mm bestimmt wird. Die Kugel berührt gleichzeitig die hintere Hau-

benkante und die Frontscheibe auf der Fahrzeugmittellachse. Der Berührungspunkt auf der hinteren Haubenkante wird als Bezugspunkt markiert. Die Gerade zwischen den beiden Berührungspunkten „Höhe Haubenvorderkante“ und „hintere Haubenkante“ ergibt den Haubenwinkel α_B relativ zur Bodenebene.

Den Schnitten der Frontgeometrien für alle vier Kategorien können in Abb. 4-5 fahrzeugseitige Abwickellängen (WAD) zugeordnet werden, auf deren Basis die Relevanz des Kopfaufpralls im Frontscheibenbereich bestimmt ist.

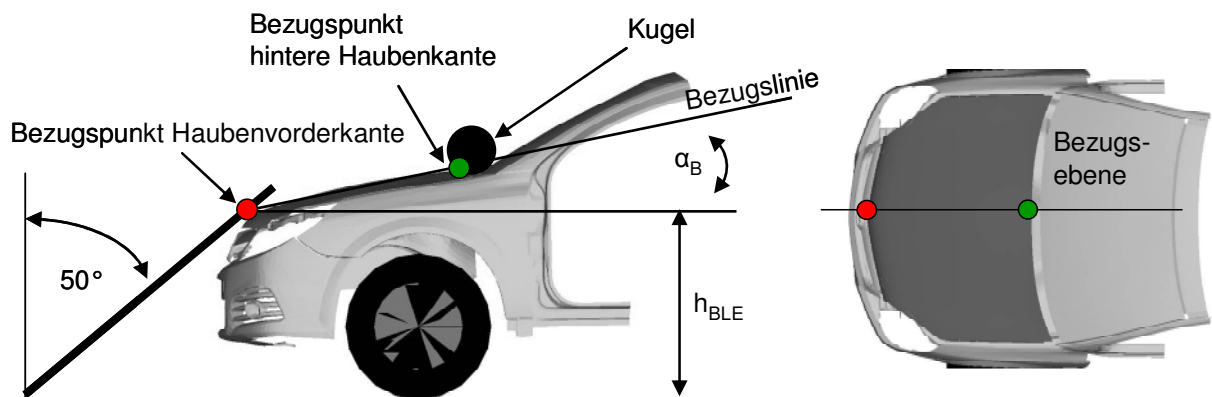


Abb. 4-4: Bestimmung der Fahrzeugparameter [EGR04] [BLU05]

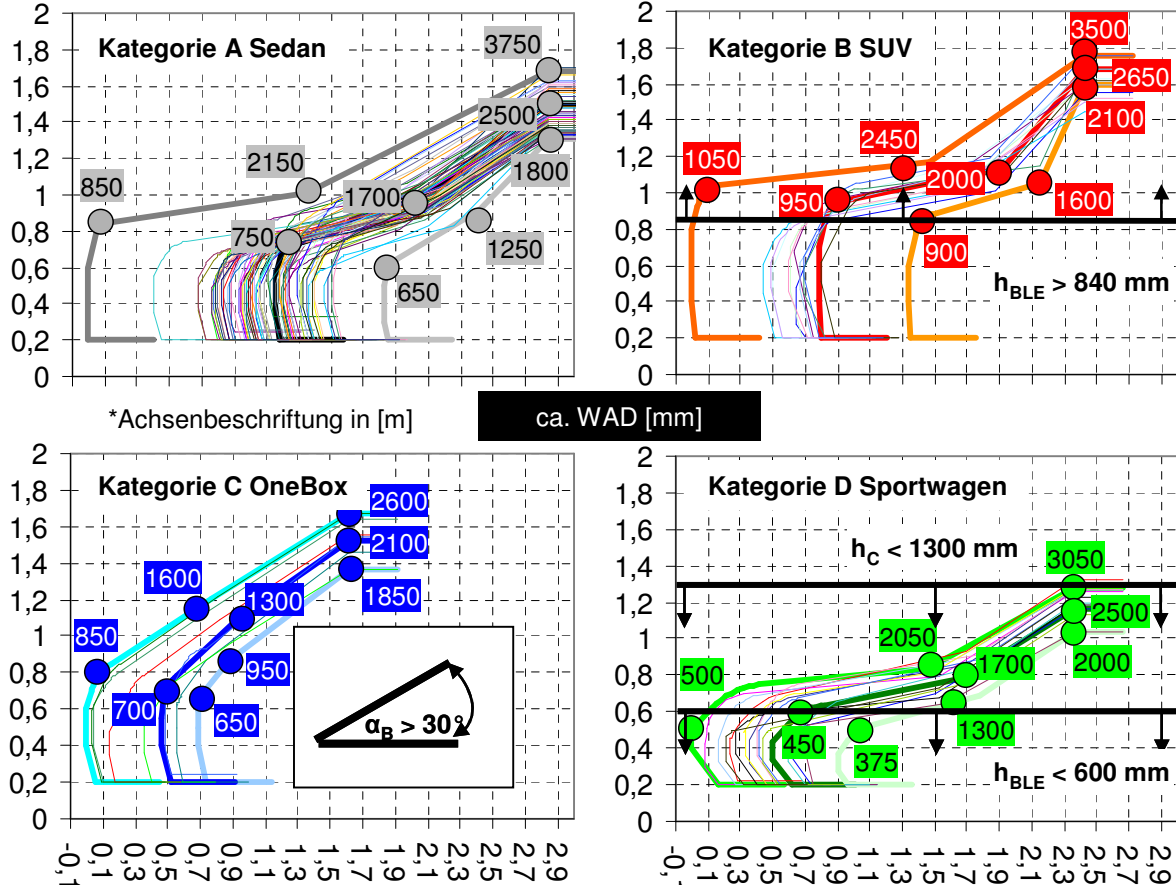


Abb. 4-5: Korridore aus dem Vorprojekt mit Profilen innerhalb der Fahrzeugkategorie

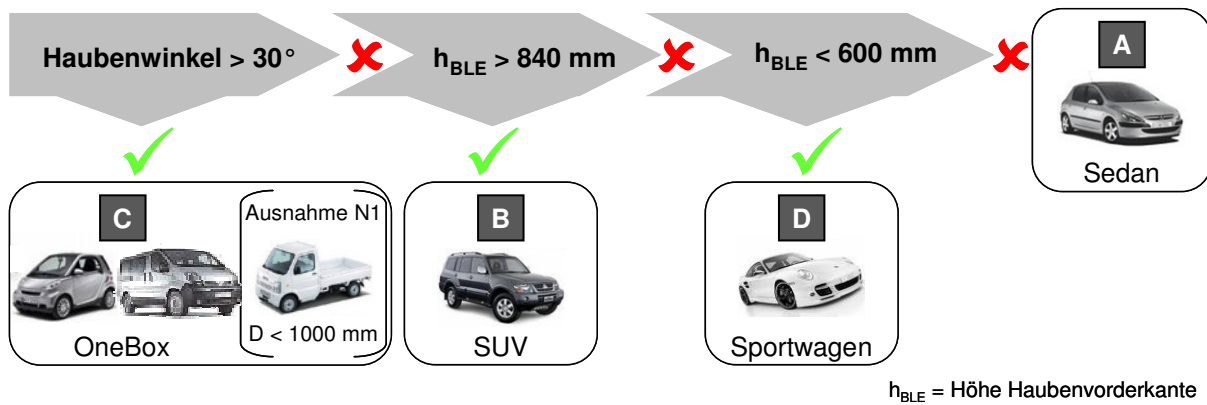


Abb. 4-6: Kategoriezuordnung und Auswahlkriterien

Die Abwickellängen in Abb. 4-5 sind in charakteristische Übergänge der Fahrzeuge an der Haubenvorderkante, Haubenhinterkante und an der Vorderkante des Dachs/Scheibenoberkante eingeteilt. Darin sind sowohl die im Vorprojekt vermessenen Fahrzeuge (Transporter mit hohen Aufbauten in Kategorie C nicht aufgeführt) als auch die generischen Frontprofile enthalten. Die durchschnittlichen Profile sind bei der Kinematikanalyse maßgeblich.

Die Fahrzeughöhe ist ein zusätzliches Merkmal von Sportwagen, zur eindeutigen Zuordnung in die entsprechende Fahrzeugkategorie jedoch nicht notwendig. Bei einem Haubenwinkel von mehr als 30° entsprechen die Fahrzeuge der Kategorie C (OneBox). Ein großer Anteil der Fahrzeuge in dieser Kategorie sind Transporter der Fahrzeugkategorie N1. Die Höhe der Haubenvorderkante grenzt Fahrzeuge der Kategorie B mit $h_{BLE} > 840$ mm nach oben und Kategorie D mit $h_{BLE} < 600$ mm nach unten hin ab. Alle übrigen Fahrzeuge, vorwiegend der Fahrzeugkategorie M1, sind als durchschnittliche Limousine (Sedan) der Kategorie A gemäß dem Schema für die Fahrzeugeinteilung in Abb. 4-6 zugeordnet.

4.3 Ableitung von Parametern für den Kopfaufprallversuch

In den technischen Randbedingungen für einen Kopfaufprallversuch wird, unter Verwendung existierender Verfahren, eine Anknüpfung an die GTR berücksichtigt [ECE07]. Ergänzungen durch neue Testmethoden werden in Kapitel 5 angeführt. In diesem Abschnitt werden zunächst die Parameter betrachtet, welche die Kinematik des Fußgängers beschreiben. Hierzu zählen die Impaktoren und die dazu gehörige Kinematik hinsichtlich der Kopfaufprallwinkel und der -geschwindigkeit. Abwickellängen für die Testbereiche, in denen mit einem Kopfaufprall zu rechnen ist, werden zugeordnet. Funktionsbedingungen für crashaktive Systeme und einzuhaltende HIC-Grenzwerte führen schließlich zu Parametern für den Impaktorversuch.

4.3.1 Impaktoren

Für die ISO-Impaktoren wird der Aufprallbereich in Kinder- und Erwachsenenbereich aufgeteilt. Die Trennlinie zwischen den Bereichen wird analog zu den Simulationsergebnissen mit den Fahrzeugprofilen aus Kapitel 3 bestimmt. Aufgrund nahezu identischer biomechanischer Daten der 5 %-Frau und des 12-jährigen Kindes ist mit dem ISO-CH der gleiche Prüfkörper repräsentativ [ECE07]. Die Trennlinie zwischen Kinderkopf- und Erwachsenenkopf bildet hinsichtlich der Strukturauslegung selbst einen Übergangsbereich mit einer dem Impaktordurchmesser entsprechenden Breite von 165 mm (vgl. Abb. 4-7).

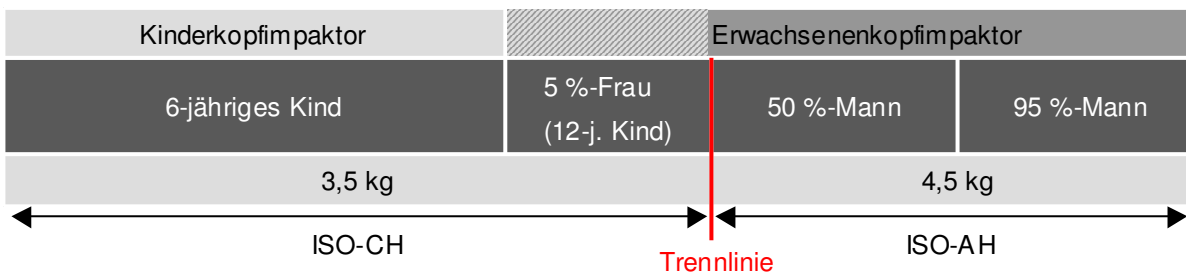


Abb. 4-7: Auswahl der Impaktoren

4.3.2 Geschwindigkeit

Die Aufprallkinematik aus Kapitel 3 ergibt für Fahrzeuge der Kategorie A mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 40 km/h und einem k-Faktor von ca. 0,9 näherungsweise eine Kopfaufprallgeschwindigkeit von 35 km/h. Abweichungen treten insbesondere bei Kategorie D oberhalb und Kategorie B unterhalb der Kopfaufprallgeschwindigkeit auf.

Da die Geschwindigkeit die Aufprallenergie entscheidend beeinflusst, hat ihre Definition beim Impaktortest direkte Auswirkung auf die Struktur Auslegung des Fahrzeugs. Bei geringeren Geschwindigkeiten des Impaktors kann die Struktur weicher oder mit geringerem Deformationsweg ausgelegt werden. Höhere Geschwindigkeiten bei vorgegebenem HIC-Wert des Impaktors erfordern mehr Deformationsraum und eine steifere Auslegung der Struktur.

Die Forderung nach einer einheitlichen Struktur Auslegung der Fahrzeugfront über alle Kategorien bei relevanten Kopfaufprallgeschwindigkeiten aus der realen Kinematik von 35 km/h bis 40 km/h ist, ähnlich wie beim Insassenschutz, sinnvoll. Die Geschwindigkeiten sind für beide Impaktoren gleich, so dass die Aufprallenergie im Kinder- und Erwachsenenkopfbereich durch die Massen der Impaktoren bestimmt wird und damit Einfluss auf die Struktursteifigkeit nimmt. Durch den Zusammenhang von HIC-Wert und Geschwindigkeit können definierte Grenzwerte ggf. abhängig von Kategorien und Aufprallzonen festgelegt werden.

Es werden zwei Möglichkeiten einer Ableitung für eine Aufprallgeschwindigkeit betrachtet. In Anlehnung an die GTR kann die Geschwindigkeit des Impaktors auf 35 km/h bei einem Belastungsgrenzwert von HIC = 1000 (30 %-AIS 3+) übernommen werden. Alternativ sind 40 km/h bei einem HIC-Wert von 1350 (50 %-AIS 3) denkbar.

Diese beiden Alternativen werden in Abschnitt 4.3.6 analysiert. Daran anschließend wird daraus eine Auswahl für das Testverfahren getroffen.

4.3.3 Winkel

Die Relativwinkel des Vektors der Aufprallgeschwindigkeit zur Horizontalen aus den Simulationen werden zusammengefasst und vereinheitlicht, um vergleichbare Testergebnisse bei möglichst identischen kinematischen Randbedingungen zu erhalten. Verstellwinkel von 5° bis 10° haben, wie im Vorprojekt festgestellt, geringe Auswirkungen auf die resultierenden Beschleunigungen. Bei der Definition von Testwinkeln fließen als Option neben den Simulationsergebnissen aus Kapitel 3 senkrechte Relativwinkel zur Struktur und die derzeit in Prüfverfahren eingesetzten Winkel ein.

Für den Kopfaufprall an der hinteren Haubenkante und dem Windlaufbereich liegen in den Simulationen bei den generischen Fahrzeugfronten Relativwinkel zwischen 50° und 90° vor. Senkrechte Winkel relativ zur Struktur sind bei allen Kategorien gemessen zur Horizontalen annähernd ca. 65°. Deshalb wird im Windlaufbereich für alle Kategorien ein Winkel von 65° übernommen.

Eine solche Vereinfachung wird für alle Fahrzeugkategorien auch für den Windschutzscheibenbereich angewendet, so dass sich für jede Fahrzeugkategorie nur ein Testwinkel ergibt. Für Kategorie A liegt eine Tendenz zu einem Winkel von 50° vor. Bei Kategorie B hat der Kopfaufprall im Windschutzscheibenbereich nur geringe Relevanz. Es wird der Winkel von 75° aus dem Vorprojekt aufgrund der o. g. Aussage zum Verstellwinkel auf 65° angepasst. In der Kategorie C wird für den Kinderkopf ein separater Aufprallwinkel von 35° ermittelt. Für den Erwachsenenkopf werden die Winkel zu einem Testwinkel von 50° zusammengefasst. Bei Kategorie D ergibt sich übereinstimmend mit dem Windlauf ein einheitlicher Winkel von 65°.

Kategorie	Aufprallwinkel [°]	
	Windlauf	Frontscheibe
A (Sedan)	65	50
B (SUV)		65 ^{*)}
C (OneBox)		35 ^{**) 50}
D (Sportwagen)		65

^{*)} sehr geringe Relevanz / ^{**) nur für Kinderkopf}

Abb. 4-8: Aufprallwinkel für das neue Testverfahren

Die definierten Winkel in Abb. 4-8 stimmen weitgehend mit denen der GTR [ECE07] überein und lassen sich sowohl anhand der Simulation realer Kollisionen bestätigen als auch anhand der senkrechten Winkel plausibilisieren. Abweichend von den europäischen Testverfahren ist der Winkel von Aufprallzonen und wie im japanischen Testverfahren nach Abb. 2-5 von Fahrzeugkategorien anhängig. Die Aufprallwinkel sind unabhängig vom Impaktortyp Erwachsenen- oder Kinderkopf mit Ausnahme der Kategorie C.

4.3.4 Testbereiche

Die Testbereiche werden unter Verwendung der im Vorfeld definierten Impaktoren, kinematischen Randbedingungen und realen Aufprallzonen für die einzelnen Kategorien festgelegt. Die unteren Grenzen liegen nicht auf dem in diesem Projekt untersuchten Scheibenbereich. Die markierten (*) Werte der unteren Grenzen in Abb. 4-9 nutzen daher die Definitionen der GTR mit einer WAD von 1000 mm.

Durch die Testbereiche wird eine Abwickellänge gegeben, ab welcher der Kinder- bzw. der Erwachsenenkopfimpaktor verwendet wird. 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 dieser Abwickellängen sind dabei in einigen Konstellationen vorzufinden. Die oberen Grenzen der Testbereiche werden durch die Kopfaufprallpunkte des 95 %-Mannes bestimmt (vgl. Abb. 3-16 und Abb. 4-9). WAD-Maße werden in 100 mm Schritten auf Basis derzeit in Testverfahren verwendeter Abwickellängen sinnvoll auf- bzw. abgerundet.

Die Testbereiche unterscheiden sich innerhalb der Fahrzeugkategorien (vgl. Abb. 4-9). Bei Kategorie A kann die Trennlinie in Anlehnung an die GTR

auf 1700 mm festgelegt werden. Bei Kategorie B haben der Kinderkopfbereich wegen der Fahrzeugkontur für die Frontscheibe keine und der Erwachsenkopfbereich eine geringe Relevanz. Die Aufprallorte liegen bei einer oberen Grenze von 2100 mm am weitesten vorn. In Kategorie C werden der Kinder- und Erwachsenkopfbereich mit ähnlich hoher Relevanz für die Frontscheibe durch eine Trennlinie bei 1600 mm geteilt, die obere Grenze bilden 2100 mm Abwickellänge. Bei Kategorie D liegen die Trennlinie mit 1900 mm und die obere Grenze mit 2400 mm am weitesten hinten. In Bezug auf den Kontakt mit der Frontscheibe ergibt die Überlagerung mit den fahrzeugfesten Abwickellängen aus Abb. 4-5 die unterschiedliche Relevanz der Testbereiche in Abb. 4-9.

Der Testbereich wird an den Seitenrändern und an der oberen Kante durch eine geeignete Referenz, wie im Vorprojekt detailliert aufgeführt, begrenzt (seitliche Referenzlinie, s. Anhang Abb. 10-6). Für ein Fahrzeug der Kategorie A ergibt sich in Abb. 4-10 der Testbereich von 1000 mm über 1700 mm bis zu 2300 mm mit den zwei Zonen Windlauf- und Windschutzscheibenbereich.

Der Testbereich schließt mit der Windlaufzone an den GTR-Bereich an. Der Windlaufzone und dem Frontscheibenbereich werden in dieser Kategorie unterschiedliche Aufprallwinkel der Impaktoren zugeordnet. Der Übergang zwischen den beiden Zonen wird durch Abrollen einer Kugel (Durchmesser 165 mm) an der hinteren Haubenkante gemäß Abb. 4-11 ermittelt. Die Berührlinie der Kugel auf der Scheibe wird als Grenze zwischen den Zonen Windlauf- und Frontscheibenbereich definiert. Abwickellängen (WADs) werden mit Hilfe eines flexiblen Bandes markiert, das die Bodenebene berührt und entlang der Kontur des Fahrzeugs entsprechend der existierenden Testverfahren gezogen wird.

Impaktor	Abwickellänge, WAD [mm]							
	A (Sedan)		B (SUV)		C (OneBox)		D (Sportwagen)	
	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis
CH	1000*	1700	1000*	1500	1000*	1600	1000*	1900
AH	1700	2300	1500	2100	1600	2100	1900	2400

Relevanz hinsichtlich Kontakt Frontscheibenbereich: **hoch** - mäßig - *gering*

Abb. 4-9: Definition von Testbereichen und Relevanz innerhalb der Kategorien

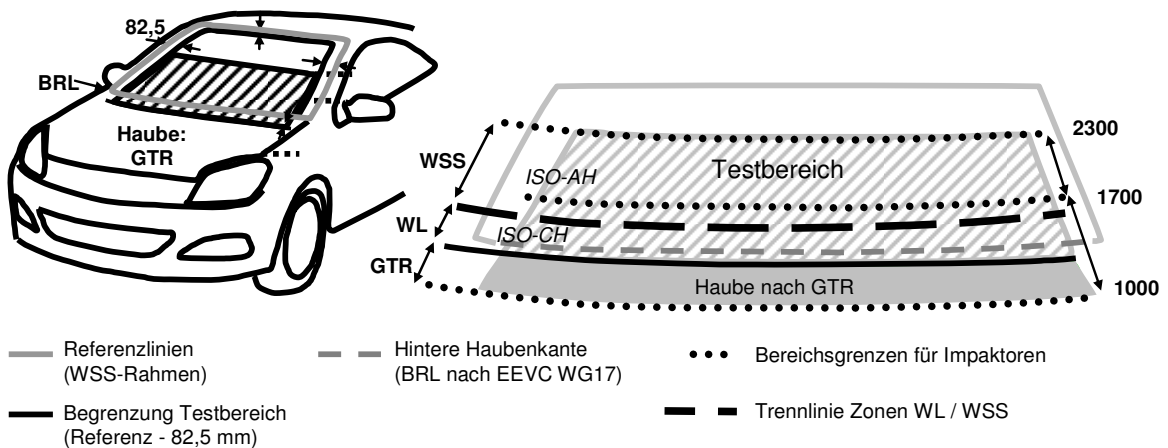


Abb. 4-10: Beispiel für den Testbereich am Fahrzeug der Kategorie A (Referenzfahrzeug)

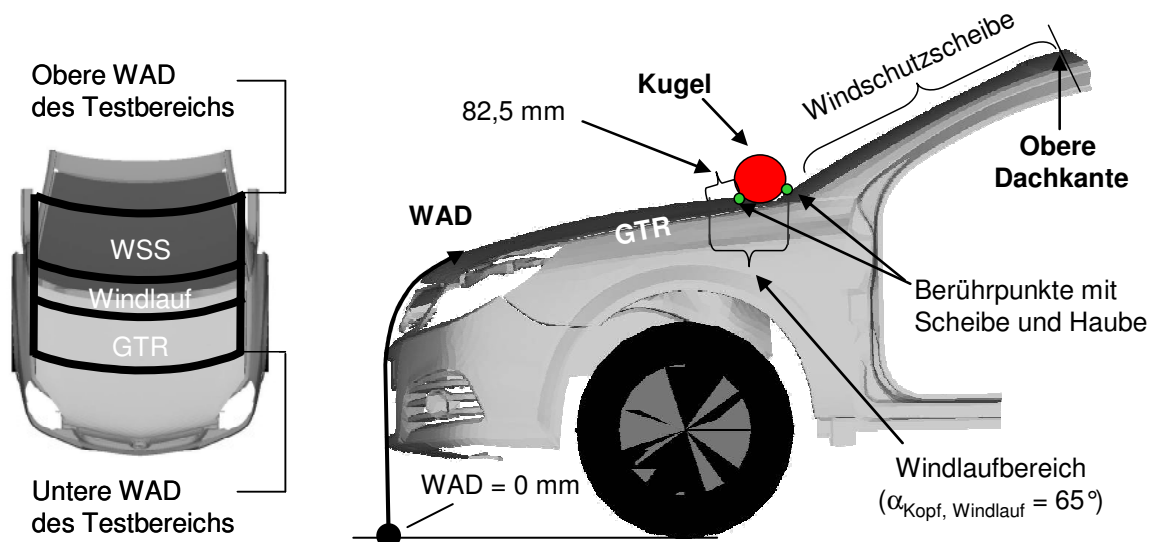


Abb. 4-11: Unterteilung der gesamten Testbereiche zum Kopfaufprall

Der definierte Testbereich in Abb. 4-12 am Referenzfahrzeug der Kategorie A weist, verglichen zum Euro NCAP-Bereich, eine Erweiterung nach hinten auf. Der Übergang vom Kinderkopf- zum Erwachsenenkopfbereich bei WAD = 1700 mm ist mit der GTR identisch. Die obere Grenze des Testbereichs ist von WAD = 2100 mm auf 2300 mm um 200 mm nach hinten verschoben.

Die Punkte in Abb. 4-12 markieren denkbare Stellen mit geringen Deformationswegen und hohen Steifigkeiten als potenzielle kritische Aufprallpunkte. Keinen bzw. geringen Schutz für

den Kopfaufprall bieten insbesondere die daran angrenzenden Übergänge zur Motorhaube und die A-Säulen, da bei diesen Bereichen i. d. R. ein geringerer Deformationsraum zu Verfügung steht sowie steife Bauteile bzw. scharfe Kanten vorliegen. Weiterhin ist die „Struktur ohne Einfluss“ nach [EUR08] gekennzeichnet, in der durch geringere Steifigkeiten der Frontscheibe ohne dahinter liegende unnachgiebige Strukturen bei einem Aufprall niedrigere Kopfbelastungen vorliegen (vgl. Scheibentests im Vorprojekt).

Abwickellänge [mm]	Übergang AH/CH	Grenze AH
Euro NCAP	1500	2100
GTR (ohne WSS)	1700	2100
Neues Verfahren mit WSS	1700	2300

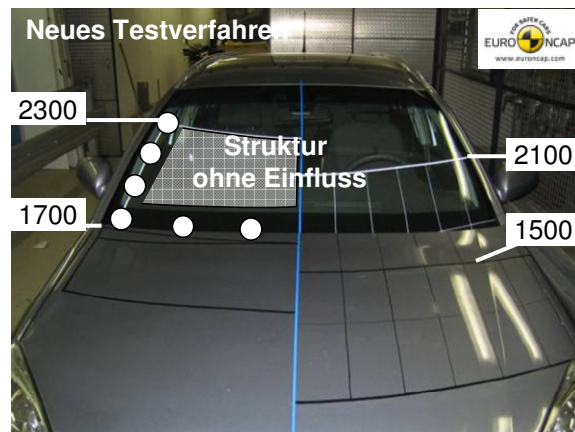


Abb. 4-12: Einteilung des Testbereichs am Referenzfahrzeug mit Abwickellängen

4.3.5 Bedingungen für crashaktive Systeme

Crashaktive Systeme der passiven Sicherheit, die bei einer Kollision i. d. R. pyrotechnisch ausgelöst werden, müssen selbst folgenden grundlegenden Anforderungen entsprechen [KAL08a]:

- Schaffung von zusätzlichem und ausreichendem Deformationsraum (z. B. aufstellbare Motorhaube, Außenairbag);
- Ausreichend entwickelte Sensorik zur Auslösung;
- Funktionalität des Auslösemechanismus (z. B. aktive Scharniere);
- Zuverlässigkeit, Haltbarkeit, hohe Lebensdauer;
- Auslöseschwellen im relevanten Geschwindigkeitsbereich;
- Energieabsorption;
- Funktionalität über Lebensdauer;
- Berücksichtigung von Umwelteinflüssen;
- Aktivierung des Systems nur in relevantem Geschwindigkeitsbereich;
- Berücksichtigung von Nebenfunktionen (z. B. Pop-Up Haube);
- Airbaginnendruck in angemessenem Bereich;
- Dynamik, Nachschwingverhalten;
- Instandsetzbarkeit.

Bei dem Einsatz eines derartigen Systems, wie z. B. eines Airbags, müssen im Testverfahren zusätzliche Randbedingungen beachtet werden. Dabei sind die wichtigsten Kriterien bei einem crashaktiven Airbagsystem:

- Auslösung;
- Einhaltung eines Mindestabdeckungsgebietes;
- Zeit bis zur vollen Entfaltung;
- Keine Beschädigung von Fahrzeugteilen bei Fehlauflösung;
- Einhaltung der Funktionsbedingung (Zeit bis zur Aufstellung und Standzeit).

Die Zeit für die Auslösung lässt sich aus der Dummybewegung, dem Aufstellvorgang der Haube sowie der nötigen Zeit bis zur vollen Entfaltung des Airbags berechnen. Es muss nach Abb. 2-6 (1) gewährleistet sein, dass die Gesamtauslösezeit geringer ist als die Kopfaufprallzeit und (2) das System bis zum Kopfaufprall voll entfaltet ist (vgl. Abb. 4-13). Ist die Funktionsbedingung nicht erfüllt, können z. B. schwere Verletzungen durch den hoch dynamischen Aufstellvorgang in einer gegenläufigen Bewegung mit überhöhter Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug und Kopf verursacht werden.

Die Kopfaufprallzeit ist nach Kapitel 2 als der Zeitraum definiert, der zwischen dem Erstkontakt des Fahrzeugs mit dem Fußgänger und dem Erstkontakt des Kopfes auf der Fahrzeugfront liegt. Dazwischen muss der Fußgänger detektiert, die Information von einem Steuergerät verarbeitet und schließlich das Aktivierungssignal gesendet und die Aufstellung realisiert werden. Die Systemantwortzeit setzt sich aus zwei Zeitspannen zusammen und wird durch Addition von Sensierzeit und Aufstellzeit errechnet. Die Sensierzeit beginnt mit dem Erstkontakt zwischen Fahrzeug und Fußgänger und endet mit dem Aktivierungssignal. Die Aufstellzeit beginnt bei der Aktivierung und dauert bis zur vollständigen Entfaltung des Systems an (vgl. Abb. 4-13).

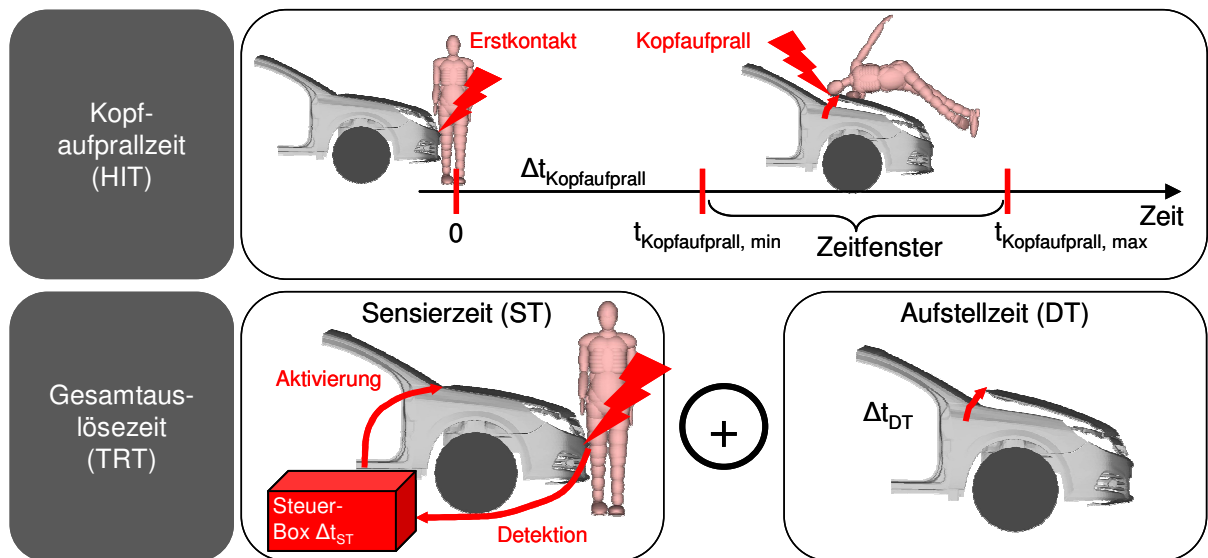


Abb. 4-13: Funktionsbedingung für crashaktive Systeme [ECE05]

Die Funktionsbedingung lässt sich daher wie folgt beschreiben:

$$ST + DT = TRT < HIT \quad \text{Gl. 4-1}$$

Es muss in der Funktionsbedingung zudem eine Zeitreserve für einen möglichen späteren Kopfaufprall z. B. durch geringere Fahrzeuggeschwindigkeiten erfüllt sein, um durch die erforderliche ausreichende Standzeit in jedem Fall die Bedingung der vollen Systemaktivierung bei Kopfaufprall zu gewährleisten:

$$t_{\text{Standzeit, min}} = t_{\text{HIT, max}} - t_{\text{HIT, min}} \quad \text{Gl. 4-2}$$

Die o. g. zeitlichen Bedingungen können bei einem Airbagsystem insbesondere für den Aufprall im Bereich des Kinderkopfes zu Konflikten führen, da die Kinder aufgrund ihrer von der Körpergröße bestimmten Aufprallkinematik die geringsten Kopfaufprallzeiten aufweisen.

Ein Airbagsystem sollte zudem für den Bereich der Windschutzscheibe eine Mindestschutzzone durch Energieabsorption aufweisen, die mindestens die A-Säulen und den Windlauf abdeckt. Auch Umwelteinflüsse, wie beispielsweise Eis, Wasser und Staub [KAL08a], sind zu beachten, da sich das System im Außenbereich des Fahrzeugs befindet. Das System darf nur innerhalb eines relevanten Geschwindigkeitsbereiches (z. B. 20 km/h - 50 km/h) aktiviert werden und muss ggf. auch gewünschte Nebenfunktionen gewährleisten. Unterhalb dieses Geschwindigkeitsbereiches ist von einer geringeren Verletzungsgefahr und damit verbundenem reduzierten Bedarf an Deformationsraum auszugehen, so dass Verletzungen z. B. durch Polsterungen gemindert werden können.

Oberhalb der Geschwindigkeiten können bei sehr geringen Kopfaufprallzeiten und einer abweichenden, unbestimmten Aufprallkinematik (z. B. Flugbewegung des Fußgängers) die Anforderungen an Aufstellzeit und Energieabsorption durch crashaktive Fahrzeugsysteme in der Regel nicht mehr erfüllt werden.

Der Airbag kann die aufstellende Funktion einer aktiven Haube erfüllen, obschon angebrachte Scharniere nicht durch den Airbag behindert werden dürfen. Ein Airbag sollte generell bei vollständiger Entfaltung mindestens 150 mm zusätzlichen Verzögerungsweg schaffen [KAL08a], wenn im Extremfall der Deformationsraum allein durch den Airbag bereit gestellt werden muss, z. B. beim Aufprall auf die A-Säulen. Die Auswirkungen eines Kopfaufpralls auf den seitlichen Bereich des Airbags müssen berücksichtigt werden. Der seitliche Abprall des Impaktors verstärkt durch einen Rückpralleffekt („Rebound“) und die sich aufstellende Haubenkante, hat Einflüsse auf entstehende Kopf- und Halsbelastungen, die mit den aktuellen Impaktoren derzeit nicht messbar sind.

4.3.6 Verletzungskriterium

Bei Anpassung des existierenden Kopfaufprallversuchs wird wie im Vorprojekt durch Aufzeichnung der linearen Beschleunigungen der HIC-Wert als Verletzungskriterium zur Bewertung verwendet. Bei der Erarbeitung des neuen Testverfahrens im folgenden Kapitel 5 werden weitere Kriterien neben dem HIC-Wert herangezogen. Als Grundlage für das zu erfüllende Kopfschutzkriterium wird das Risiko für das Auftreten von schweren Kopfverletzungen AIS3+ genutzt. Hierzu wird üblicherweise

die so genannte S-Kurve mit einer Skala zum Verletzungsrisiko von 0 % bis 100 % auf der Ordinate genutzt. Dazu wird auf der Abszisse eine Skala mit den HIC-Werten eingetragen. Die graue AIS3-Kurve beschreibt beispielsweise bei einem etwa 30%igen Verletzungsrisiko einen HIC-Wert von 1000 (vgl. Abb. 4-15). Die Kopfschutzkriterien verschiedener Prüfverfahren sind in Abb. 4-15 graphisch dargestellt.

In der geänderten EU Phase II und der GTR sind als HIC Grenzwerte 1000 bzw. 1700 gewählt [EUR08] [ECE07]. Die Anforderungen nach EECV WG17 liegen für den HIC-Grenzwert bei 1000 [EEV03]. In JNCAP gilt dagegen für die Bewertung ein sehr breiter Grenzbereich von 650 bis 2000 [NAS08].

Der HIC-Grenzwert wird aus der gemessenen durchschnittlichen Beschleunigung errechnet. Die Beschleunigung ergibt sich aus der Änderung der Geschwindigkeit dv pro Zeitintervall dt , so dass die Geschwindigkeitsänderung indirekt in die Berechnung des HIC-Wertes eingeht. Da der HIC-Wert aus einer Maximalwertbetrachtung des Verlaufs der Beschleunigungen ermittelt wird, können quantitative Zusammenhänge zwischen den Aufprallgeschwindigkeiten, den Deformationswegen und den HIC-Werten nur in Bezug auf die Kurvenverläufe erstellt werden. Nach [BEA07] führen die unterschiedlichen Kurvenformen der Beschleunigungen bei gegebenem HIC von 1000 und dem Ziel eines minimierten Deformationswegs zu abweichender Effizienz (vgl. Abb. 4-14).

Das theoretische Optimum im Deformationsweg kann durch die Wayne-State-Kurve erreicht wer-

den, was jedoch in der Praxis aufgrund ihres infiniten Verlaufs nicht möglich ist. Aus diesen Verläufen lässt sich der positive Einfluss eines höheren primären Maximums sowie das ungünstige Verhalten bei einem geringen primären Anstieg und einem hohen sekundären Maximalwert ableiten, z. B. bei einer sehr weichen Struktur und dem Aufprall auf dem harten Motorblock. Der Einfluss der Testgeschwindigkeit auf die Anforderungen an die Struktur der Fahrzeugfront wird im Anhang Abschnitt 10.5 anhand des Rechteckverlaufs (3) bei 75 % Effizienz bestimmt unter der Annahme eines ideal plastischen Stoßes senkrecht zur Struktur ohne Rückprall. Als Ausgangslage gilt ein HIC-Wert von 1000 bei $v_1 = 35$ km/h Aufprallgeschwindigkeit.

Damit führt bei dem Rechteckverlauf eine Struktur- auslegung mit minimal nötigem Deformationsweg auf $HIC = 1000$ für $v_1 = 35$ km/h bei der Erhöhung auf $v_2 = 40$ km/h zu einem HIC von 1705. Verglichen zu v_1 steigt der HIC-Wert überproportional um 70,5 % bei einem Anstieg des maximalen Energieeintrags in die Struktur um 30,6 %. Die Ableitung eines Grenzwertes erfolgt durch den Vergleich des Einflusses der Geschwindigkeit auf die Deformationswege und den HIC-Wert unter Hinzunahme bestehender Definitionen und der S-Kurve aus Abb. 4-15. Daraus ergeben sich ein $HIC = 1350$ (etwa 50 % AIS 3+) bei einer Geschwindigkeit von 40 km/h oder ein $HIC = 1000$ (etwa 30 % AIS 3+) bei 35 km/h als sinnvolle Grenzwerte. Die letztgenannte Möglichkeit wird auf Basis der in Abschnitt 4.3.2 bestimmten Geschwindigkeit somit in das Testverfahren mit Anlehnung an das GTR-Verfahren übernommen.

Kurvenform	Effizienz [%]
1 Wayne-State-Kurve	100
2 Abfallende Rampe	90
3 Rechteck	75
4 Gleichschenkliges Dreieck	60
5 Halbsinus (Sinus)	52 (63)
6 Ansteigende Rampe	45

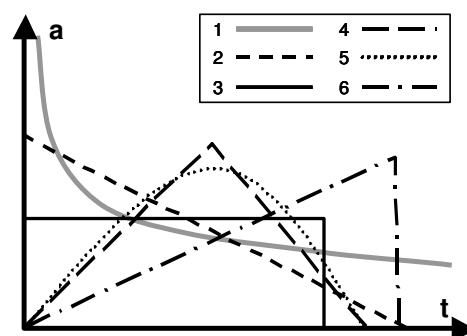
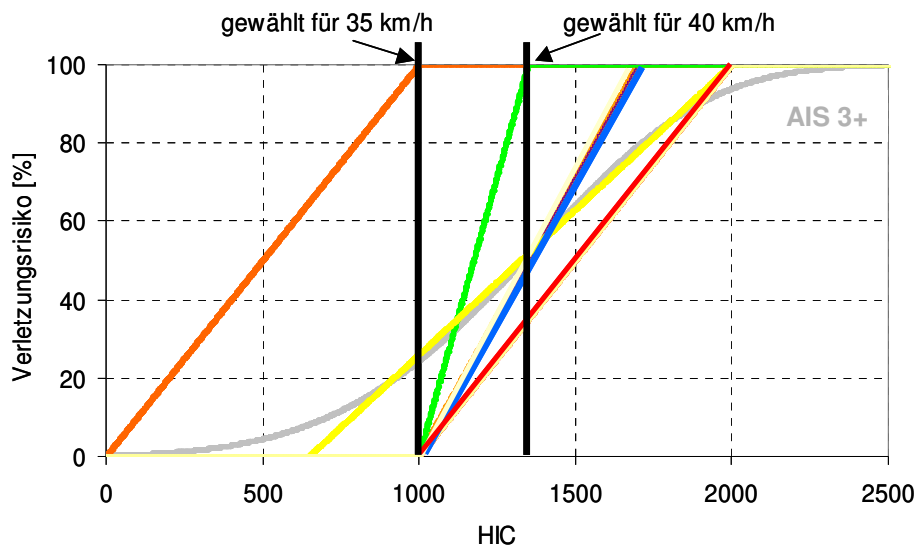


Abb. 4-14: Effizienz von verschiedenen Kurvenverläufen beim HIC-Wert



Verfahren:	EEVC WG17	Phase I	geänderte Phase II	IHRA	ACEA	GTR	Euro- NCAP	JNCAP
HIC- Bereich bzw. Gren- ze:	1000	1000(2/3) 2000(1/3)	1000(2/3) 1700(1/3)	1000(2/3) 2000(1/3)	1000(2/3) 1700(1/3)	1000(2/3) 1700(1/3)	1000 - 1350	650 - 2000

Abb. 4-15: Grenzwerte Kopfschutzkriterium

4.3.7 Zusammenfassung der Parameter für den Kopfaufpralltest

Die Parameter zur Nutzung des existierenden Kopfaufpralltests für Modul 1 (vgl. Vorprojekt) ergeben sich aus Abb. 4-16. Die Fahrzeuge werden gemäß Abschnitt 4.2.2 in vier Kategorien A, B, C und D gegliedert. Der Testbereich ist in einen Kinderkopfbereich (CH) und einen Erwachsenenkopfbereich (AH) bei Verwendung der beiden ISO-Impaktoren unterteilt. Die Winkel zur Horizontalen sind je nach Lage für Windlauf und Windschutzscheibe zugeordnet. Die Definition des Testwinkels

von 65° im Windlauf ist bei allen Kategorien gleich. Für die Impaktorgeschwindigkeit von 35 km/h wird der Grenzwert von HIC = 1000 festgelegt. Hinzu kommt die Funktionsbedingung aus Abschnitt 4.3.5 für die crashaktiven Systeme.

Die Parameter für das Testverfahren weisen nach Abb. 4-17 unterschiedliche Abhängigkeiten auf. Die Testbereiche sind dabei durch den Impaktor und die Fahrzeugkategorie bestimmt, wobei die Winkel ausschließlich auf den Zonen am Fahrzeug (Windlauf, Frontscheibe) und den Kategorien beruhen.

Kategorie	ISO-Impaktor CH/AH: 3,5/4,5 kg	WAD [mm]		Testwinkel [°]		v [km/h]	HIC
		von	bis	WL	WSS		
A (Sedan)	CH	1000	1700	65	50	35	1000
	AH	1700	2300		-		
B (SUV)	CH	1000	1500		65 ^{*)}		
	AH	1500	2100		35 ^{**) / 50}		
C (OneBox)	CH	1000	1600		50		
	AH	1600	2100		65		
D (Sportwagen)	CH	1000	1900				
	AH	1900	2400				

Abb. 4-16: Randbedingungen Kopfaufpralltest, ^{*)} sehr geringe Relevanz / ^{**) nur für Kinderkopf}

Testbereiche	Winkel
Impaktor	Zone: WL oder WSS
Fahrzeugkategorie	

Abb. 4-17: Abhängigkeiten der Randbedingungen

5 Auslegung des Testverfahrens für crashaktive Systeme

Zur Auslegung des Testverfahrens für den Frontscheibenbereich unter Berücksichtigung crashaktiver Systeme wird das Referenzfahrzeug der Kategorie A (Opel Vectra/Signum, durchschnittliche Limousinenfront, vgl. Kapitel 3) mit einem Airbagsystem einschließlich aufstellbarer Haube erweitert. Die im Folgenden erläuterten Untersuchungen werden sowohl in der numerischen Simulation als auch anschließend am Realfahrzeug durchgeführt.

Derzeit sind eine sehr geringe Anzahl von Fahrzeugen mit aktiven Hauben ausgestattet und noch keine Fahrzeuge mit Außenairbags im Straßenverkehr vorzufinden. Dadurch werden reale Unfalldaten mit Fahrzeugen, welche mit crashaktiven Systemen ausgestattet sind, in naher Zukunft kaum verfügbar sein. Eine Bestätigung des Nutzens solcher Systeme anhand von Realunfällen ist daher noch nicht möglich. Die erforderlichen Rückschlüsse, insbesondere die Bewertung der Systeme, lassen sich jedoch aus Dummyversuchen generieren.

Der Einsatz eines crashaktiven Systems bei den Realfahrzeugen aus Abb. 5-1 erfolgt in der Kategorie A. Bei dem in diesem Kapitel untersuchten Airbagsystem wird die Haube hinten angehoben, und der Airbag deckt den unteren Bereich der Windschutzscheibe und die A-Säulen ab.

Im Vorprojekt sind bereits Testbereiche markiert und Impaktortests an einem Fahrzeug der Kategorie C (OneBox) durchgeführt worden. Ein crashaktives System findet bei dieser Kategorie allerdings keine Anwendung, weil die Funktionsbedingung aus Kapitel 4 durch die kurze Front in der Regel nicht erfüllt werden kann. Aufgrund der Frontgeometrie lässt sich ein derartiges System vor allem bei einem Realfahrzeug der Kategorie A (Limousine, Sedan) sinnvoll integrieren.

Zum einen wird nach Aufbau des Versuchsfahrzeugs eine Fahrzeug-Fußgänger-Kollision durch einen Dummyversuch nachgestellt, um unter möglichst realitätsnahen Umständen sowohl das Schutzsystem als auch das neue Testverfahren zu bewerten (vgl. Kapitel 6). Als Fußgängerdummy wird der Honda Polar-II-Dummy eingesetzt [HON04] [TAK07]. Der Dummytest wird gemäß dem Entwurf des SAE-Protokolls j2782 „Recommended Practice for Pedestrian Dummy“ [SAE07] durchgeführt.

Zum anderen wird das modulare bzw. hybride Testverfahren aus dem Vorprojekt unter Verwendung realer und virtueller Methoden für die Bewertung crashaktiver Systeme weiterentwickelt. Die im vorangegangenen Kapitel bestimmten Parameter bilden die Eingangsgrößen, wobei digitale Modelle für numerische Simulationen und reale Fahrzeuge notwendig sind. Das neue Testverfahren wird anhand des Referenzfahrzeugs demonstriert.

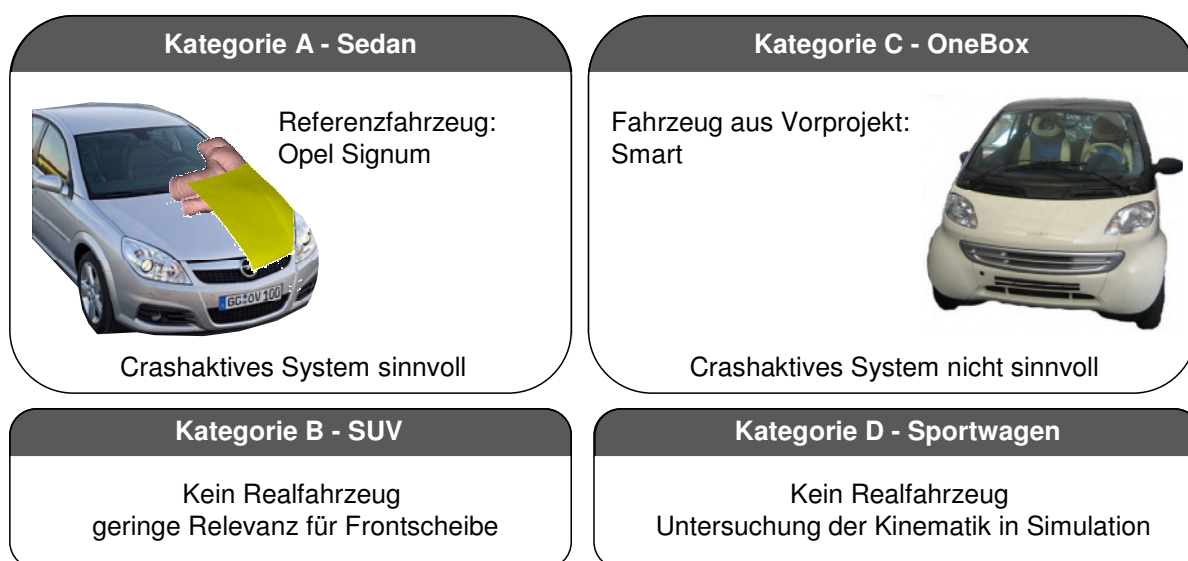


Abb. 5-1: Realfahrzeuge in den einzelnen Kategorien

5.1 Referenzfahrzeug mit Airbag in der Simulation

Das 3D-MKS-Modell wird durch ein Re-engineering zu einem FE-Modell erweitert, um eine Voraussetzung für den Airbag und den Öffnungsmechanismus sowie eine Basis für detaillierte Untersuchungen von Testmethoden zu ermöglichen. Bei der Digitalisierung im Re-engineering nach Abb. 5-2 wird das ausgewählte Referenzfahrzeug mit einem optischen System (ATOS I) vermessen und anschließend in CAD-Mittelflächen umgewandelt. Alle für diesen Prozess ausgewählten Komponenten werden zu FE-Modellen vernetzt und entsprechend der realen Abmessungen angeordnet. In zusammengebauter Konfiguration kann auf diese Weise die gesamte Fahrzeugfront als FE-Modell erstellt werden.

Alle beim Aufprall relevanten Komponenten sind im digitalen Modell in Abb. 5-3 mit den charakteristischen Fahrzeugdaten zusammengefasst. Die Materialien, Dicken und Massen einzelner vereinfachter Komponenten sind in Abb. 10-13 und Abb. 10-14 aufgelistet. Die Masse der durch den Airbag dynamisch bewegten Motorhaube mit 9,5 kg wird in das Modell überführt. Übrige Massen und Materialdicken werden aufgrund der Zugänglichkeit abgeschätzt und weisen im Vergleich zur Motorhaube für die Dynamik eine deutlich geringere Relevanz auf. Zusätzlich werden Bauteile des Motorraums, die sich nahe der Haube befinden, als vereinfachte starre Geometrien und eine Fahrzeug-Punktmasse zum Erreichen der Gesamtmasse eingebunden.



Abb. 5-2: Digitalisierung der Fahrzeugfront [WAL08]

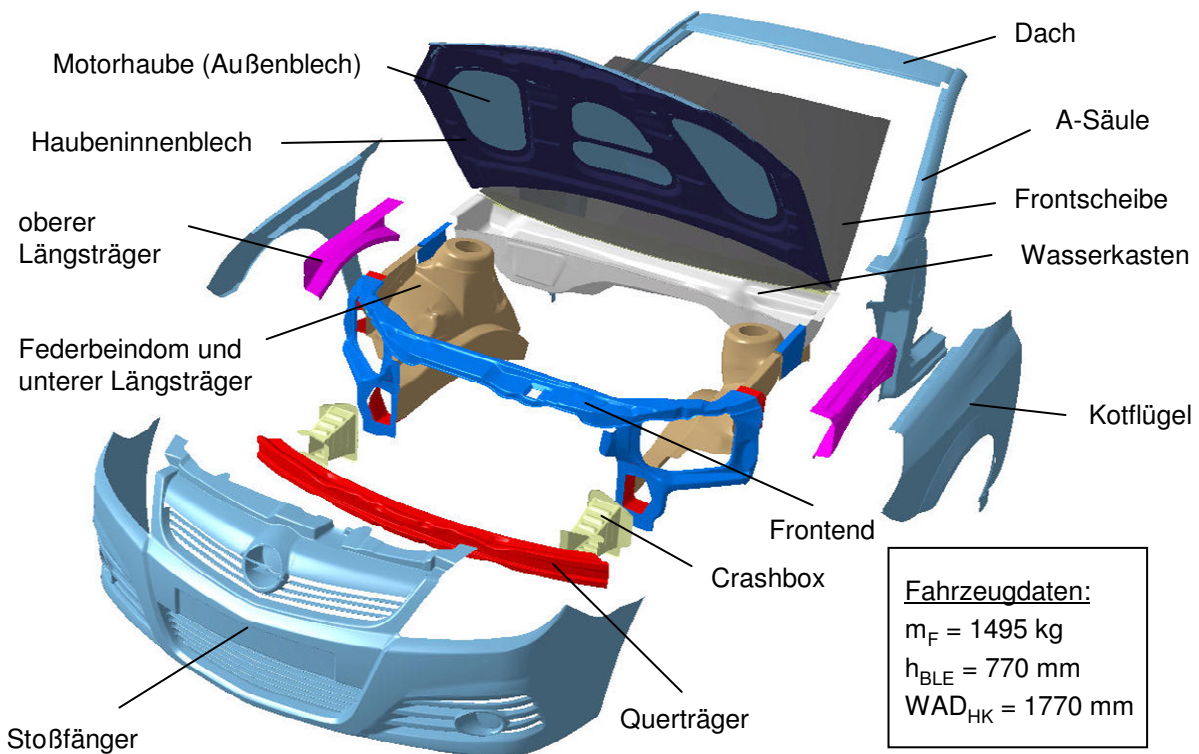


Abb. 5-3: Komponenten der digitalisierten Fahrzeugfront mit Fahrzeugdaten (m_F : Fahrzeugmasse, WAD_{HK} : Abwickellänge bis zu Haubenhinterkante)

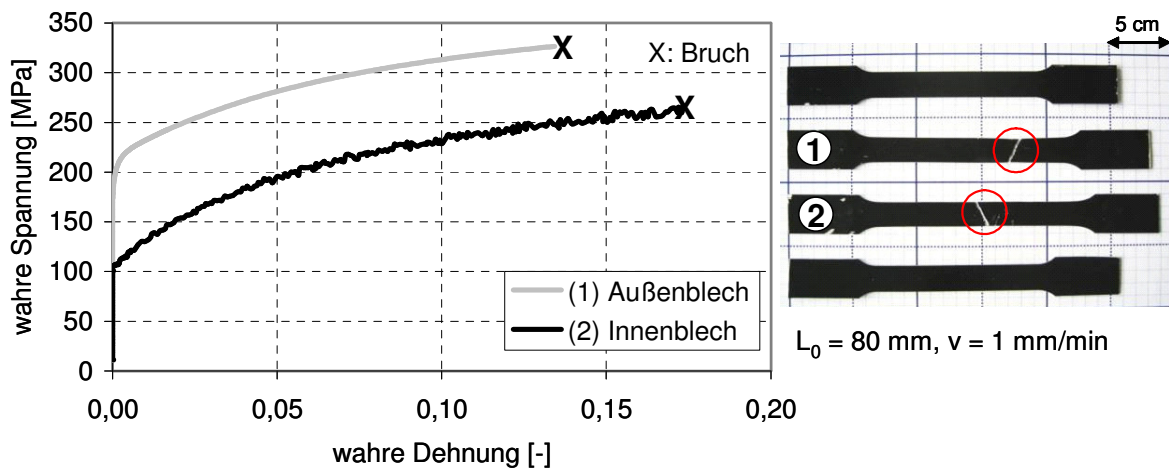


Abb. 5-4: Spannungs-Dehnungskurven der Zugversuche (aus APROSYS: Citroën C6)

Für das FE-Modell werden neben den Geometrien und den Verbindungen der einzelnen Komponenten Materialmodelle benötigt. Dazu werden öffentlich zugängliche Daten eingesetzt. Zusätzlich werden Proben einiger Bauteile, wie z. B. der Motorhaube aus Aluminium, herausgetrennt und gemäß der Norm EN 10002 die Materialeigenschaften in einem Zugversuch analysiert (vgl. Abb. 5-4). Die Materialproben entstammen einer im Rahmen des APROSYS-Projektes untersuchten Motorhaube. Die resultierenden Spannungs-Dehnungskurven werden in das Simulationsmodell für die Aluminiumhaube übernommen. Aufgrund des im Allgemeinen vereinfachten Modells und den Fokus auf das Testverfahren selbst, wird diese Vorgehensweise als hinreichend betrachtet.

Für eine Belastungsgeschwindigkeit von $v = 1 \text{ mm/min}$ und eine Anfangslänge L_0 von 80 mm ergeben sich die Spannungs-Dehnungsverläufe in Abb. 5-4. Die Bleche bestehen aus unterschiedlichen Aluminiumlegierungen, da sich die Anforderungen an das Innen- und Außenblech etwa im Hinblick auf die Falzbarkeit unterscheiden. Aluminium besitzt näherungsweise dehnratenuabhängige Eigenschaften, so dass die auf diese Weise erhaltenen Kurven für das Simulationsmodell ausreichend sind.

Da das Realfahrzeug im vorliegenden Fall nicht zerlegt ist, erfolgt im Re-engineering die Überprüfung der Gesamtmasse durch Wiegen einzelner Komponenten. Trotz Abweichungen, die bei der Digitalisierung, der Modellierung und der Vernetzung entstehen, stimmt das Gewicht der digitalen Komponenten aus Abb. 5-3 bis auf ca. 5 % mit dem Gewicht der realen Komponenten überein.

Das FE-Modell besteht aus 4 mm bis 8 mm großen Schalenelementen und ermöglicht in Kombination mit den Materialmodellen die detaillierte Darstellung von Verformungen in der Karosseriestruktur. Um die später in der Realität durchgeführten Versuche in numerischen Simulationen abbilden zu können, muss einerseits ein Modell der Serienversion und andererseits ein Modell mit den Modifikationen für die Ausführung mit Airbagsystem und Haubenöffnung vorliegen.

Die Anpassung der notwendigen Komponenten auf den zur Verfügung stehenden Bauraum sowie die Auslegung der Öffnungskinetik der Motorhaube erfolgt im Simulationsmodell gemäß Abb. 5-5. Der zusätzliche Freiheitsgrad wird über ein Gelenkscharnier realisiert, welches eine Rotation der Haube von ca. 5° um die y-Achse zulässt und dabei einen Öffnungsspalt von 100 bis 120 mm freigibt (vgl. Abb. 5-8).

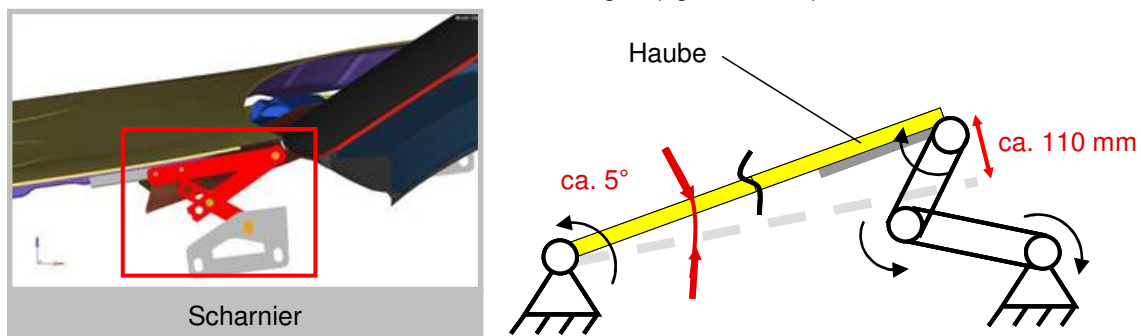


Abb. 5-5: Öffnungskinetik im Simulationsmodell

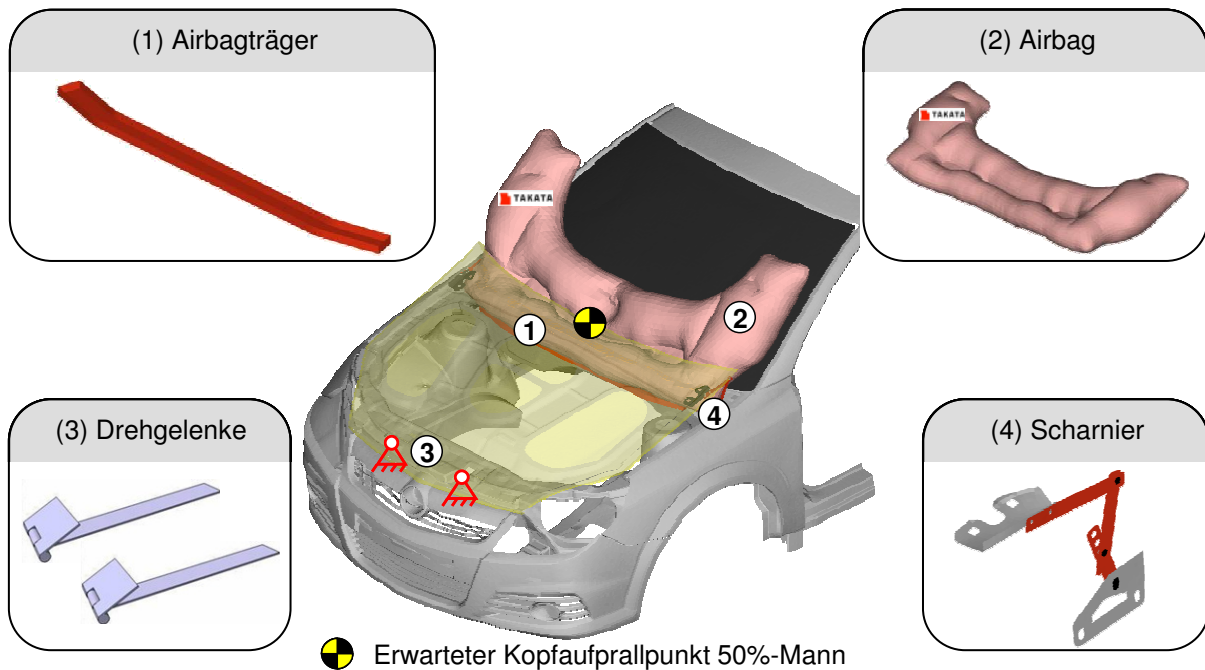


Abb. 5-6: Modifikationen am Simulationsmodell

Die relevanten Bauteile werden in das 3D-FE-Modell nach Abb. 5-6 integriert. Das FE-Modell des Airbags (2) ist durch den Hersteller Takata zur Verfügung gestellt worden. Der Airbagträger (1), in den der Airbag gefaltet ist, wird zwischen den Federbeindomen integriert. Das Referenzfahrzeug wird durch den o. g. Öffnungsmechanismus für den hinteren Teil der Motorhaube erweitert, so dass bei gleichzeitiger Konstruktion von vorderen Dreh-scharnieren (3) im Schlossbereich der zusätzliche Freiheitsgrad entsteht. Der zu erwartende Dummy-Kopfaufprallpunkt des 50 %-Mannes ist anhand von Abwickellängen aus den vorangegangenen Untersuchungen bereits abgeschätzt und markiert. Das FE-Modell wird in den Simulationen von Impaktortests sowie in den Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen gemäß den Abschnitten 5.4.2.2 und 5.4.4 verwendet, die zur Voruntersuchung des Systems vor dem Aufbau am Realfahrzeug dienen.

5.2 Modifiziertes Referenzfahrzeug mit Airbagsystem

Das Modell des Referenzfahrzeugs mit dem Fußgängerairbag wird auf Basis der Untersuchungen

und Konstruktionen im CAD- und FE-Modell aus dem vorangegangenen Abschnitt als reales Versuchsfahrzeug aufgebaut. Die im 3D-FE-Modell entwickelten Maßnahmen für eine Haubenöffnung mit Airbagsystem werden in das Referenzfahrzeug integriert. Das gesamte Airbagmodul und der Haubenaufstellmechanismus werden konstruiert und aufgebaut. Die Konstruktion der Teile erfolgt so, dass durch die Versuche beschädigte Motorhauben auf einfache Weise ersetzt werden können.

Für den zur Bewertung des Systems und des Testverfahrens folgenden Dummyversuch ist zusätzlich ein automatisches Bremssystem nach Abb. 5-7 erforderlich. Dabei erfolgt die mechanische Betätigung der Fußbremse durch maximal 400 N Federkraft ($F_{\text{Brem}, \text{Feder}}$). Mit Hilfe eines Pneumatikzylinders ($F_{\text{Rück}, \text{Pneumatik}}$) wird das Bremssystem im unausgelösten Zustand gehalten. Für die Vollbremsung des Fahrzeugs ist eine separate Unterdruckpumpe für den Bremskraftverstärker eingebaut.

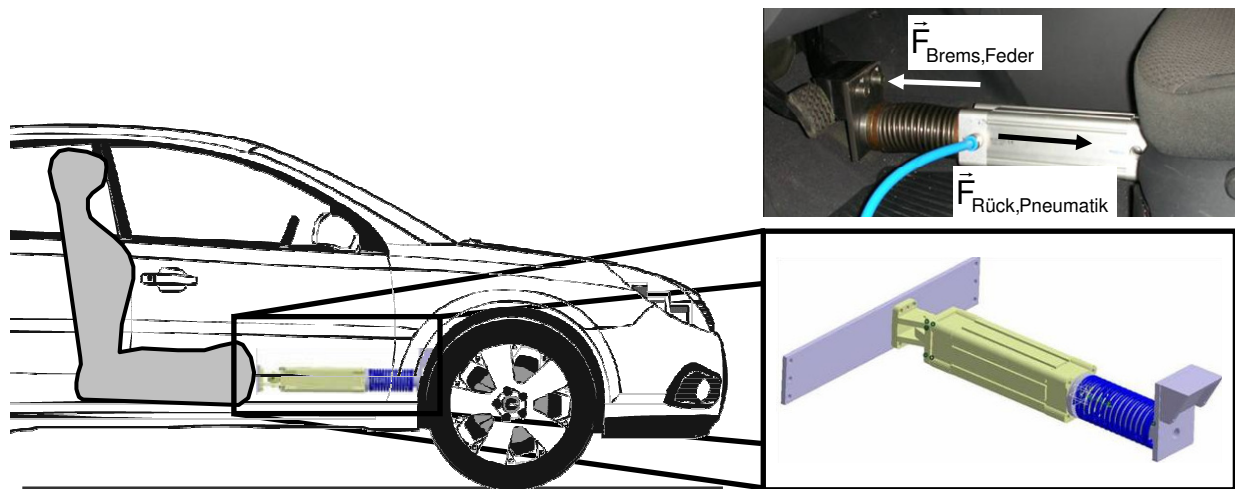


Abb. 5-7: Automatisches Bremssystem mit Pneumatikzylinder und Druckfeder

Die Änderungen für das modifizierte Fahrzeug beziehen sich in Abb. 5-8 im Wesentlichen auf die Scharniere sowie deren Anbindungen. Dadurch wird die Öffnung an der Hinterkante der Motorhaube ermöglicht. Für die hinteren Haubenscharniere wird ein dreiteiliges, bewegliches Gelenkscharnier einer Linearführung existierender Systeme vorgezogen, so dass keine Verkantungen zu erwarten sind und die maximal mögliche Haubenaufstellung größer als bei einer Linearführung ist (vgl. Abschnitt 10.6 Anhang). Die Scharnierglieder und damit der Öffnungsspalt können gemäß Abb. 5-8 verstellt und dem Airbag angepasst werden.

Das Gelenkscharnier hat bei maximaler Aufstellung einen Anschlag, so dass bei vollständiger Entfaltung des Airbags sowohl eine definierte Position der Haubenaufstellung als auch ein Einklappen des Scharniers beim Aufprall möglich ist. Zusätzliche Federsysteme sind aufgrund des unterhalb der Haube befindlichen Teils des Airbags nicht notwendig. Die Arretierung der Scharniere kann im normalen Betrieb mit Bolzen erfolgen, die beim Unfall pyrotechnisch auslösen oder abscheren.

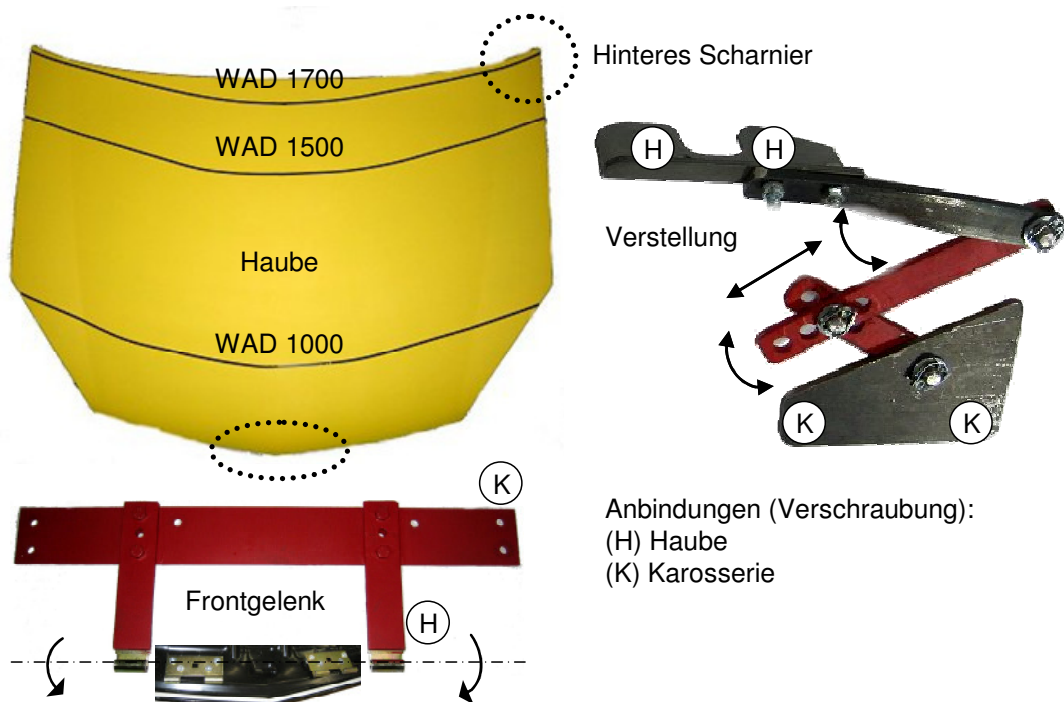


Abb. 5-8: Komponenten der Motorhaube mit Anbindungen

Der Airbag (2) selbst und die Vorrichtung für den Gaseinlass (4) werden vom Airbaghersteller Takata zur Verfügung gestellt (vgl. Abb. 5-9). Der Airbag wird gemäß einem Faltpfad gefaltet und im Airbagträger (1) befestigt. Ein Gasgenerator ist in der Mitte des Airbagträgers mit einem Diffusor als Gaseinlass angebracht. Das gesamte Airbagmodul setzt sich somit aus einem Airbagträger, dem gefalteten Airbag und dem Gasgenerator inklusive Diffusor zusammen. Die Haubenaufstellung erfolgt durch Kammer 1 des Airbags, während der Windlauf und A-Säulenbereich durch die Kammer 2 abgedeckt werden. Aufgrund der einzuhaltenden Standzeit in der

Funktionsbedingung verfügt der Airbag über ein Gewebe und Nähte, die jeweils silikonisiert sind und keine Auslassöffnungen haben. Die Füllmenge des vollständig entfalteten Airbags beträgt etwa 90 l.

Durch die Faltung wird dem Airbag die spätere Entfaltungsrichtung in Form eines Abrollens über die Frontscheibe vorgegeben. Der gefaltete Airbag wird im Modul mit einem einfachen Papierklebeband an der Oberseite fixiert und das Abdeckblech (3) mit L-Profilen am Airbagträger verschraubt. Zusätzlich sind in Abb. 5-10 der Gasgenerator und ein Schlauch zur Druckmessung montiert.

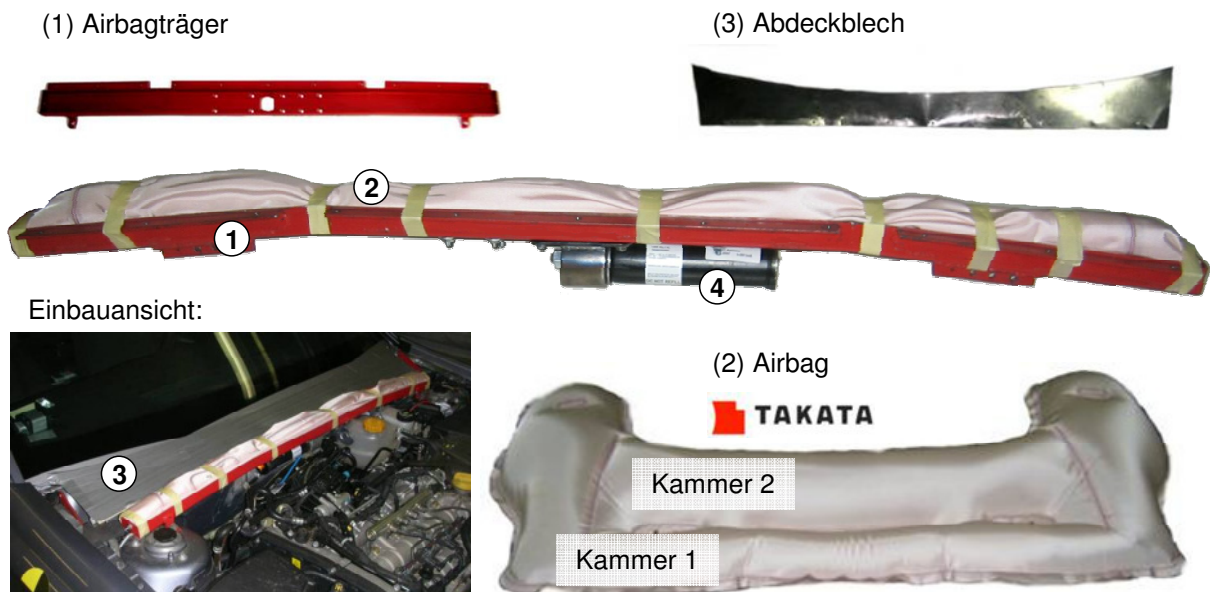


Abb. 5-9: Komponenten des Airbagmoduls und Einbauansicht

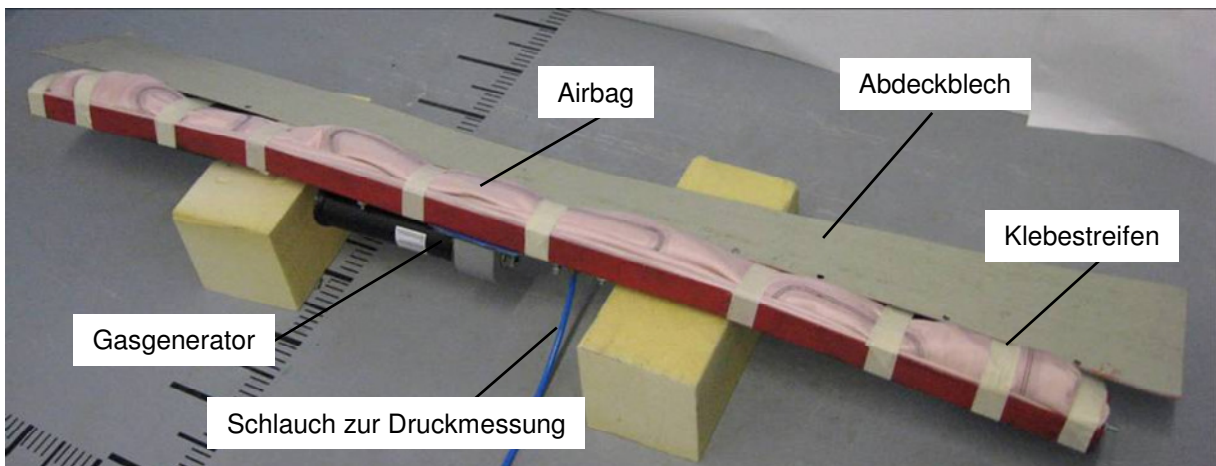


Abb. 5-10: Airbagmodul

Der Gasdruck während der Entfaltung wird in einer Zone des Airbags gemessen, in der ein geringer Gasfluss herrscht. Die Druckmessung erfolgt über einen Sensor, der eine Spannung proportional zum Gasdruck ausgibt. Der Druckluftschlauch ist nur wenige Zentimeter lang und wird durch den Drucksensor und ein dünnes 12 V-Kabel zur Messeinrichtung erweitert. Bei voller Entfaltung wird ein Überdruck von ca. 0,2 bis 0,7 bar erwartet.

Das fertige Airbagmodul wird in mittlerer Lage nach Abb. 5-11 auf die vordere Kante des Wasserkastens gesetzt und mittels der angeschweißten Winkel an der Schnittkante, d. h. die Oberkante des durch Blechausschnitte angepassten Wasserkastens, sowie den Federbeindomen ähnlich einer Domstrebe verschraubt. Auf diese Weise bildet es eine Einheit mit der Karosserie. Zur fehlerfreien Entfaltung des Airbags wird das Abdeckblech vollständig mit Gewebeband überklebt, um so alle scharfen Kanten des Moduls zu verdecken.

Die Aktivierung des Airbagsystems erfolgt durch ein elektrisches 12 V-Auslösesignal mit dem Gasgenerator. Die Haube verschließt nach Abb. 5-12 das Airbagsystem vollständig. Vor den dynamischen Versuchen wird die ungehinderte Beweglichkeit der Haube inklusive des gefalteten Airbags überprüft.

Bei der Zusammenfassung der umgesetzten Maßnahmen in Abb. 5-13 sind die Abwickellängen der Kategorie A am Fahrzeug markiert. Im Dummytest erfolgt die Auslösung durch einen Kontaktsensor mit Kupferschleifen (5) am Stoßfänger.

Das gesamte Scheibenwischersystem wird für die folgenden Untersuchungen entfernt und bleibt unberücksichtigt. Die Veränderungen an der Fahrzeugfront sind so ausgeführt, dass eine Wiederherstellung des Serienzustands mit geringem Aufwand möglich ist. Blechausschnitte an der Stirnwand sind jedoch zur Platzierung des Airbagmoduls notwendig.

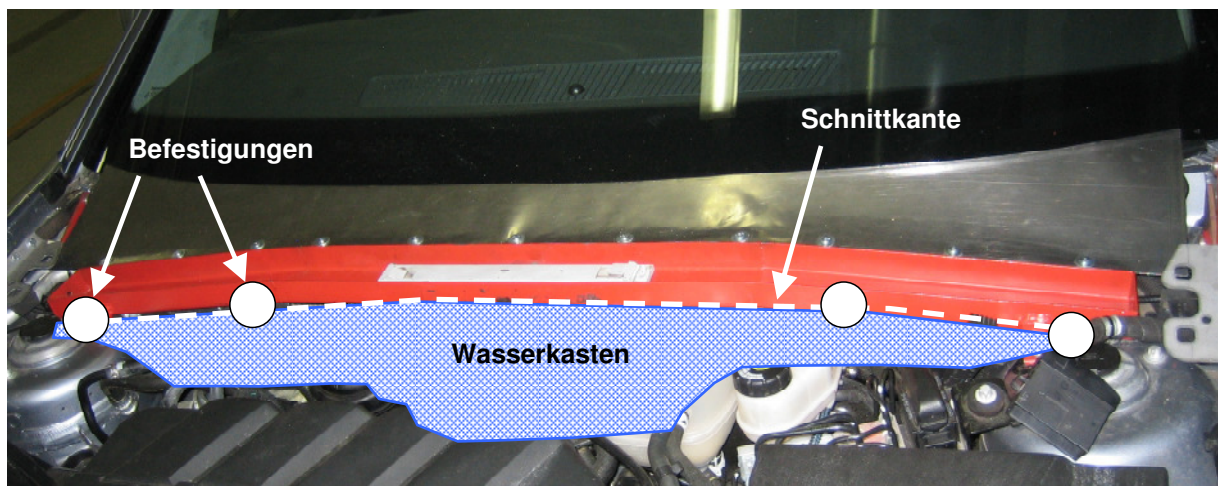
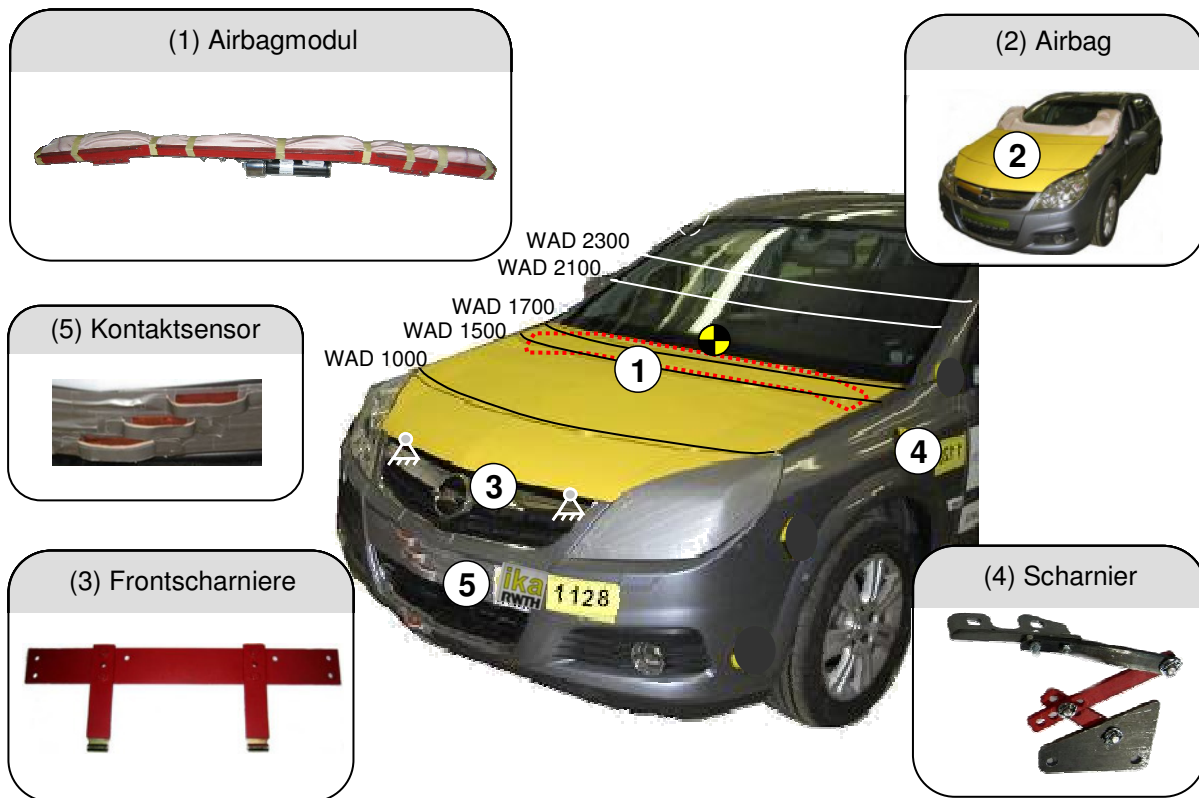


Abb. 5-11: Einbau des Airbagmoduls



Abb. 5-12: Versuchsfahrzeug inkl. Airbag und Motorhaube



 Erwarteter Kopfaufprallpunkt 50 %-Mann

Abb. 5-13: Serienfahrzeug mit Veränderungen für das modifizierte Fahrzeug

5.3 Dummyversuch

Im Dummytest können das Airbagsystem sowie die Anwendbarkeit und Robustheit des Testverfahrens durch die realitätsnahe Abbildung des Fußgängerunfalls bewertet werden. Die Systematik der Fahrzeuguntersuchung mit dem Polar-II-Fußgängerdummy ist in Abb. 5-14 dargestellt. Die Abwickellängen werden am Testfahrzeug vor dem Versuch markiert (vgl. Abb. 5-13), um später in den aufgenommenen Videosequenzen den Aufprallbereich zu bestimmen.

5.3.1 Polar-II-Fußgängerdummy

Fußgängerdummys werden seit 1998 von Honda entwickelt [HON08], um das Verhalten des menschlichen Körpers bei Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen zu testen. Das Ziel besteht darin, diejenigen Teile am Fahrzeug zu identifizieren, die am häufigsten an der Entstehung von Verletzungen beteiligt sind. Derzeit ist die zweite Generation des Fußgängerdummys im Einsatz, und die dritte Generation befindet sich in der Erprobung. Der als Polar-II bezeichnete Dummy stellt durch die Abbildung zusammenhängender Körperteile die Kinematik des menschlichen Körpers in einer Fahr-

zeug-Fußgänger-Kollision möglichst realitätsgetreu dar.

Im Unterschied zu den übrigen Komponentenversuchen werden mit dem Dummy die Absolutwerte für die Belastungen aller wesentlichen Körperteile insbesondere auch die im Fokus dieses Projekts stehenden Kopf- und Halsbelastungen erfasst und aufgezeichnet. Bei dem Polar-II-Dummy sind gegenüber dem Polar-I-Dummy die Verbindungselemente zur verbesserten Abbildung der Gelenke des menschlichen Körpers verändert worden. Die dazu notwendigen Anforderungen sind in der "SAE Pedestrian Task Group" [SAE07] festgelegt worden. Durch die in Abb. 5-15 gezeigten Messwertnehmer kann der Grad einzelner Verletzungsrisiken in acht verschiedenen Körperregionen des Polar-II-Fußgängerdummys bestimmt werden.

Zur drahtlosen Datenerfassung ist an jeder Seite der Lendenwirbelsäule ein Datenerfassungssystem („DTS TDAS G5“-System) angebracht. Die Bewegungsfreiräume für Kopf, obere Wirbelsäule, Brustkorb und Hüfte sind anhand von Leichenversuchen validiert worden.

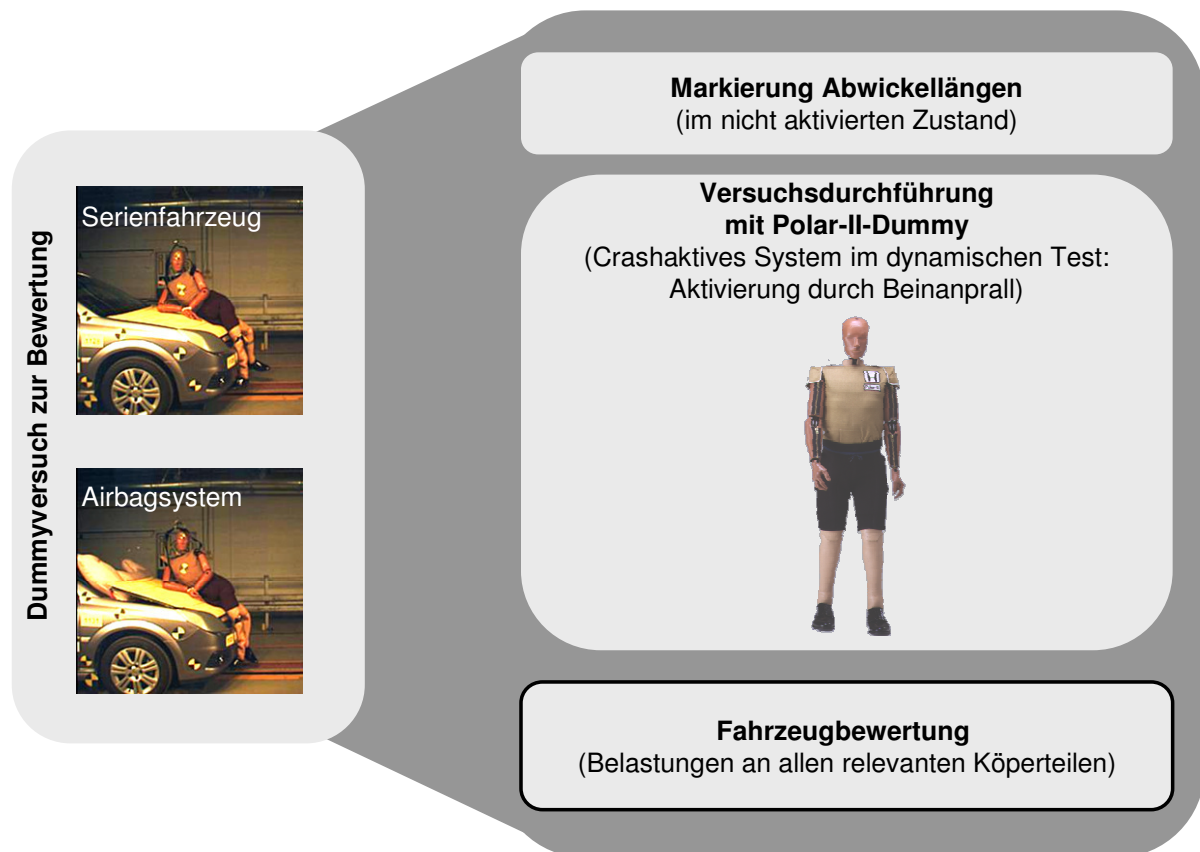


Abb. 5-14: Dummyversuch

Der Polar-II-Dummy weist nach Abb. 5-16 eine detaillierte Abbildung des Brustkorbs (Thorax) sowie im Unterschied zu den Insassendummys einen komplexen Aufbau des Kniegelenks auf. Zudem kann das Schienbein zwischen Kniegelenk und Fußgelenk durch eine Kunststoffverbindung wie im realen Unfall brechen. Die Körperteile mit Sollbruchstellen sind als Ersatzteile für den Dummy verfügbar.


5.3.2 Testkonfiguration

Um die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit zwischen den Dummyversuchen gewährleisten zu können, müssen Standards insbesondere hinsichtlich der einheitlichen Positionierung des Fußgängerdummys für den Testaufbau eingehalten werden.

Der Dummy ist nach den Definitionen einer einheitlichen Körperhaltung des Fußgängers in [SAE07] und [ECE07] in den Versuchen an der Fahrzeugmittelachse bei seitlicher Orientierung mit dem fahrzeugzugewandten Bein nach hinten

versetzt positioniert. Durch diese Positionierung ergibt sich die gehende Körperhaltung mit einem senkrecht zur Bewegungsrichtung des Fahrzeugs gewandten Kopf. Die Hände sind an den Handgelenken gekreuzt, um einen vorzeitigen Kontakt zu verhindern, der die Qualität und damit die Aussagekraft der Messungen unerwünscht beeinflussen könnte. Die beiden Füße des Dummys stehen mit den Schuhen auf festem Boden (vgl. Abb. 5-17).

Die vorgesehene Fahrzeuggeschwindigkeit liegt bei 40 km/h. Bei einem k-Faktor nach Kapitel 4 ($v_{\text{Kopf}}/v_{\text{Fzg}}$) von 0,9 wäre somit mit einer Kopfaufprallgeschwindigkeit von ca. 36 km/h zu rechnen (vgl. Abb. 3-12). Die Gesamtlänge der Teststrecke, auf welcher der Dummy 12 m vor einem Fangnetz und 13 m vor einem festen Block positioniert ist, beträgt 50 m. Um Beschädigungen des Dummys durch einen Sekundäraufprall zu vermeiden, kommen weiche Bodenmatten vor dem Fangnetz zum Einsatz (vgl. Abb. 5-18).



Körperteil (Nr.)	Messgrößen	Verletzung
Kopf (1)	Lineare Beschleunigung Winkelbeschleunigung	Schädelfraktur Gehirnverletzung
Halswirbelsäule (2)	Kraft, Moment	Halswirbelsäulenverletzung
Thorax (3)	Lineare Beschleunigung Verschiebung	Rippenfraktur Verletzung innerer Organe
Abdomen (4)	Lineare Beschleunigung Verschiebung	Verletzung innerer Organe
Becken (5)	Lineare Beschleunigung	Beckenfraktur
Oberschenkel (6)	Kraft, Moment	Oberschenkelfraktur
Knie (7)	Kraft, Moment Beschleunigung	Brüche Bänderrisse
Bein (8)	Kraft, Moment	Schien-/ Wadenbeinfraktur

DAS: Datenerfassungssystem

Abb. 5-15: Datenerfassung des Polar-II-Fußgängerdummys [HON04] [TAK07]

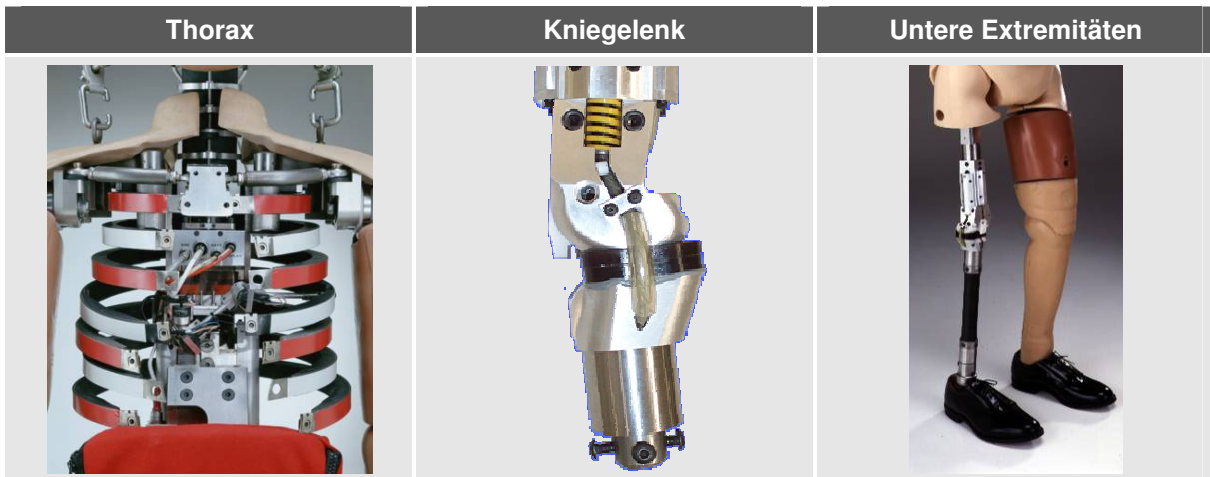
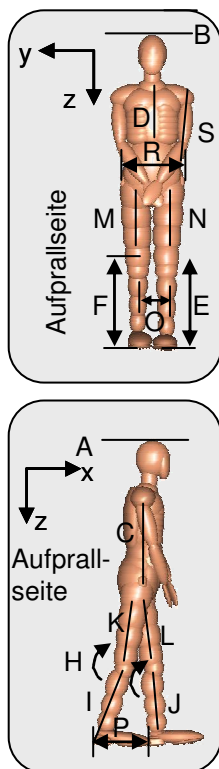


Abb. 5-16: Körperteile des Polar-II-Dummys [TAK07]



Fahrzeug

- Durchschnittliche Limousine (Kategorie A)
- Fahrzeuggeschwindigkeit = 40 ± 1 km/h

Dummy

- Seitliche Orientierung
- Kopf normal zur Bewegungsrichtung des Fahrzeugs
- Gehende Körperhaltung
- Fahrzeugzugewandtes Bein hinten
- Hände am Handgelenk gekreuzt
- Füße stehen auf festem Boden
- Definierte Körperwinkel gemäß SAE

Kamera

- Hochgeschwindigkeitskamera 1000 fps
- Seitliche- und perspektivische Ansicht
- Sichtbereich 1 m vor und 3 m hinter Aufprall



Abb. 5-17: Randbedingungen für den Dummyversuch (links: Parameter A - P in [SAE07] definiert)

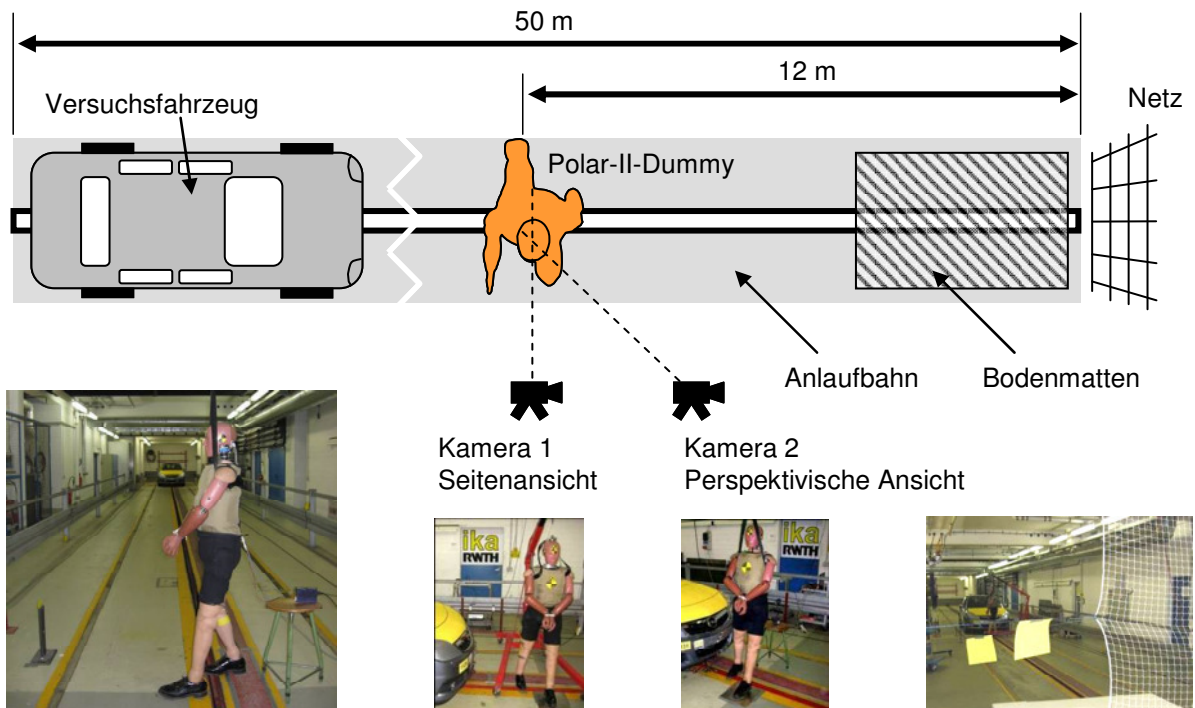


Abb. 5-18: Testkonfiguration im Dummyversuch

Aufgezeichnet wird der Aufprall mit zwei Hochgeschwindigkeitskameras in seitlicher- und perspektivischer Ansicht. Der Fußgängerdummy ist an einem magnetischen Auslösemechanismus mit einem Gurt befestigt. Etwa 50 ms vor dem Aufprall wird der Auslösemechanismus der Dummyaufhängung aktiviert, so dass eine freistehende Person nachgestellt werden kann. Der Einfluss auf die Messergebnisse durch ein Zusammensacken aufgrund des Dummyeigengewichts bei fehlender Muskulatur wird so minimiert. Durch den Bremsaktuator am Fahrzeug wird ca. 100 ms nach der Kollision die Vollbremsung eingeleitet, um das Fahrzeug auf der Teststrecke ausgehend von 40 km/h Kollisionsgeschwindigkeit innerhalb von 10 m vollständig abzubremesen (vgl. Abschnitt 10.7 im Anhang). Auslösemechanismen sind für den Dummy, den Airbag und für die Bremsenrealisiert. Die Auslösemechanismen werden mit ausreichender Redundanz sowohl am Dummy durch den Anprallkontakt als auch auf dem Boden der Teststrecke durch Überfahren vom Fahrzeug aktiviert.

5.3.3 Versuchsdurchführung

Der Versuch wird am modifizierten Fahrzeug mit einem Airbag sowie am Serienfahrzeug ohne Airbag (vgl. Abb. 5-19 und Abschnitt 10.7, Anhang) bei o. g. 40 km/h Fahrzeuggeschwindigkeit durchgeführt. Durch die Kontaktsensoren im Stoßfänger wird beim Aufprall des Dummys der Airbag ausgelöst. Der Erstkontakt durch das Bein und die entsprechend definierte Zeit von $t=0$ ms werden durch einen Lichtblitz sichtbar gemacht.

Nach dem Beinanprall bei $t=0$ ms findet in beiden Versuchen ein Hüftaufprall nach 40 ms statt. Anschließend legt sich der Körper auf die Fahrzeugfront, wobei ein Kontakt des gesamten Oberkörpers und der Hüfte mit der Motorhaube stattfindet. Der Schulteranprall zwischen $t=100$ ms und $t=120$ ms wird gefolgt vom Erstkontakt des Kopfes bei $t=131$ ms am Serienfahrzeug bzw. bei $t=121$ ms am modifizierten Fahrzeug mit aufgestellter Haube und aktiviertem Außenairbag.



Abb. 5-19: Versuchsdurchführung am Serienfahrzeug, Zeit in [ms]

Es entsteht ein Zeitversatz für den Aufprall aller Körperteile durch den Einfluss der aufgestellten Haube auf die Frontgeometrie ab dem Beinaufprall bis zum Kopfaufprall von etwa 10 ms. Nach 200 ms beginnt die Flugphase, und der Dummy trennt sich wieder von der Fahrzeugfront, so dass er anschließend auf den Boden aufprallt. Der Sekundäraufprall wird durch die weichen Matten abgefangen und ist nicht im Fokus dieser Untersuchungen.

Die Zeit für die Airbagentfaltung beträgt 40 ms (vgl. Abschnitt 4.3.5). Die zugehörigen Impaktorvorversuche und das Airbagverhalten selbst werden in Abschnitt 5.4.5 erläutert. Die Abwickellängen für den Kopfaufprall des Dummies entsprechen dem zu erwartenden Aufprallpunkt aus Abb. 5-13 und liegen am Serienfahrzeug bei $WAD = 1830$ mm und am modifizierten Fahrzeug bei $WAD = 1860$ mm.

Nach der Durchführung des Dummyversuchs zeigt das „Postcrash-Szenario“ bleibende Deformatio-

nen am Fahrzeug in Abb. 5-21. Die Beschädigungen im vorderen Drittel der Motorhaube sind bedingt durch den Hüftkontakt, und die weiteren Haubendeformationen resultieren aus der Kollision mit dem gesamten Körper. Die Position des Kopfaufpralls ist am Serienfahrzeug in den Bereichen der unteren Windschutzscheibe und der hinteren Haubenkante durch Deformationen bzw. zerbrochenes Glas ersichtlich. Die Beschädigungen am Serienfahrzeug durch den Hüftaufprall und insbesondere durch den Kopfaufprall decken sich mit Realunfalldaten eines gleichen Fahrzeugmodells der vorangegangenen Baureihe. Die Beschädigungen in der Windschutzscheibenmitte resultieren aus dem Aufprall der Dummyaufhängung nach dem Kopfaufprall und haben somit keinen verfälschenden Einfluss auf die Versuchsergebnisse.

Im Vergleich zum Serienfahrzeug weist die modifizierte Version nahezu keine Schäden im unteren Frontscheibenbereich auf, der in diesem Fall durch den Airbag abgedeckt wurde. Der Kopf ist fast vollständig vom Airbag abgefangen worden.

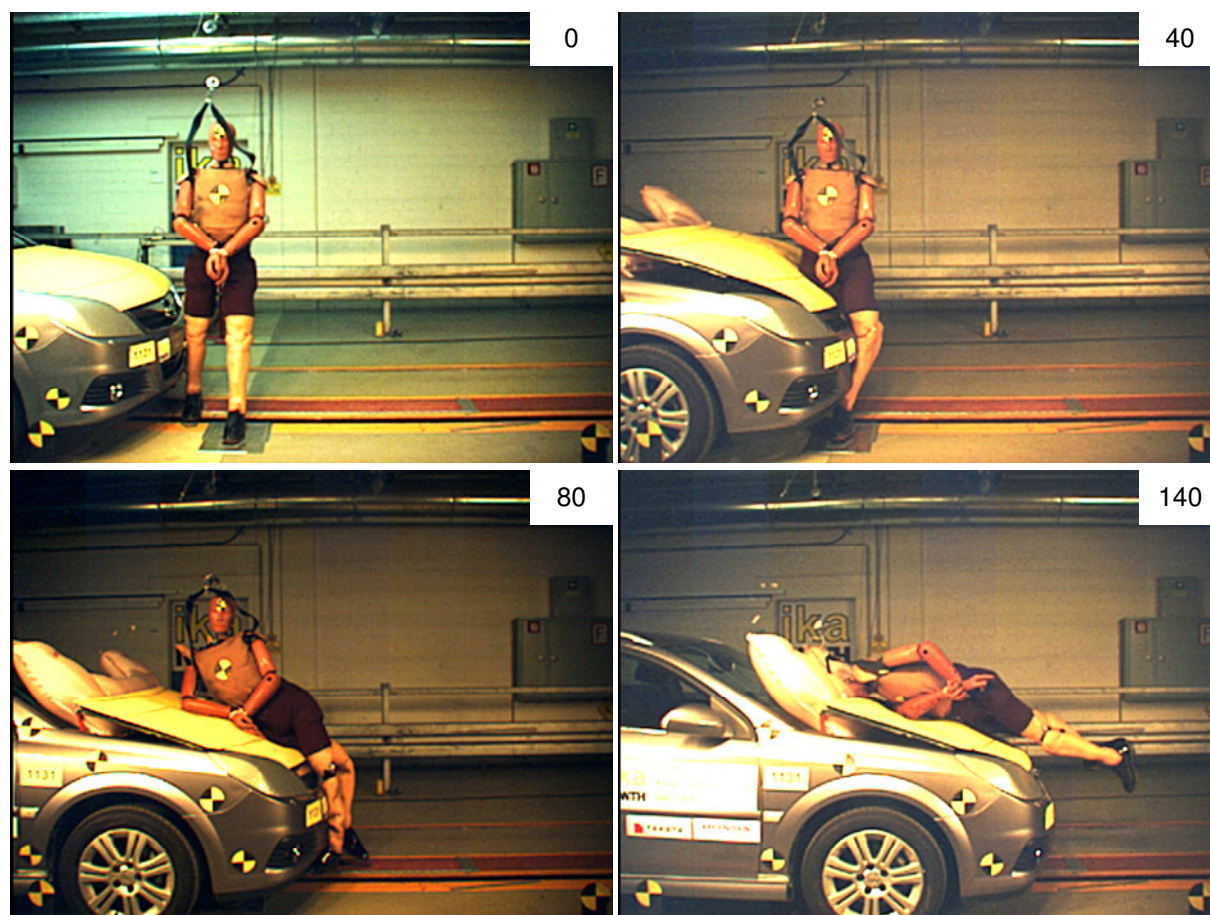


Abb. 5-20: Versuchsdurchführung am modifizierten Fahrzeug, Zeit in [ms]



Abb. 5-21: Fahrzeuge nach der Versuchsdurchführung

5.3.4 Messergebnisse

Die für den untersuchten Kopf- und Halsbereich aufgezeichneten Belastungen am Dummy sind in Abb. 5-22 bis Abb. 5-24 gegenübergestellt. Sie belegen, dass durch das Abdecken der steifen Struktur des Scheibenrahmens die Belastungswerte hinsichtlich Verzögerungen sowie Kräften und Momenten gesenkt werden. Die Kurvenverläufe für das Serienfahrzeug sind rot dargestellt und die Ergebnisse des modifizierten Fahrzeugs mit Airbagsystem grau. Die Aufprallzeitpunkte, d. h. die Erstkontakte des Kopfes, sind durch Sterne markiert. Die Modifikationen am Versuchsfahrzeug haben vor allem auf den Kopf- und Halsbereich des Dummies Einfluss.

Die Verzögerungskurven des Kopfes weisen einen Rückgang der Maximalbeschleunigung von $a_{\max, \text{Serie}} = 186 \text{ g}$ für das Serienfahrzeug auf $a_{\max, \text{mod}} = 83 \text{ g}$ für das modifizierte Fahrzeug auf. Weiterhin ergeben sich HIC-Werte von $\text{HIC}_{15, \text{Serie}} = 1212$ bzw. $\text{HIC}_{15, \text{mod}} = 703$. Die Reduktion des HIC-Wertes bezogen auf das Serienfahrzeug um 42 % belegt das erhöhte Schutzpotenzial eines Airbagsystems im Frontscheibenbereich. Der EEVC-WG17-Grenzwert $\text{HIC} = 1000$ kann deutlich unterschritten werden.

Durch den Einfluss des Airbagsystems und die Erhöhung des zur Verfügung stehenden Deformationsraumes verändert sich der beim Serienfahrzeug anfänglich hohe Gradient der Verzögerungsverläufe beim Kopfaufprall zu einem Anstieg mit geringerem Gradienten auf ein insgesamt niedrigeres Verzögerungsniveau. Die Hauptphase der Kopfverzögerung für das modifizierte Fahrzeug

beginnt dabei früher (bei $t = 120 \text{ ms}$) und endet zu einem späteren Zeitpunkt (bei $t = 160 \text{ ms}$).

Kräfte und Momente für den oberen und unteren Nackenbereich, deren maximale Ausschläge in Abb. 5-23 und Abb. 5-24 markiert sind, weisen unterschiedliche Relevanz auf. In den Kraftverläufen spiegelt sich insbesondere die Belastungsumkehr von Zug- auf Druckbelastung beim Aufprallvorgang wider. Die Zugbelastung im Halsbereich steigt beim Schulteraufprall bis auf ein Maximum an und kehrt sich beim Kopfaufprall am Fahrzeug bei ca. $t = 130 \text{ ms}$ schlagartig in eine Druckbelastung um. Die Zugbelastung wird über den gesamten Körper unterhalb des Halsbereichs eingeleitet. Die Druckbelastung wird dagegen oberhalb des Halses durch den Kopf bei dessen Kontakt am Fahrzeug übertragen. Auf diese Weise erklärt sich die charakteristische Belastungsumkehr erklären.

Die Scherkräfte in x- und y-Richtung ergeben keine auffälligen Differenzen. Entscheidend ist dagegen die Wirkung der vertikalen Kraftkomponente in z-Richtung auf den Fußgängerdummy. Zugkräfte mit einem Maximalwert von 2000 N wechseln beim Kontakt mit der Windschutzscheibe zu Kompressionskräften mit sehr hohen Maximalwerten von 5000 N beim Serienfahrzeug, die den FMVSS 208 Grenzwert von 4000 N deutlich überschreiten (vgl. Abb. 5-58). Ab 135 ms variieren beide Versuche voneinander. Die Kompressionskräfte des modifizierten Fahrzeugs erreichen einen Maximalwert von 2000 N und liegen somit weit unterhalb des Grenzwertes.

Im Vergleich der Halsbelastungen zum Serienfahrzeug können beim modifizierten Fahrzeug mit Airbag die Nackendruckkraft um 60 % und die Na-

ckenmomente (M_x , M_y) um 30 % und mehr reduziert werden. Beim seitlichen Aufprall ist die Inklination für die Halsbelastungen von hoher Bedeutung. Außerdem kann der Rückstoßeffect („Luffeder“-Verhalten, Rebound) durch einen überhöhten Airbaginnendruck zu höheren Nackenbelastungen führen (vgl. Abschnitt 4.3.5).

Der Einfluss der Fahrzeugmodifikation auf die unteren Extremitäten des Dummies fällt nach Abb. 5-25 deutlich geringer aus. Die Reduktion der Oberschenkelbelastung wird auf den erhöhten

Deformationsweg nach der Modifikation zurückgeführt. Derart hohe Kräfte und Momente würden beim realen Fußgänger allerdings nicht übertragen und zu Brüchen der Knochen führen. Die Belastungen der unteren Extremitäten spielen jedoch für den Fokus dieses Abschlussberichtes eine untergeordnete Rolle. Basierend auf diesen Ergebnissen wird im Folgenden das hybride Testverfahren als Alternative bzw. Ergänzung zum Dummyversuch entwickelt und in Kapitel 6 vergleichend bewertet.

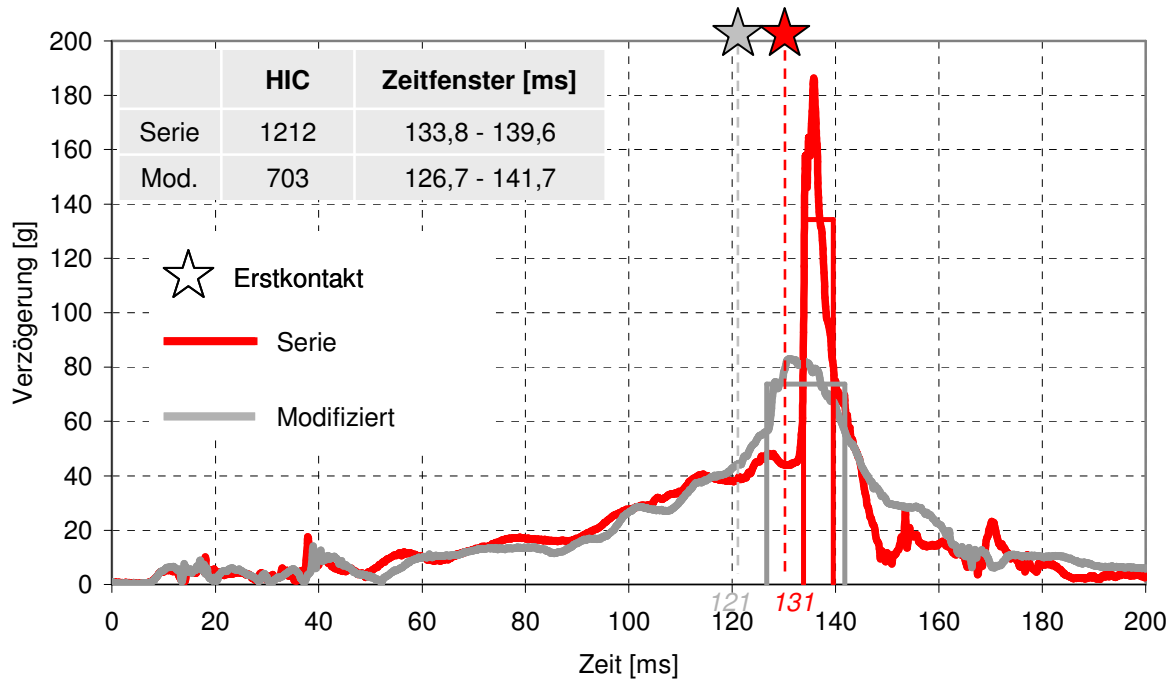


Abb. 5-22: Beschleunigungskurven beim Kopfaufprall

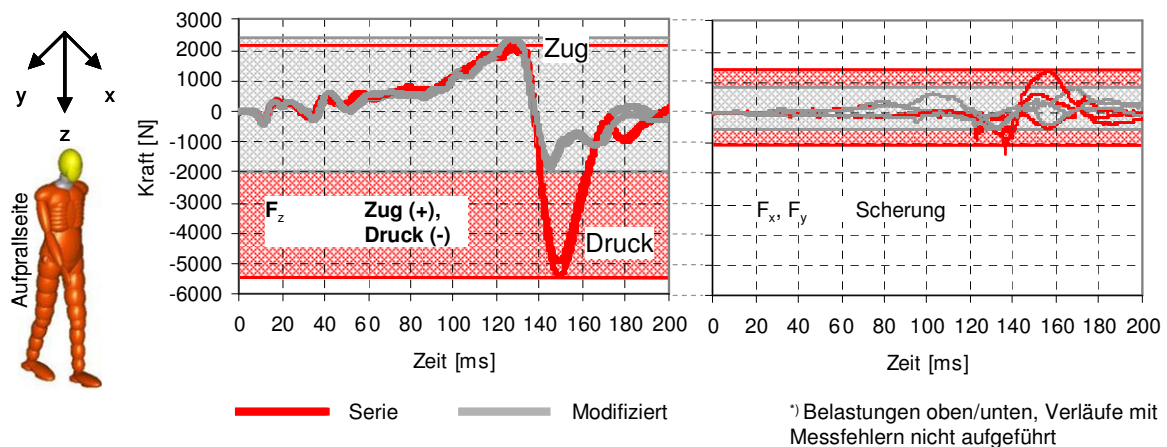


Abb. 5-23: Belastungen durch Kräfte im Nacken-/Halsbereich¹⁾

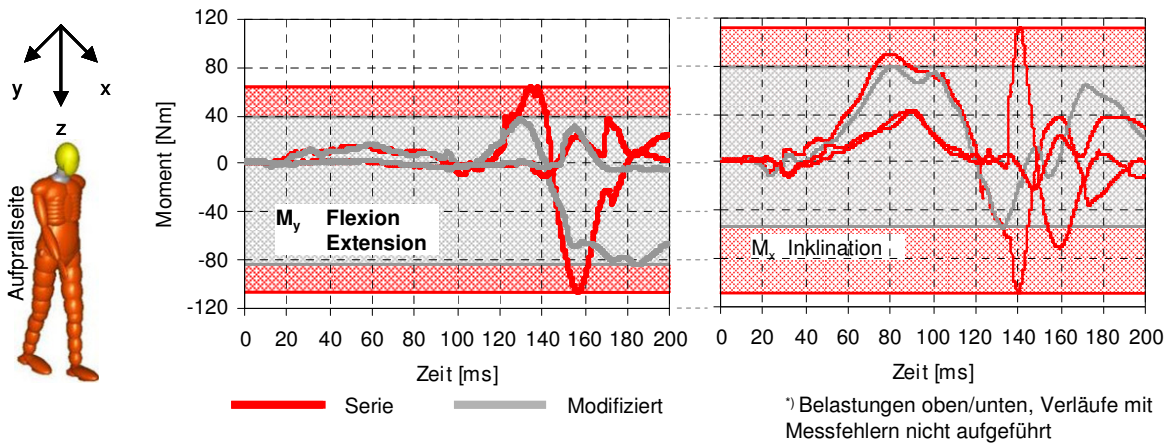


Abb. 5-24: Belastungen durch Momente im Nacken-/Halsbereich¹⁾

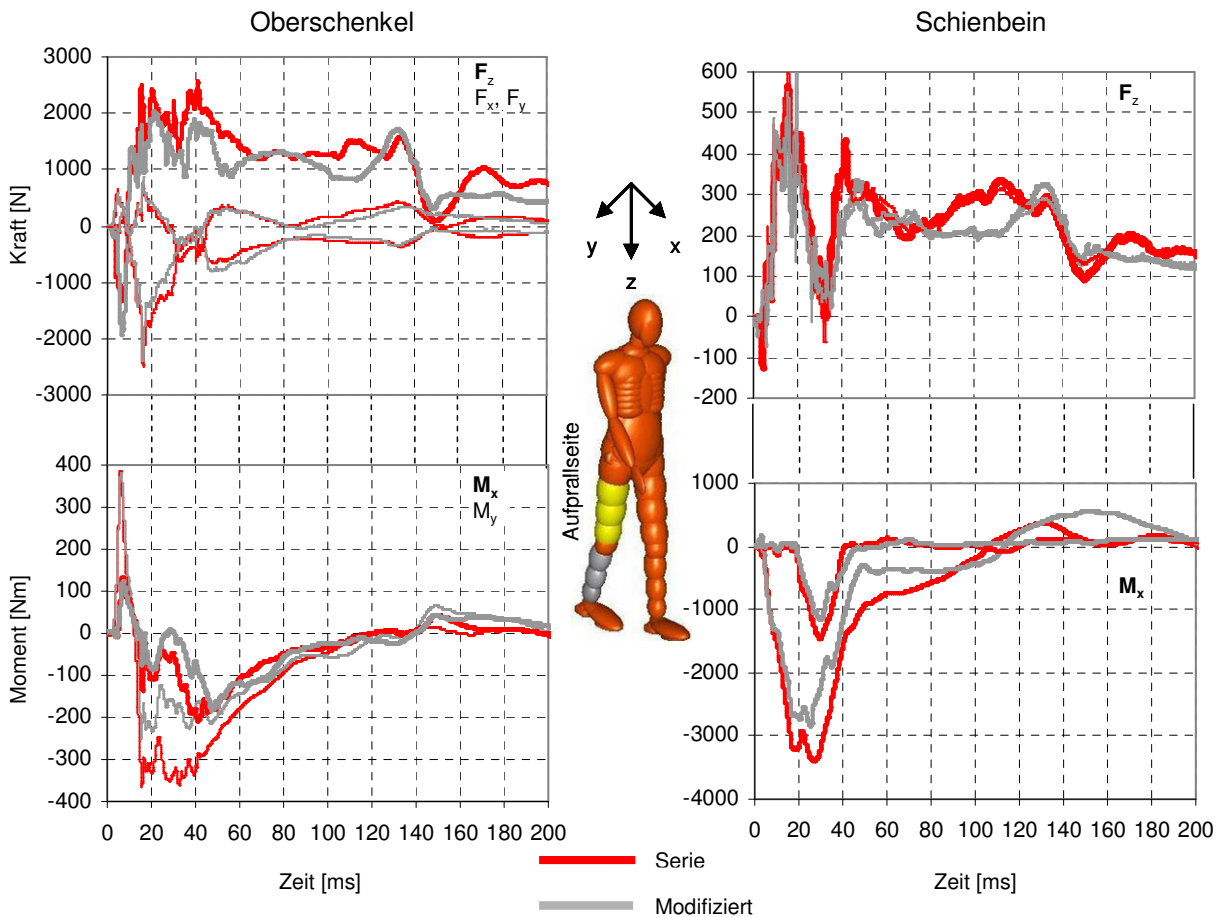


Abb. 5-25: Belastungen unterer Extremitäten des Dummys

5.4 Hybrides Testverfahren

Das hybride Testverfahren besitzt analog zum Vorprojekt einen modularen Aufbau, bei dem numerische Simulationen mit realen Testverfahren in zwei Modulen kombiniert und verknüpft werden. Die Grundlage bilden die aus den Simulationen der Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen im

Kapitel 4 abgeleiteten Parameter für den Impaktortest. In dem Testverfahren kommen verschiedene Bewertungsmethoden zur Anwendung. Sie beinhalten Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen (MKS), FE-Impaktorsimulationen sowie reale Impaktortests (vgl. Abb. 5-26). Als Erweiterung kann zudem der Dummytest insbesondere bei crashaktiven Systemen hinzugezogen werden.

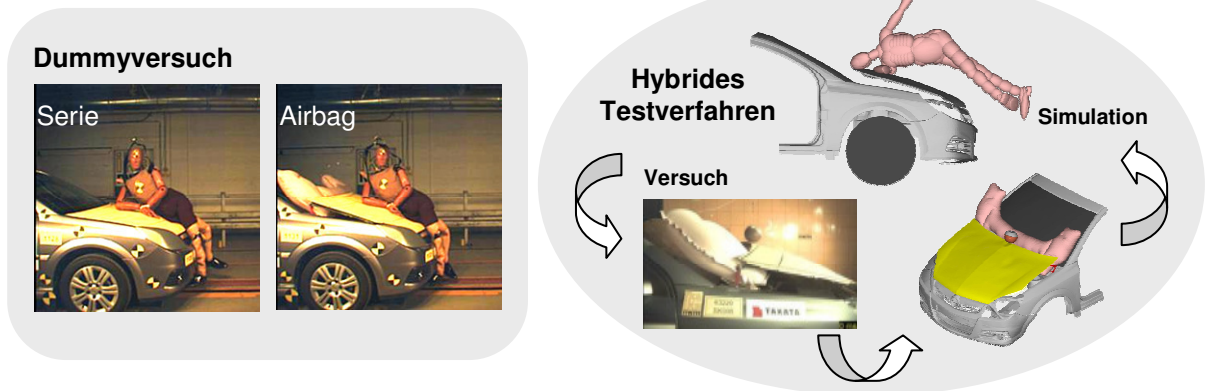


Abb. 5-26: Betrachtete Testmethoden

Eine verbesserte Realitätsnähe ist gemäß Abb. 5-27 in der Regel mit höherem Aufwand der einzelnen Testmethoden verbunden. Dummytests bieten im Vergleich mit Komponententests die höhere Realitätsnähe. Ebenso lassen sich mit FE-Simulationen detailliertere Ergebnisse erzielen als in der Mehrkörpersimulation. Umgekehrt bedingt geringerer Aufwand in der Regel eine ungenauere Abbildung. Das entwickelte hybride Testverfahren kombiniert die Vorteile von virtuellen und realen Tests (vgl. auch Abb. 6-6). Durch Voruntersuchungen in Simulationsmodellen können Kosten für Realtests eingespart werden.

Basierend auf den bisher gewonnenen Erkenntnissen wird in dem Konzept für ein hybrides Verfahren nach Abb. 5-28 die Fahrzeug-Fußgänger-Simulation zunächst dazu genutzt, die Aufprallzeit und den Aufprallort für die Funktionsbedingung crashaktiver Systeme zu ermitteln. Die im Folgenden beschriebenen Testabläufe beziehen sich auf ein Fahrzeug mit einem derartigen System, wobei rein passive Lösungen als Idealfall eines crashaktiven Systems mit unendlicher Standzeit und dauerhafter Funktion betrachtet werden können.

Der erste Teil des hybriden Testverfahrens besteht zunächst aus der 3D-Simulation einer Fahrzeug-Fußgänger-Kollision. Darin sind beispielsweise der Einsatz des Human Models von Madymo oder des THUMS-Modells („Total Human Model for Safety“) in einer FE-, MKS- oder gekoppelten Simulation sinnvoll. Aus den Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen lässt sich die o. g. Kinematik bestimmen. Durch diese Parameter kann der zu wählende Auslösezeitpunkt

für reale Impaktortests ermittelt werden. Mit Hilfe virtueller Komponententests in numerischen FE-Simulationen an den vorgesehenen Stellen erfolgt die Testpunktauswahl für reale Komponententests mit Impaktoren, die im Anschluss durchgeführt werden. Durch die Komponententests werden ausschließlich Kopfbelastungen mit Beschleunigungsverläufen aufgezeichnet, aus denen sich HIC-Werte berechnen lassen.

Die Ergebnisse von Komponententest und FE-Simulation sind vergleichbar und können zur Validierung der Simulation genutzt werden. Anschließend wird anhand der Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen eine Bewertung hinsichtlich der Halsbelastungen vorgenommen (vgl. Abschnitt 5.4.6.2). Die Kontaktsteifigkeiten eines vereinfachten MKS-Fahrzeugmodells in der Fahrzeug-Fußgänger-Simulation können ggf. durch die Beschleunigungsverläufe aus Impaktorversuchen angepasst werden.

Die Schritte für eine ganzheitliche Bewertung eines Fahrzeuges nach Abb. 5-28 bestehen aus Versuch (Modul 1) und Simulation (Modul 2), wobei ein geeignetes Simulationsmodell erforderlich wird (vgl. Abschnitt 5.4.1). Nachdem der Funktionsnachweis des crashaktiven Systems erbracht ist (vgl. Abschnitt 5.4.3), erfolgt in der Simulation die Testpunktauswahl für reale Komponententests (vgl. Abschnitte 5.4.3 bis 5.4.5). Die in der Interaktion zwischen Fahrzeug und Fußgänger auftretenden Belastungen, verursacht durch die Rotationsbewegung von Kopf und Hals, werden bewertet (vgl. Abschnitt 5.4.6.2). Auf diese Weise soll eine Aussage über das Fußgänger-Schutzpotenzial des Testfahrzeuges getroffen werden.

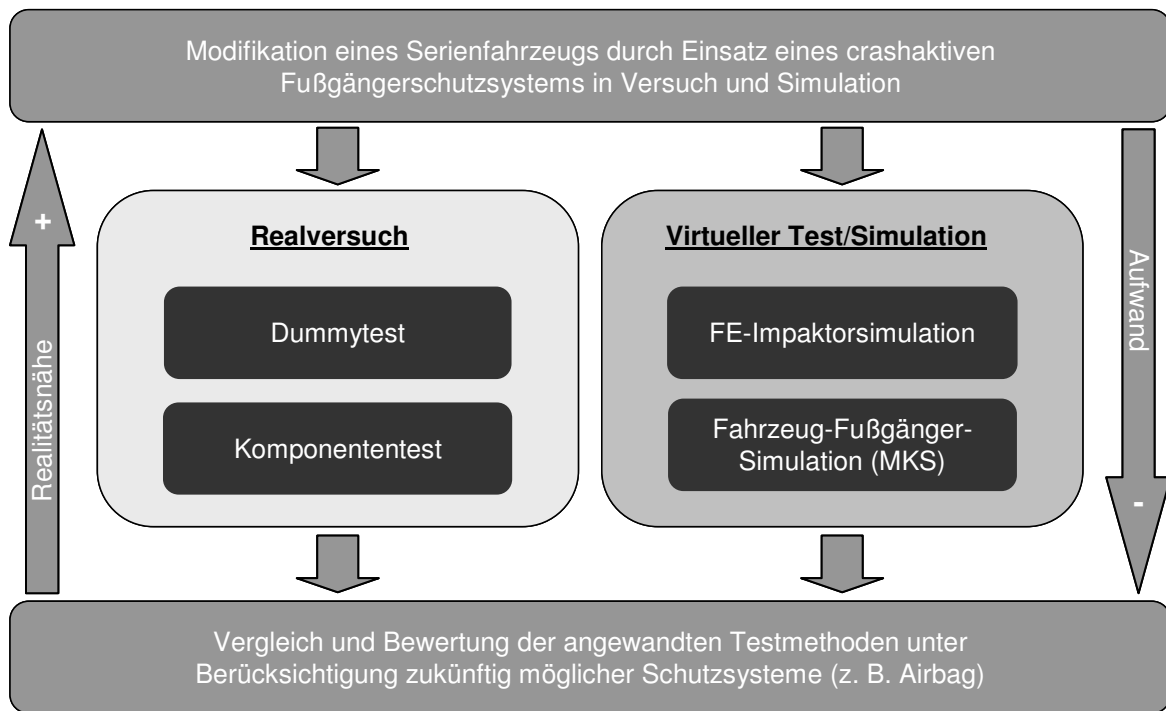


Abb. 5-27: Verschiedene Testmethoden [BOV08a]

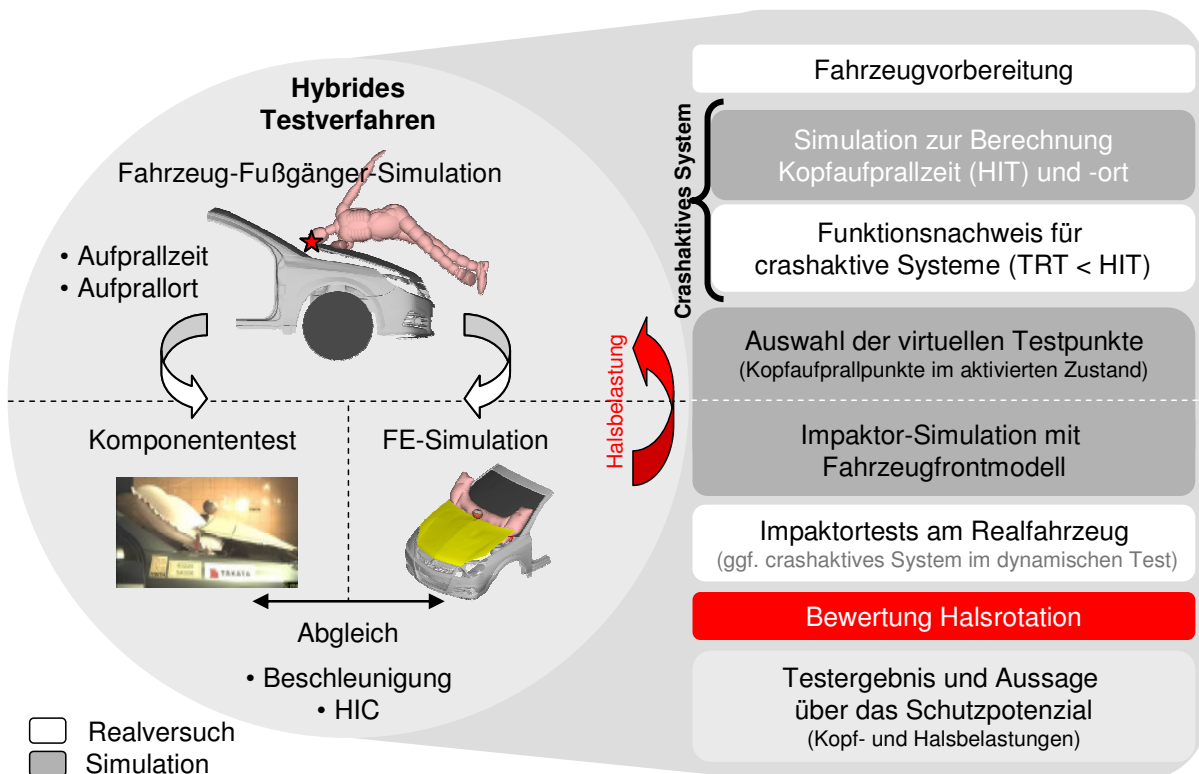


Abb. 5-28: Hybrides Testverfahren (mit Ablaufplan, rechts)

5.4.1 Simulationsmodelle für den virtuellen Test

Die Wahl eines geeigneten Simulationsmodells für den virtuellen Test hat Auswirkungen auf die Aussagekraft der Simulationsergebnisse, den Zeitaufwand und die Kosten (vgl. Abb. 5-29). Ein geeigneter Datenaustausch zwischen Testlabor und Fahrzeughersteller ist daher sinnvoll.

Für die Simulation der Komponententests werden im hybriden Testverfahren 3D-FE-Modelle verwendet. Das FE-Fahrzeug kann zum einen durch den Fahrzeughersteller zur Verfügung gestellt werden, zum anderen können die Simulationen beim Fahrzeughersteller selbst durchgeführt werden. Hierbei werden die Ergebnisse im Anschluss zur Verfügung gestellt (z. B. Tabelle mit Ergebnissen und den Aufprallpunkten). Bei einem crashaktiven System ist ggf. zusätzlich das Simulationsmodell des Zulieferers notwendig. Es kann hierfür im Simulationsmodell des Fahrzeugs ggf. ein vereinfachtes Ersatzsystem verwendet werden. Für die Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen sind 3D- oder 2D-Mehrkörpermodelle einsetzbar. 3D-MKS-Modelle der Fahrzeugaußenhaut können durch den Hersteller zur Verfügung gestellt oder durch Digitalisierung der Fahrzeugaußenhaut (z. B. durch optische Vermessung) gewonnen werden.

5.4.1.1 Bewertung der Modelle

Die qualitativ höchste Güte der numerischen Fahrzeugdarstellung ist ein 3D-FE-Modell (vgl. Abb. 5-29), um Verformungen in der Karosseriestruktur abzubilden. Üblicherweise sind die Modelle durch den Hersteller validiert und liefern zuverlässige Simulationsergebnisse.


Bei 3D-MKS-Modellen liegt nur die Außenhaut des Fahrzeugs als Facette vor, so dass die Abbildung von Verformungen durch Kräfteinwirkungen nicht möglich ist. Kraftverläufe können durch Einbeziehung der Beschleunigungsverläufe aus den Impaktorversuchen und Anpassung der Kontaktsteifigkeiten simuliert werden. Die Qualität des Modells wird aufgrund der Abbildung der Kinematik als „gut“ eingeschätzt. 2D-

Mehrkörpermodelle können schnell, einfach und preiswert erzeugt werden. Die Qualität ist jedoch aufgrund der starken Vereinfachung nur noch mäßig. Um Aufprallzeit, -position und übrige Kinematik eines Fußgängers näherungsweise nachzubilden, ist diese Fahrzeugdarstellung aber ausreichend. Durch diese Vereinfachung ergeben sich erhebliche Kosten- und Zeiteinsparungen. Die Anpassung der Kontaktsteifigkeiten kann entsprechend der o. g. Methode beim 3D-Modell erfolgen.

5.4.1.2 Auswahl zur Simulationsdurchführung

Für das 3D-FE-Modell ist die Simulationsdurchführung beim Hersteller am besten geeignet. Diese Vorgehensweise wird aufgrund der Herausgaberechte und der hohen Effizienz, wobei z.B. kein Re-engineering notwendig ist, als sinnvoll betrachtet. Weiterhin besteht ein genereller Trend der Einbeziehung der numerischen Simulation in Testverfahren, so dass durch eine Einbindung bzw. möglichen Verknüpfung mit anderen Testverfahren eine zusätzliche Effizienzsteigerung erzielt werden kann.

Bei der Auswahl des Fahrzeug-Fußgänger-Simulationsmodells ist das 3D-MKS-Modell vorteilhaft, da das Digitalisieren einer Fahrzeuggeometrie relativ schnell erfolgen kann und die Fahrzeugkontur detailliert abgebildet wird. Hier können die für die Fahrzeugkategorie typischen globalen Kontaktsteifigkeiten eingesetzt werden (z. B. nach [MAR06]), die ggf. durch die Ergebnisse der Impaktortests angepasst werden können. Dabei entstehen keine Kosten durch den Zukauf der Modelle. Zur Bestimmung der Kinematik, der Aufprallzeit und des -ortes ist diese Fahrzeugdarstellung ausreichend, weil in der Fahrzeug-Fußgänger-Simulation Verformungen noch vernachlässigt werden können. Sofern das Airbagsystem selbst erst kurz vor dem eigentlichen Kopfaufprall für die Belastung und Bewegung relevant ist, wird in dieser Simulation eine statisch geöffnete Haube als hinreichend betrachtet.

	Option	Abbildung	Qualität	Aufwand	Kosten
3D-FE	(1) FE-Fahrzeugmodell durch Hersteller zur Verfügung gestellt		++	+	+
	(2) Simulationen durch Hersteller - Ergebnisse werden zur Verfügung gestellt				
3D-MKS	(1) Fahrzeugaußenhaut durch Hersteller bzw. spezialisierte Firma bereitgestellt		+	o	o
	(2) Vermessung von Realfahrzeug mit Digitalisierungsverfahren (z. B. optisch)				
2D-MKS	(1) Extrudiertes 2D-Modell aus technischen Daten des Fahrzeugs bzw. Vermessung der Fahrzeugmittellachse		o	++	++

++ sehr gut, + gut, o mittel bzw. unbestimmt, - schlecht

Abb. 5-29: Simulationsmodelle beim virtuellen Test

5.4.2 Funktionsnachweis

5.4.2.1 Sensortest und Systemantwortzeit

Für die Funktionsbedingung nach Abschnitt 4.3.5, dass die Systemantwortzeit kleiner als die Kopfaufprallzeit ist, wird zunächst die Funktion des Sensors nachgewiesen. Der Dummytest aus Abschnitt 5.3 kann verwendet werden, um sowohl die Systemantwortzeit als auch den Sensor am Fahrzeug zu testen und somit die gesamte Funktionsbedingung nachzuweisen. Alternativ erfolgt die Ermittlung der Kopfaufprallzeit im Rahmen der Simulation im folgenden Abschnitt und der Nachweis der Systemfunktion durch Beinaufpralltests.

Die Funktionsprüfung des Sensors im Stoßfänger und die Ermittlung der Sensierzeit kann z. B. mit Beinimpaktoren gemäß Abb. 5-30 erfolgen. Die Beinimpaktoren sind zum einen zur Messung der

biomechanischen Belastungen und zum anderen speziell für Sensortests entwickelt. Die Sensierung mit WG17-Impaktor ist aufgrund der unrealistischen Punktbelastungen beispielsweise nicht vorteilhaft. Ein unteres Limit für die Aufprallbelastung bei einem Impaktor mit zu definierenden Eigenschaften ist notwendig, um die untere Auslöseschwelle des Sensors zu testen. Diese ist für die Auslegung des crashaktiven Systems auch auf Unfälle mit Kindern notwendig. Die Gefahr von unerwünschten Auslösungen beim Kontakt mit kleineren Massen (z. B. kleinen Tieren) im relevanten Geschwindigkeitsbereich eines solchen Systems von ca. 20 km/h bis 50 km/h kann derzeit nicht vollständig vermieden werden. Dadurch entstehende Reparaturkosten stellen einen Nachteil solcher Systeme dar.

Biomechanische Belastungen		Sensortests	
FlexPLI	EEVC-WG17-Bein	5er-AK-Bein	SensorLeg™
			

Abb. 5-30: Verschiedene Beinimpaktoren [MOU08] [TRL08]

5.4.2.2 Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen für den Kopfaufprall

Die Fahrzeug-Fußgänger-Simulation als Teil des virtuellen Tests ist zur Ermittlung der Kopfaufprallzeiten und der dazugehörigen -positionen für den Funktionsnachweis nach Abb. 5-31 geeignet.

In der Simulation trifft das Fahrzeug den Fußgängerdummy mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h ohne Verzögerung. Als Grundlage für diese Simulation werden bereits eingesetzte, standardisierte Randbedingungen aus Abschnitt 5.3.2 übernommen. Der Kopf schlägt in der Berechnung bei geschlossener Haube nach 140 ms im Bereich der Haubenhinterkante und unteren Scheibe auf, vgl. Abb. 5-32. Für die folgenden Versuche in Abschnitt 5.4.5 wird die Kopfaufprallzeit bei geöffneter Haube nach Abb. 5-33 benötigt. Bei einem Kind (c6-Dummy) mit geringster Aufprallzeit erfolgt der Kopfaufprall in Abb. 5-34 nach 58 ms auf der Haube.

Mit dem FE-Modell lassen sich außerdem gekoppelte FE/MKS-Simulationen (LS-Dyna mit Madymo) durchführen. Die Vorteile einzelner Methoden können so teilweise überlagert werden, wie z. B. die Verwendung der validierten Fußgängermodelle in Madymo sowie die Abbildung von Verformungen im FE-Modell. Der Öffnungsvorgang des Airbagsystems kann hier zeitlich parallel zum Aufprallvorgang verlaufen.

Der Aufprallvorgang beginnt in beiden Konstellationen mit dem Beinaufprall bei $t = 0$ ms (vgl. Abb. 5-35). Nach 20 ms befindet sich der Airbag im Aufstellvorgang der Haube, welcher bei $t = 40$ ms mit vollständig gefülltem Airbag abgeschlossen ist. Durch die Aufprallkraft des Fußgängermodells deformieren der Stoßfänger aufgrund des Beinkontaktes und die Haube durch den Hüftkontakt. Anschließend prallen, ähnlich wie im Dummytest, der gesamte Körper und der Kopf bei $t = 128$ ms bzw. (mit Airbag) bei $t = 120$ ms an der hinteren Haubenkante auf.

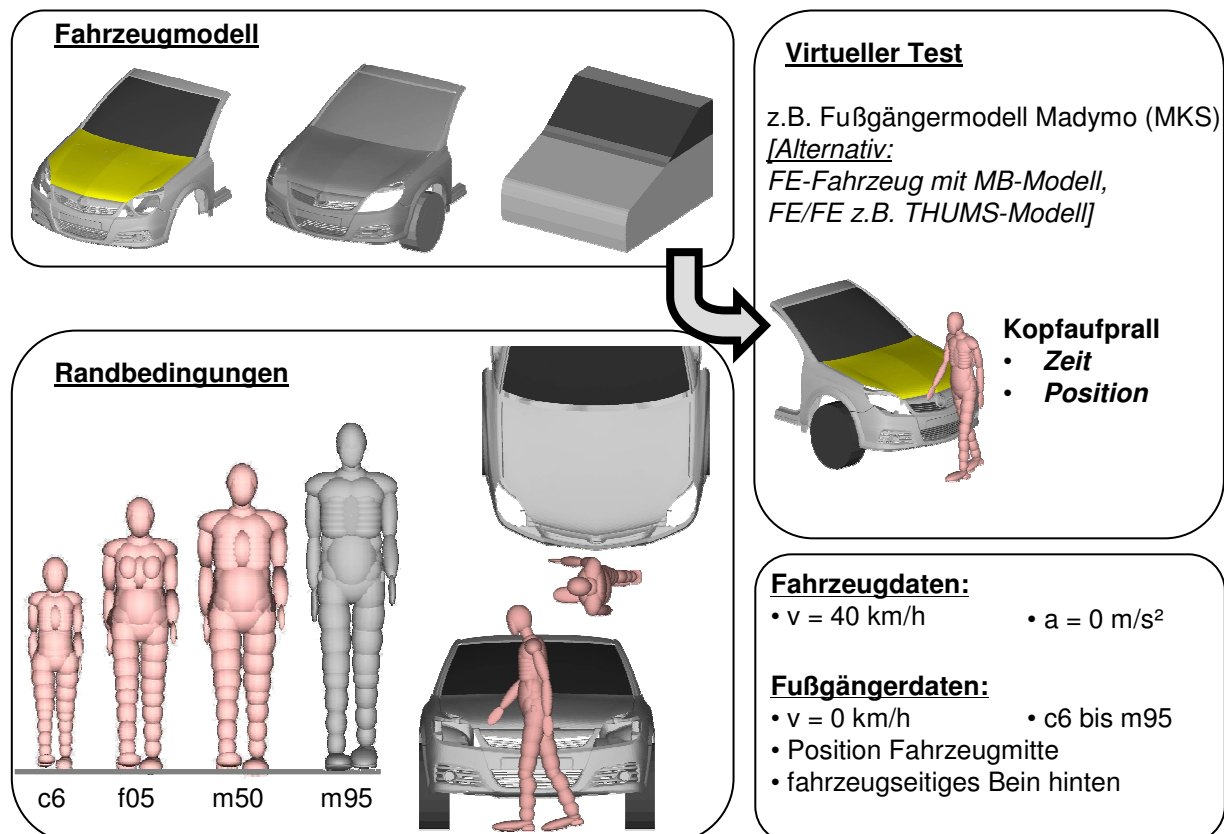


Abb. 5-31: Randbedingungen für die Vorsimulation

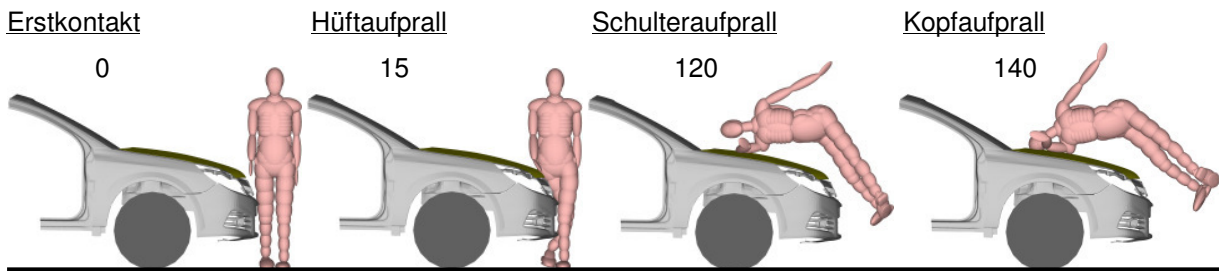


Abb. 5-32: Kopfaufprallzeit (HIT) 50 %-Mann – geschlossene Haube

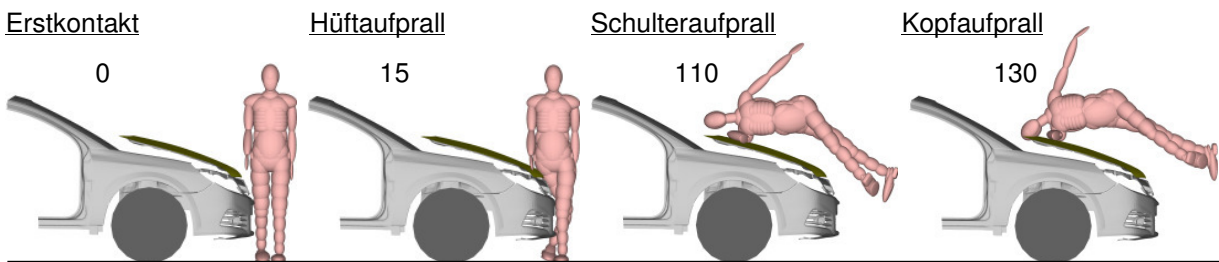


Abb. 5-33: Kopfaufprallzeit 50 %-Mann – geöffnete Haube

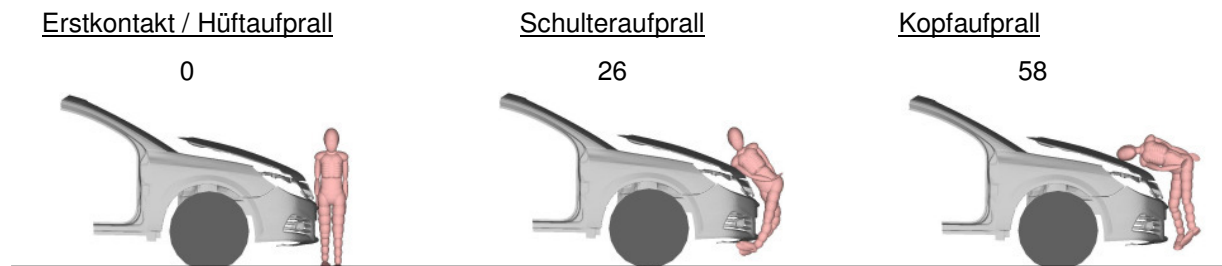


Abb. 5-34: Kopfaufprallzeit 6-jähriges Kind – geöffnete Haube, Zeit in [ms]

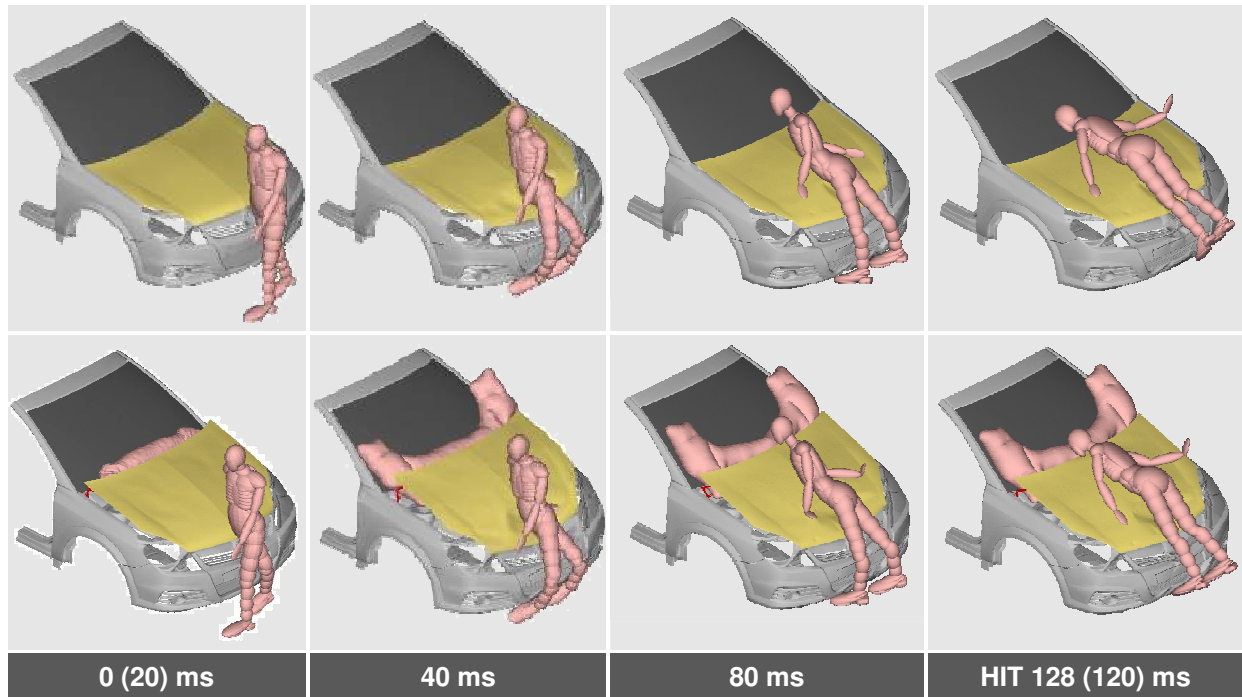


Abb. 5-35: Gekoppelte Simulation FE mit MKS (Serienfahrzeug oben, modifiziertes Fahrzeug unten)

Bei einer Entfaltungszeit von ca. 40 ms für den Airbag und weiteren 10 ms zur Sensierung der Kollision ergibt sich insgesamt eine Aktivierungszeit von ca. 50 ms entsprechend den Zeiten aus dem Dummyversuch. Im Versuch sind ca. 10 ms zur Triggerung und Auslösung benötigt worden und weitere 40 ms bis zum vollständigen Aufstellen der Haube und zur Entfaltung des Airbags. Die ermittelten Kopfaufprallzeiten dazu sind nach Abb. 5-33 und Abb. 5-35 128 ms bzw. 130 ms beim 50 %-Mann und Abb. 5-34 58 ms beim 6-jährigen Kind.

Es wird nach Abschnitt 4.3.5 die ausreichende Standzeit des Airbags von über 200 ms für $t_{\text{Kopfaufprall, max}}$ vorausgesetzt und angenommen, dass die Fahrzeuggeschwindigkeit von 40 km/h zu den geringsten Aufprallzeiten für $t_{\text{Kopfaufprall, min}}$ führt. Die Zeit $t_{\text{Kopfaufprall, max}}$ tritt bei dem größten Fußgänger (m95) bei der geringsten einbezogenen Fahrzeuggeschwindigkeit (z. B. 20 km/h) auf. Die Fahrzeug-Fußgänger-Simulation ergibt unter diesen Annahmen, dass die Funktionsbedingung $\Delta t_{\text{TRT}} < \Delta t_{\text{HIT}}$ für dieses Fahrzeug der Kategorie A erfüllt ist.

5.4.3 Testpunktauswahl

Eine Auswahl von Testpunkten wird sowohl für virtuelle als auch für reale Impaktortests vorgenommen. In den virtuellen Tests kann zunächst eine hohe Anzahl von Aufprallpunkten untersucht werden, um die Testpunkte realer Komponententests zu bestimmen und gleichzeitig deren Anzahl zu reduzieren [PUP08]. Die kritischen Aufprallstellen am Fahrzeug 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. Anhang Abb. 10-8), mit ggf. ergänzenden Tests der zusätzlichen kritischen Stellen an der Fahrzeugstruktur im relevanten Testbereich nach Abb. 5-36. Auf diese Weise werden die dynamischen Eigenschaften der gesamten Fahrzeugfront beim Impaktoraufprall ermittelt. Alle ausgewählten Aufprallpunkte werden am validierten FE-Modell durch die numerische Impaktorsimulation getestet. Im Rahmen dieses Projektes wird das beschriebene vereinfachte FE-Modell eingesetzt, im Testverfahren ist dagegen ein vollständig validiertes Modell des OEMs vorgesehen.

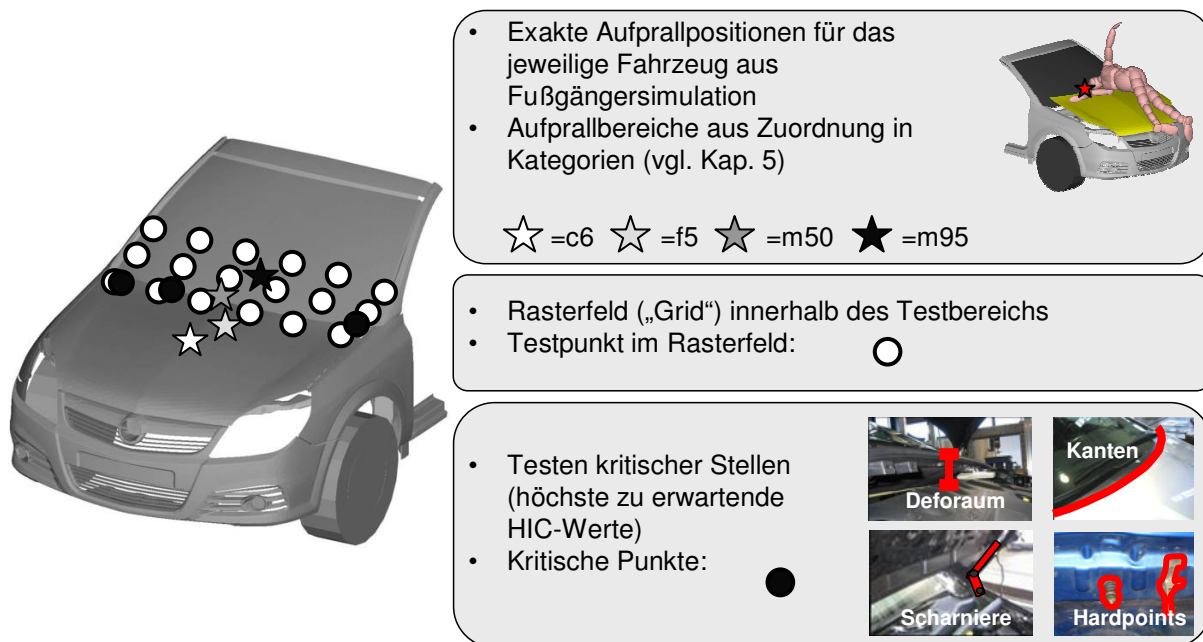


Abb. 5-36: Testpunktauswahl für virtuelle Tests

Aus dem Rasterfeld werden drei Punkte für Versuch und Simulation ausgewählt, die sich bei dem oben beschriebenen „Screening“ der gesamten Front nach Abb. 5-36 als relevant identifiziert werden. Eine Untersuchung der gesamten Aufprallpunkte im virtuellen Test, wie sie im Rahmen des Prüfverfahrens vorgesehen ist, findet in diesem Forschungsprojekt nicht statt. Die in Abb. 5-37 ausgewählten Punkte beziehen die Funktion und Wirkungsweise des Airbagsystems ein. Sie berücksichtigen ferner den Kopfaufprallpunkt des 50 %-Mannes aus dem Dummyversuch und der Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen. Das Aufprallgebiet bezieht den gesamten Windlauf und den unteren Frontscheibenbereich ein, da diese Bereiche für Körpergrößen von der 5 %-Frau bis zum 95 %-Mann bedeutsam sind.

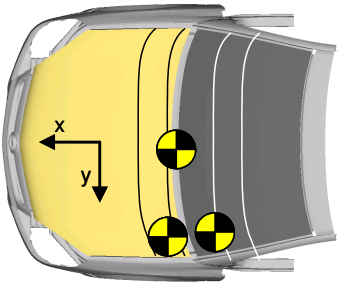
Der Aufprallpunkt des 50 %-Mannes, d. h. auch des entsprechenden Dummies (Punkt 1), ist für den erwachsenen Fußgänger bei ca. 1770 mm WAD einer der wahrscheinlichsten Aufprallpunkte und wird daher eingehender betrachtet. Dieser Aufprallpunkt an der oberen Haubenkante bzw. im unteren Bereich der Windschutzscheibe bildet eine Nahtstelle. Hier befindet sich der Übergang zwischen der Motorhaube und der Windschutzscheibe bzw. zwischen Haube, Airbag und Scheibe. Beim Aufprall entsteht ein Kontakt zwischen dem Impaktor sowohl mit der Haube als auch mit dem Airbag. Damit sind an den Öffnungsspalt der Motorhaube besondere Anforderungen für ein derartiges System und die entsprechenden Testmethoden (vgl. Abschnitt 5.4.6.2) zu stellen. Diese WAD ist neben

dem Aufprallort des 50 %-Mannes als Basis zusätzlich fahrzeugseitig aufgrund der entstehenden Nahtstelle festgelegt worden und entspricht daher nicht exakt der Abwickellänge aus dem Dummyversuch.

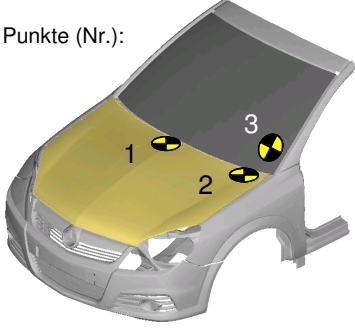
Der Scharnierbereich (Punkt 2) liegt bei ca. 1650 mm WAD und stellt durch die hohe Steifigkeit generell eine der Stellen mit dem höchsten Verletzungspotenzial im Windlaufbereich dar. Die Haube ist hier üblicherweise durch Stahlbleche für die Scharnieraufnahmen verstärkt. Beim Impaktoraufprall im Scharnierbereich liegt ausschließlich ein Kontakt des Impaktors mit der Haube vor. Es soll neben den Auswirkungen der Beschleunigungen auf die Kopfbelastungen auch das Verhalten des Öffnungsmechanismus beim Aufprallvorgang untersucht werden.

Der Aufprall auf die A-Säule (Punkt 3) bei ca. 2100 mm stellt einen Punkt im Rahmenbereich der Windschutzscheibe dar. Ohne Abdeckung durch den Airbag liegt ein Aufprall auf einer Struktur von unvermeidbar hoher Steifigkeit vor, da die A-Säule integraler Bestandteil des Insassenschutzes ist. Serienfahrzeuge ohne Schutzsystem werden in diesem Bereich bei Euro NCAP nicht geprüft, da die Beschleunigungswerte durch nicht vorhandenen Deformationsraum vorhersehbar zu hoch sind. Bei einer Abdeckung durch das Schutzsystem besteht an diesem Punkt ausschließlich Kontakt zwischen dem Impaktor und dem Airbag. Bei diesen Aufprallpunkten kann eine Symmetrie an der Längsmittlebene der Fahrzeugfront angenommen werden.

WAD [mm]: 1500, 1700, 2100, 2300



Punkte (Nr.):



Nr.	Abwickellänge	Aufprallbereich
1	WAD 1770 mm (50 %-Mann)	Mittellinie ($y = 0$ mm) Motorhaube (und Kante) ca. 2/3; Übergang Windschutzscheibe ca. 1/3 K: Haube und Airbag
2	WAD 1650 mm (5 %-Frau bis 50 %-Mann)	Seite ($y = 670$ mm) Scharnier und Verstärkungsbleche, Haubenfläche K: Haube
3	WAD 2100 mm (50 %-Mann bis 95 %-Mann)	A-Säule ($y = 650$ mm) ca. 100 mm von Außenkante Windschutzscheibe K: Airbag

Abb. 5-37: Aufprallpunkte reale und virtuelle Tests (K = Ort des Kopfkontaktes)

Ein Aufprall auf die Frontscheibe im mittleren Bereich verursacht aufgrund des erhöhten Deformationsraums weniger schwere bzw. keine tödliche Kopfverletzungen (vgl. Vorprojekt).

Die herausgestellten drei Aufprallpunkte sollen im Folgenden simuliert und realen Impaktortests unterzogen werden.

5.4.4 Impaktorsimulation

Untersuchungen hinsichtlich der Parameter für das neue Testverfahren und Impaktortests zur Vorauslegung des crashaktiven Systems werden im Rahmen dieses Projekts parallel durchgeführt. Auf Grund dessen werden virtuelle und reale Impaktortests analog zum bereits existierenden EEVC WG17 Prüfprotokoll bzw. Euro NCAP mit dem 4,8 kg schweren Impaktor bei 40 km/h durchgeführt (vgl. Abb. 5-38). Qualitativ sind die Ergebnisse mit den in Abschnitt 4.3 abgeleiteten Parametern für den Impaktortest vergleichbar. Das Ergebnis ist in allen Tests ein Beschleunigungssignal mit zugehörigem HIC-Wert und der Aufprallkinematik des Impaktors. Der Einfluss der Aufprallgeschwindigkeit ist in Abschnitt 4.3.2 erläutert.

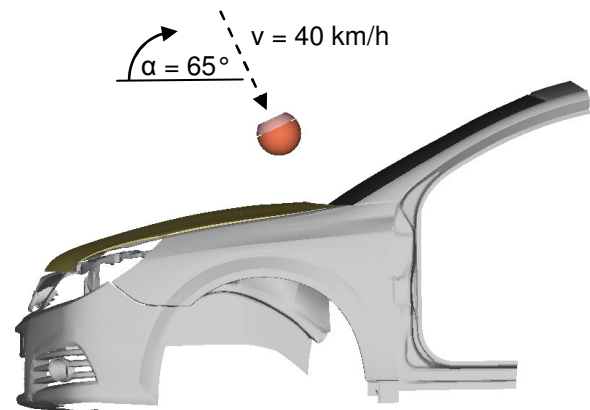


Abb. 5-38: Randbedingungen bei den virtuellen und realen Impaktortests

Die in Abb. 5-39 dokumentierten Simulationen mit Beschuss auf die Punkte 1 bis 3 beginnen bei $t = -80$ ms mit dem Entfaltungsvorgang des Airbags. Dieser ist bereits nach ca. 40 ms in Arbeitsposition, so dass die gesamte Simulationszeit im Vergleich zum tatsächlichen Kopfaufprall bei ca. 130 ms verkürzt werden kann. Die Impaktorsimulation mit Beschuss des Serienfahrzeugs ist im Abschnitt 10.7 des Anhangs dargestellt.

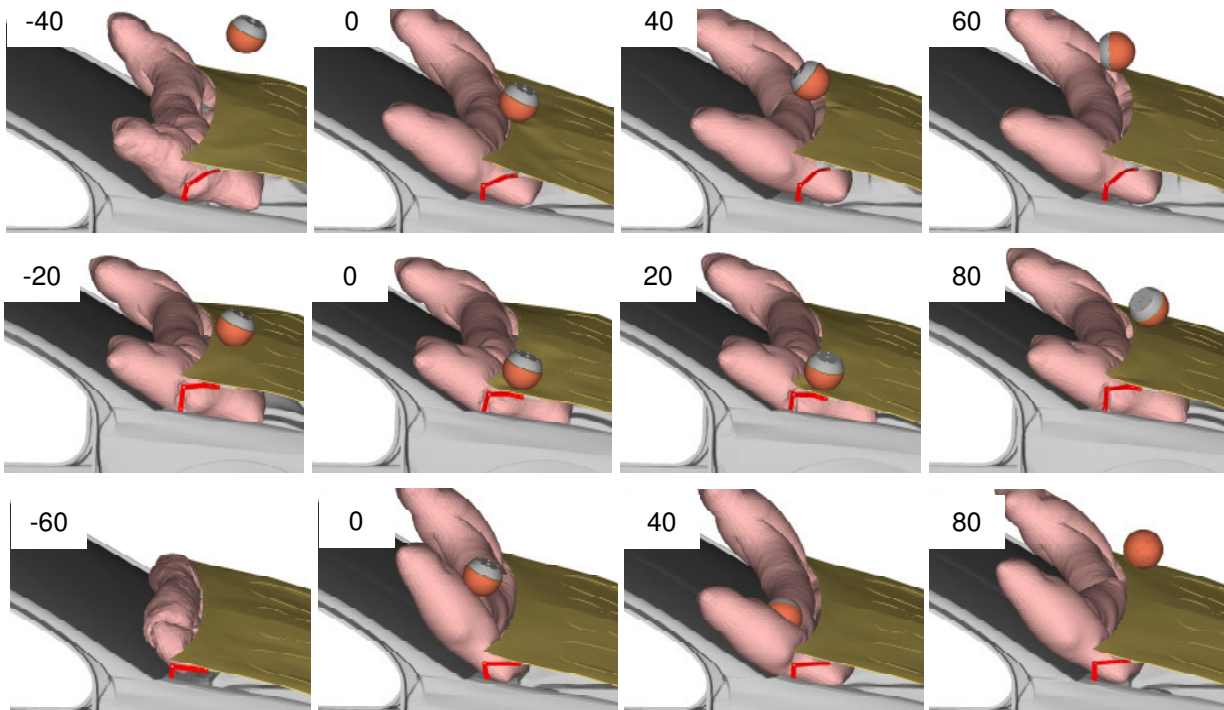


Abb. 5-39: Impaktorsimulationen auf Punkt 1, oben, bis 3, unten (t in [ms])

Beim Test an Punkt 1 schlägt der Impaktor bei $t = 0$ ms an der hinteren Haubenkante auf. Die Haubenkante verformt sich, der Impaktor erfährt eine Rotationsbewegung um die y-Achse und dreht sich in den Airbag hinein. Etwa 30 ms nach dem Erstkontakt bewegt sich der Kopfimpaktor wieder aus dem Airbag heraus. Im Vergleich dazu ist der Rückprall nach dem Aufprall auf das Scharnier an Punkt 2 geringer, wobei der Deformationsweg nicht vollständig ausgenutzt wird. Beim alleinigen Kontakt mit dem Air-

bag sind die Verweildauer des Impaktors im Airbag von ca. 40 ms und der Rückprall am stärksten ausgeprägt. Bei Vergleichen der Verzögerungsverläufe der Simulationen in Abb. 5-40 ist der Einfluss des Airbags durch den flacheren und langsameren Anstieg deutlich erkennbar. Die HIC-Werte liegen an allen Punkten bei ca. 500 bis 600 (vgl. Abb. 5-55), wobei die einzelnen charakteristischen Verläufe denen der Versuche ähnlich sind und im folgenden Abschnitt erläutert werden.

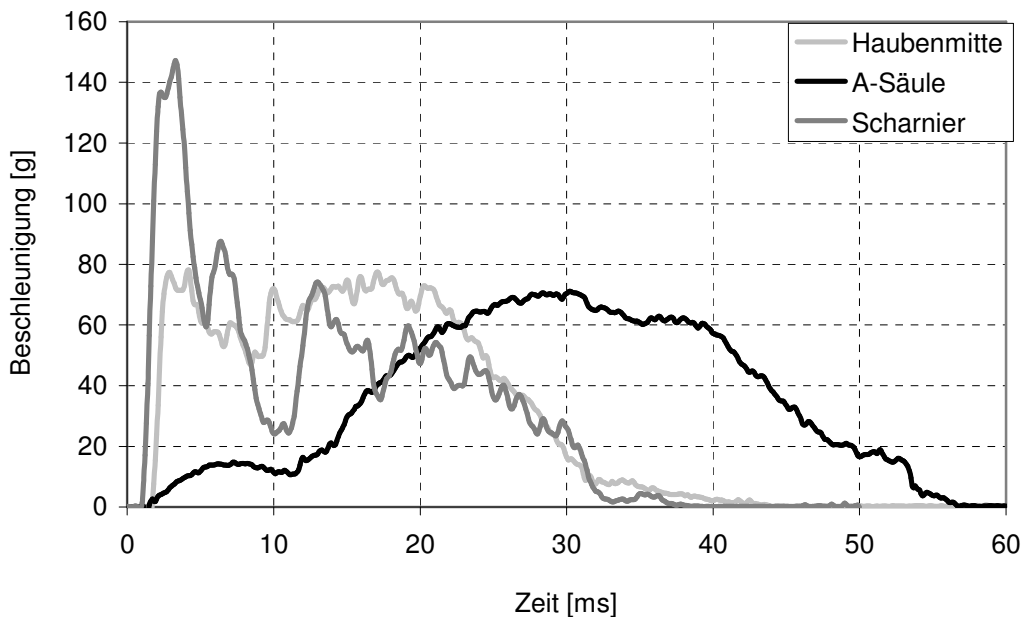


Abb. 5-40: Beschleunigungsverläufe aus den Simulationen mit Airbag

5.4.5 Impaktorversuche

Im Testverfahren bilden die Impaktortests mit den Erkenntnissen aus den vorangegangenen Simulationen die Basis für die Bewertung. Die durchgeführten Impaktorversuche liefern vergleichbare Ergebnisse zu existierenden Impaktortests in der GTR bzw. Euro NCAP. Sie werden in diesem Projekt gleichzeitig zur Vorauslegung des crashaktiven Systems vor Durchführung des Dummytests eingesetzt. Aus den Impaktorsimulationen können die Flugrichtung bzw. die Abrollbewegung und damit die Kinematik des Impaktors bei den realen Versuchen bei der im Vorfeld durchgeführten Punktauswahl bereits abgeschätzt werden. Die zeitliche Abstimmung entstammt den Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen bzw. dem Dummytest. Entsprechend diesen Erkenntnissen werden die Impaktorversuche an den Punkten 1 bis 3 beim Serienfahrzeug und beim modifizierten Fahrzeug durchgeführt. Der Einfluss der Gravitation kann aufgrund der kurzen, steilen Flugbahn im linearen Test vernachlässigt werden.

5.4.5.1 Versuchsaufbau

Der 4,8 kg schwere EEVC-Erwachsenenkopfimpaktor soll beim Test mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h auf die im Vorfeld ausgewählten Punkte 1 bis 3 des Serienfahrzeugs bzw. des modifizierten Fahrzeugs auftreffen (vgl. Abb. 5-37 und Abb. 5-41). Durch zwei Hochgeschwindigkeitskameras wird eine schräge und eine seitliche Sicht auf den Airbagbereich des Fahrzeugs ermöglicht (vgl. Abschnitt 10.7 Anhang). Die Ausrichtung des Prüfstands erfolgt durch einem Laserpunkt am Prüfstand, der bei Ausrichtung der Flugbahn mit einem 65°-Winkel zur Horizontalen auf das Fahrzeug gerichtet wird. Bei den Tests mit Haubenaufstellung wird die Ausrichtung im aktivierten Zustand der Haube durchgeführt.

Bei dem Aufprall an der A-Säule kann bei vollständiger Abdeckung durch den Airbag ein Aufprall auf die Struktur ausbleiben. Zur Sicherung des Impaktors und Schutz des Prüfstands bei einem möglichen Rückprall ist ein Fangnetz gemäß Abb. 5-42 angebracht.

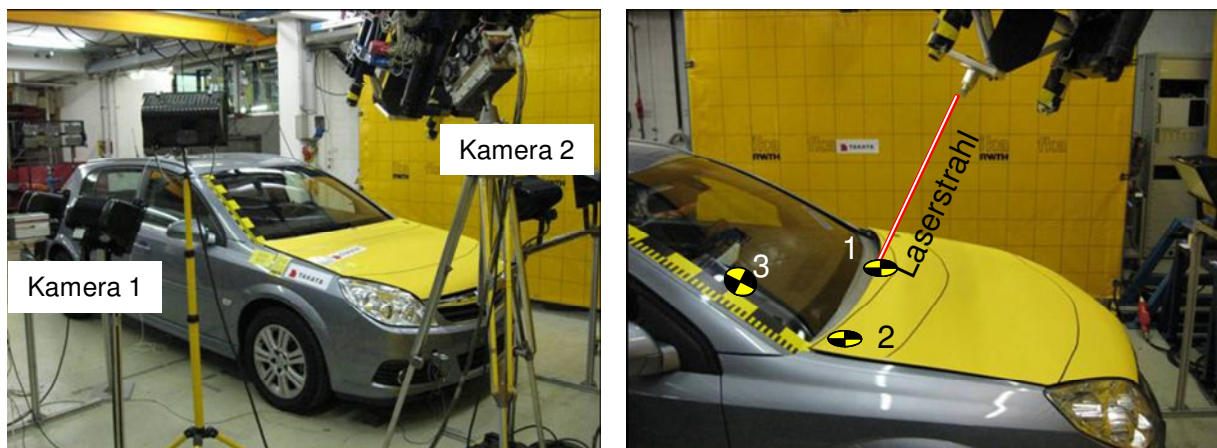


Abb. 5-41: Versuchsaufbau mit Ausrichtung auf die Aufprallpunkte



Abb. 5-42: Versuchsaufbau – Airbagtest im A-Säulenbereich

5.4.5.2 Impaktorversuche am Serienfahrzeug

Der Punkt 1, an dem sich näherungsweise der Kopfaufprallort des 50 %-Mannes aus den Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen sowie dem Dummyversuch befindet, liegt am Übergangsbereich zwischen Haube und Frontscheibe. Der Impaktoraufprall auf diesen Punkt an der hinteren Haubenkante in Abb. 5-43 führt zu geringen plastischen Deformation der Haube und einer Beschädigung der Windschutzscheibe. Der Kontakt erfolgt zunächst auf der Haube und ab ca. $t = 20$ ms zusätzlich auf der Scheibe. Sowohl Haube als auch Scheibe lassen aufgrund des Unterbaus kaum Deformation zu.

Der durch die fehlende Deformationsmöglichkeit bedingte harte Aufprall spiegelt sich, ähnlich wie beim Dummyversuch, im Beschleunigungsverlauf wider (vgl. Abb. 5-45). Der HIC-Wert überschreitet mit 1179 den geforderten Grenzwert von 1000. Der Impaktortest mit identischen Randbedingungen am Scharnierbereich ist in Abb. 5-48 ausgewertet und

liefert einen HIC-Wert von 2206. Ein entsprechender Versuch an der A-Säule wird ähnlich wie bei Euro NCAP nicht durchgeführt, da in diesem Bereich die Steifigkeit der Struktur der A-Säule den geringsten Deformationsraum zulassen wird. Dabei wird ein im Vergleich zu den übrigen Impaktortests maximaler HIC-Wert auftreten.

Im Folgenden soll die in den Dummytests nachgewiesene Reduktion der o. g. HIC-Werte beim Aufprall auf das Serienfahrzeug durch den Einsatz des crashaktiven Systems bestätigt werden.

5.4.5.3 Dynamische Versuche am modifizierten Fahrzeug

Der erste dynamische Impaktortest, d. h. mit Airbagaktivierung und um ca. 100 ms versetzter Auslösung des Kopfinduktors, erfolgt an Punkt 1. Der Test kann in die drei Phasen Auslösen, Aufprall und Abprall bzw. Rückstoß gegliedert werden (vgl. Abb. 5-44).

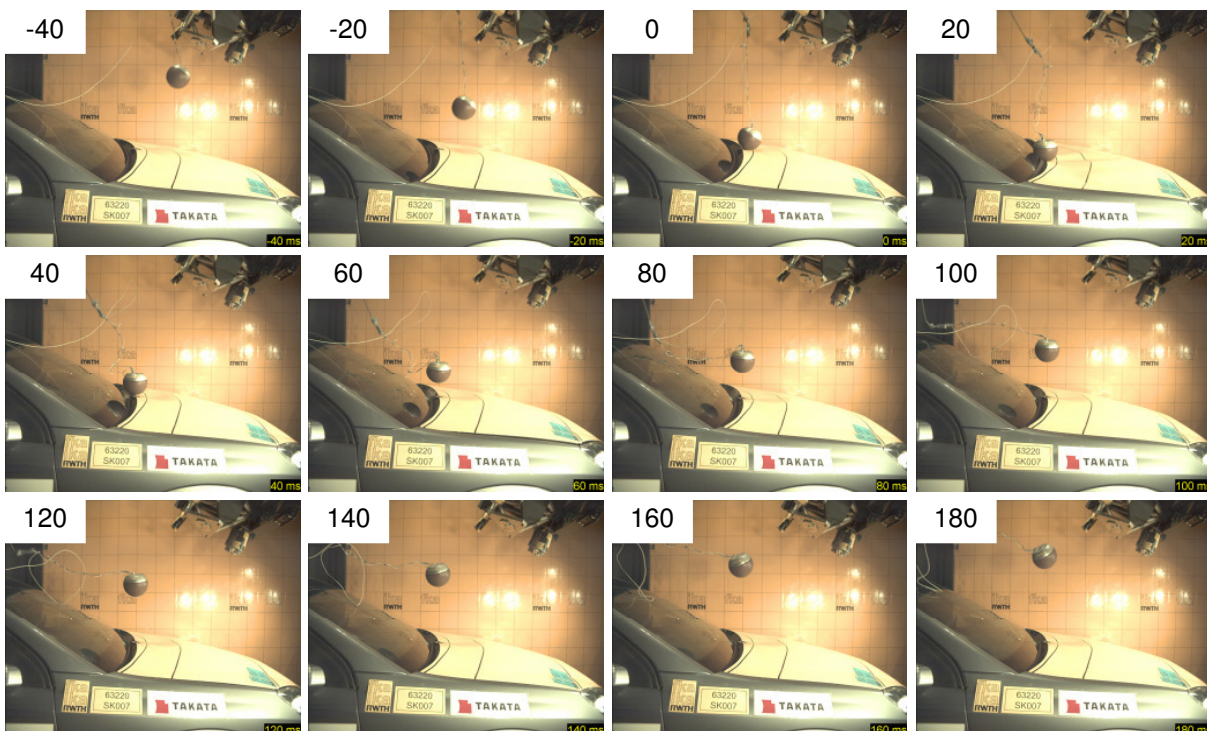


Abb. 5-43: Impaktorversuch an Serienversion – Punkt 1 Haubenmitte, Zeit in [ms]

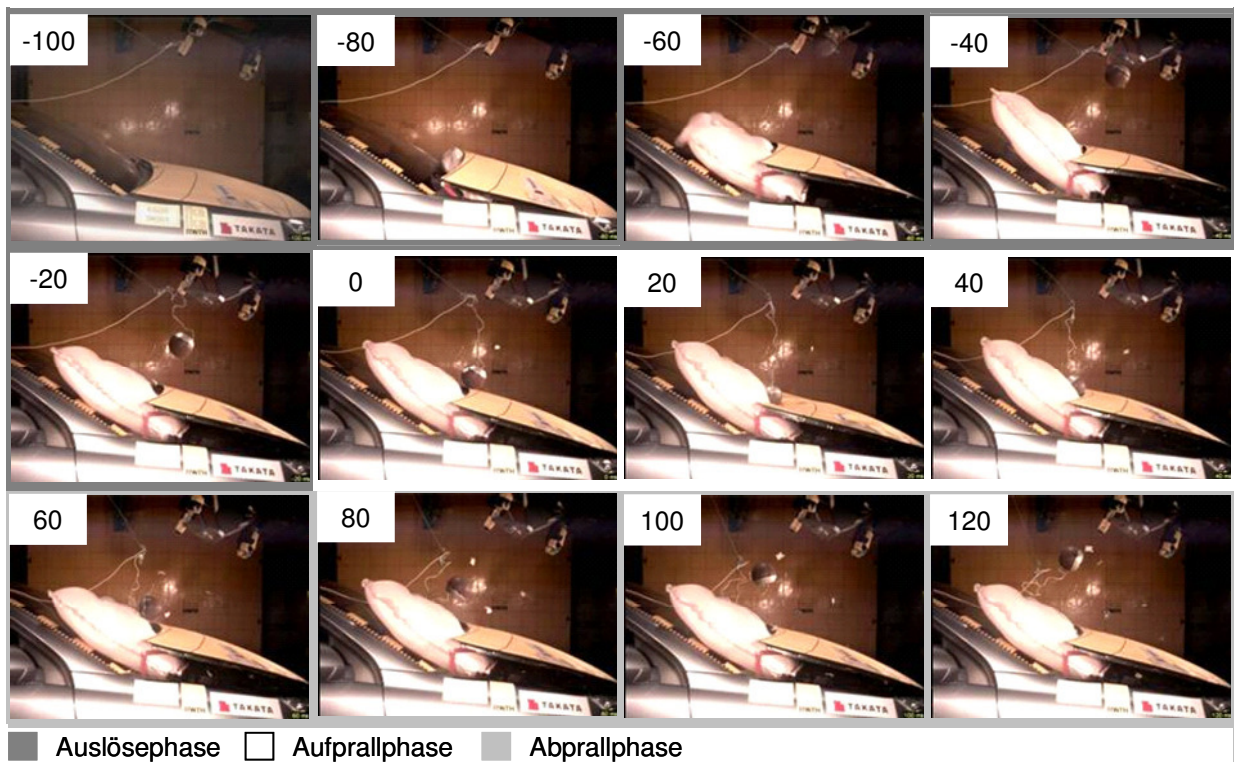
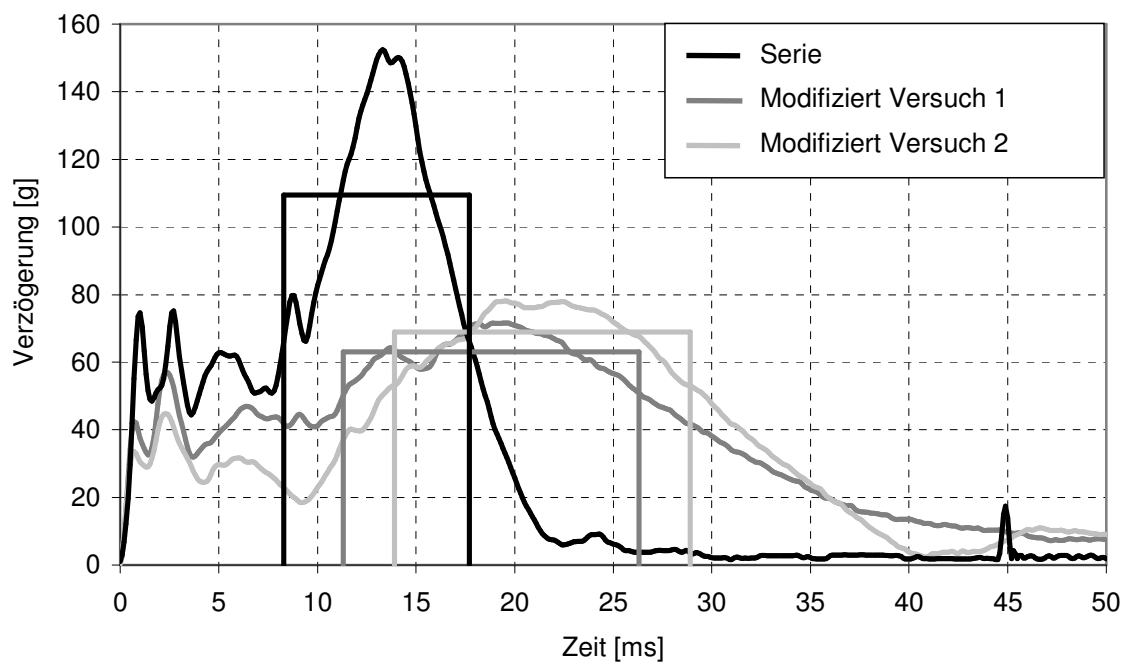


Abb. 5-44: Haubentest auf Punkt 1, Zeit in [ms]



	HIC ($t_1 - t_2$ [ms])	a_{\max} [g]
Serie	1179 (8,3 - 17,7)	152,43
Modifiziert Versuch 1	474 (11,3 - 26,3)	71,66
Modifiziert Versuch 2	591 (13,9 - 28,9)	78,18

Abb. 5-45: Verzögerungs-Zeit-Diagramm – Haubentest (Punkt 1)

Der Ablauf des dynamischen Tests beginnt mit der Auslösephase des Airbags bei $t = -100$ ms, die sich bis zum Aufprall des Impaktors bei $t = 0$ ms erstreckt. Der Airbag ist nach ca. 40 ms vollständig gefüllt. Eine Standzeit des Airbags oberhalb von 200 ms gewährleistet, dass dieser Arbeitszustand während der gesamten Aufprallphase erhalten bleibt. In der Aufprallphase besteht zunächst Kontakt des Impaktors mit der Haube (bis $t = 20$ ms), gefolgt von einem gleichzeitigen Kontakt mit Haube und Airbag bei der Abrollbewegung auf der Haubenkante in Richtung Airbag (bis $t = 40$ ms). Anschließend erfolgt die Abprallphase, in der sich der Impaktor durch einen Rückstoß löst und dabei eine Rückfederung des Airbags entsteht. Beim gesamten Vorgang erfolgt kein Einklappen der Scharniere.

Der ermittelte HIC-Wert nach Abb. 5-45 beträgt 474 bzw. 591 im Wiederholversuch. Im Vergleich zum vorangegangenen Versuch ohne Airbag werden durch den vergrößerten Deformationsraum und die elastische Bewegung des Airbags das Beschleunigungsniveau gesenkt, und der HIC-Wert verringert sich durchschnittlich um 55 %. Die Maximalwerte der Verzögerungsverläufe verschieben sich um ca. 10 ms. Die HIC-Zeitfenster schöpfen beim flacheren Verlauf der Kopfverzögerungen am modifizierten Fahrzeug die volle Breite von 15 ms aus.

Ein zu hoher Airbaginnendruck kann bei der vollständigen Silikonisierung ohne Auslassöffnungen in der Abprallphase zu einem Verhalten ähnlich einer Luftfeder führen und einen ausgeprägten Rückprall („Rebound“)-Effekt auslösen. Für die reale Auslegung ist dieser Effekt durch geeignete Anpassung des Airbaginnendrucks bzw. das Vorsehen von Gasauslässen („Ventholes“), ähnlich wie beim Insassenairbag, vermeidbar. Permanente Auslassöffnungen können jedoch aufgrund der erforderlichen Standzeit nicht realisiert werden, da der Kopfaufprall überall in einem von Aufprallge-

windigkeit und Größe des Fußgängers abhängigen Zeitintervall auf dem Airbag stattfinden kann.

Die Haube erhält durch die Aufstellbewegung bei der dynamischen Belastung mit der eigenen Masse sowohl globale als auch, durch den Aufprall des Impaktors, lokale, bleibende Deformationen. Die kinematischen Bauteile der vorderen und hinteren Scharniere nehmen durch den Impaktoraufprall keinen Schaden und müssen somit nicht ersetzt werden.

Der Grenzwert $HIC = 1000$, der üblicherweise in der Fahrzeugentwicklung bei Einkalkulation von 20 % Sicherheitsreserve einen Zielwert von $HIC = 800$ bedingt, wird mit dem crashaktiven System um 40 % unterschritten. Nach dem Impaktorversuch auf die Haubenkante ist eine bleibende Deformation gemäß Abb. 5-46 abweichend vom Dummyaufprall nur lokal an der Haubenhinterkante vorhanden.

Die drei Phasen beim Impaktortest im Scharnierbereich werden zudem von der Aus- und Einklappbewegung des Scharniers selbst begleitet (vgl. Abb. 5-47). Durch den Aufprall senkt sich das modifizierte Scharnier bei $t = 20$ ms bis auf die Hälfte der Öffnungshöhe ab. Der Impaktor erfährt keine Gegenkraft durch das Scharnier, sondern wird durch den darunter liegenden Airbag abgefangen. Der Rückstoß beim Abprall erfolgt am Scharnier mit geringerer Geschwindigkeit als beim reinen Haubenkontakt. Die übliche Verstärkung des Scharnierbereichs führt dort zu erhöhter Steifigkeit. Im Vergleich zum ausschließlichen Kontakt mit der Haube in Test 1 liegt der Beschleunigungsverlauf in Abb. 5-48 früher auf einem höheren konstanten Niveau und fällt beim Einfedern des Scharniers schlagartig ab. Der HIC-Wert von 841 liegt unterhalb des Grenzwertes $HIC = 1000$ und geringfügig über dem o. g. HIC-Wert von 800. Am modifizierten Fahrzeug wird der HIC-Wert bei ähnlicher Lage der Verzögerungsverläufe und HIC-Zeitfenster im Vergleich zur Serienversion um 62 % gesenkt.

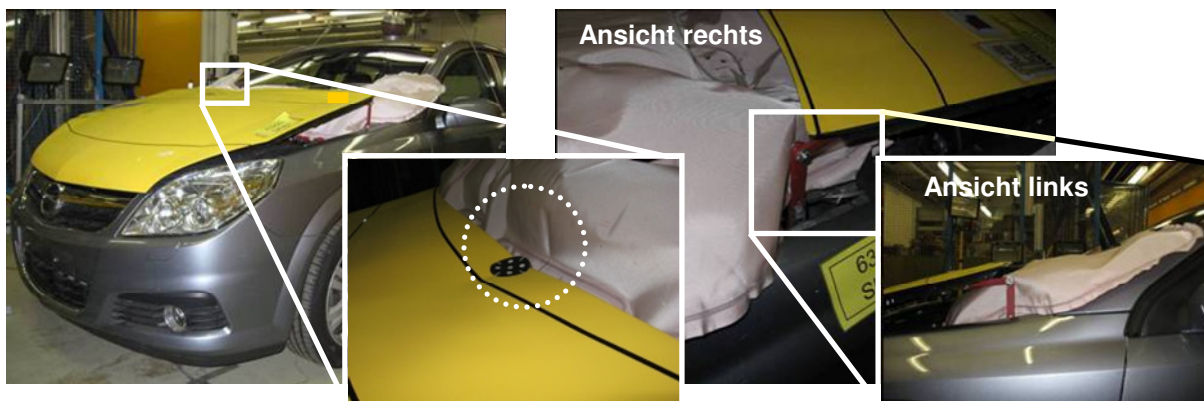


Abb. 5-46: Ansichten nach dem Haubentest

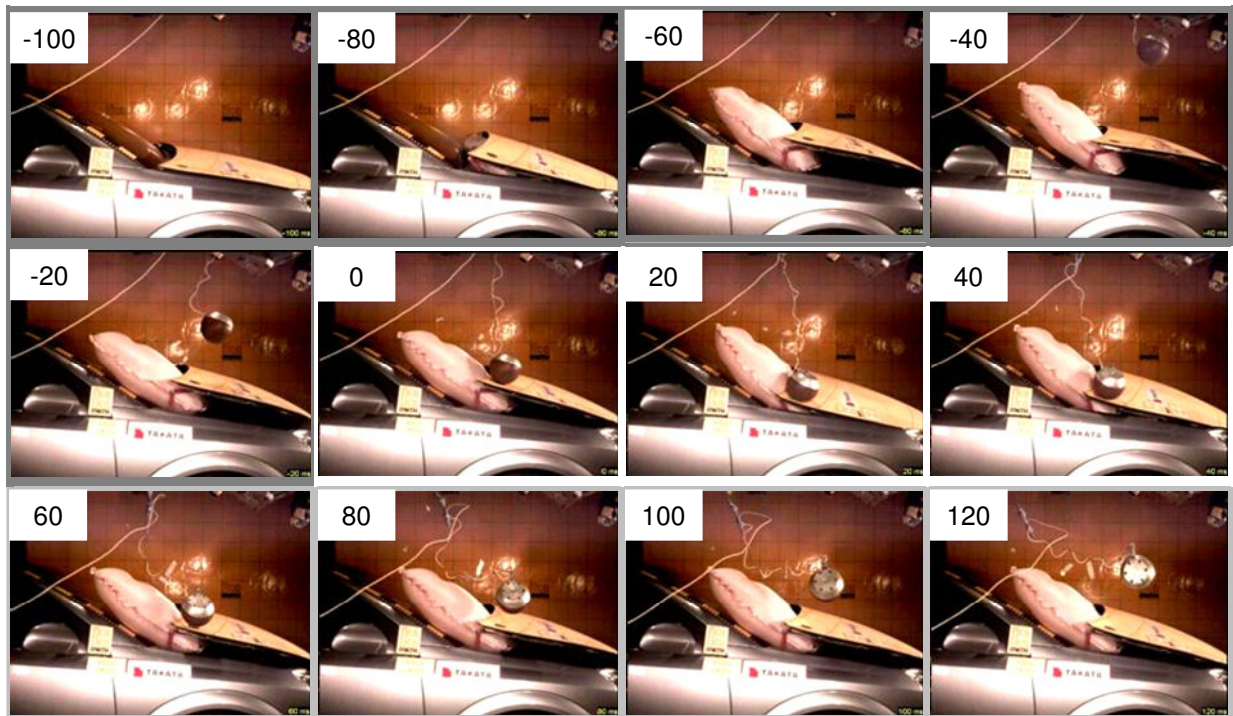
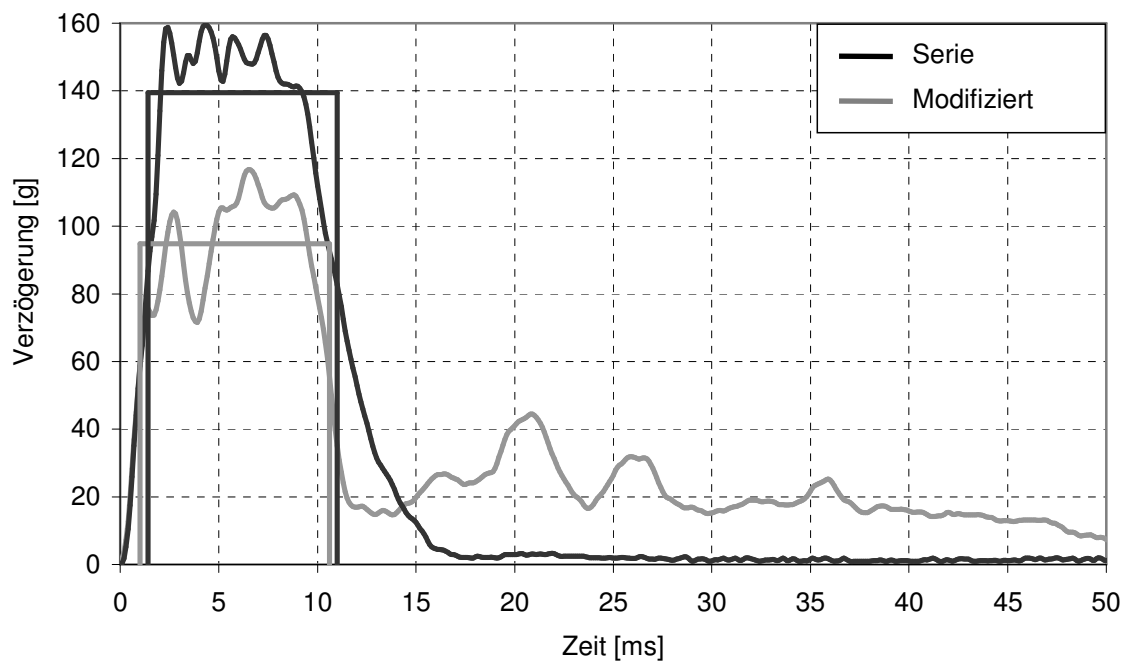


Abb. 5-47: Test im Scharnierbereich auf Punkt 2, Zeit in [ms]



	HIC ($t_1 - t_2$ [ms])	a_{\max} [g]
Serie	2206 (1,4 - 11,0)	159,53
Modifiziert	841 (1,0 - 10,6)	116,72

Abb. 5-48: Verzögerungs-Zeit-Diagramm – Test im Scharnierbereich (Punkt 2)

Nach dem Test im Scharnierbereich liegen eine lokale Deformation und ein intakter Gelenkmechanismus nach Abb. 5-49 vor. Der Bewegungsablauf des Gelenkscharniers wird durch die Krafrichtung beim Aufprall nicht blockiert. Bei dem Aufschlag des Impaktors wird über das Scharnier keine Energie abgebaut.

Bei Punkt 3 nach Abb. 5-42 findet der Aufprall an der A-Säule auf dem vollständig durch den Airbag

abgedeckten harten Strukturbereich statt. Der Aufprallpunkt des Impaktors hat einen seitlichen Abstand von ca. 100 mm zur A-Säule, bedingt durch die Abmessungen des entfalteten Airbags. Der nicht aufgeblasene Airbag bedeckt die A-Säule vollständig, wobei sich der Airbag durch die Gasfüllung weiter nach innen formt. Für die Auslegung des Airbags ist eine Anpassung an die Fahrzeugbreite notwendig.

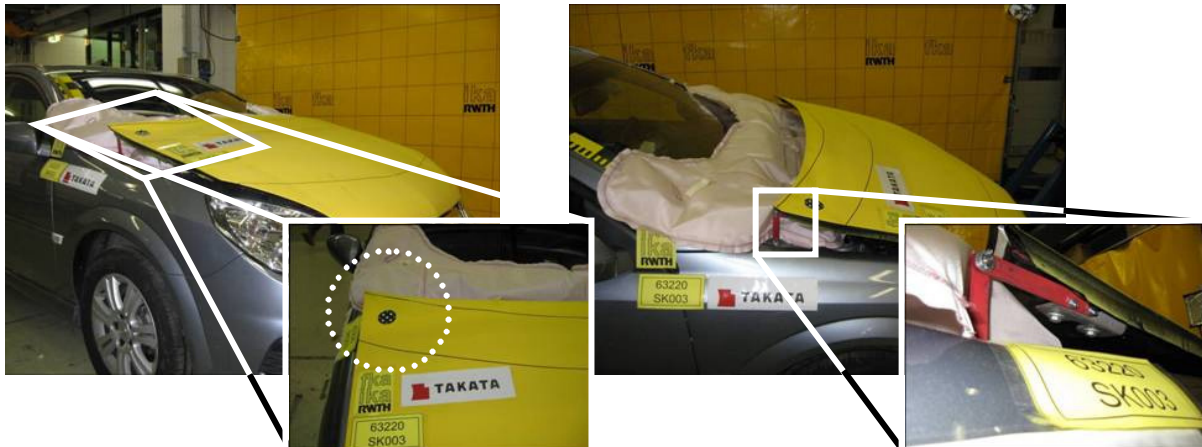


Abb. 5-49: Ansichten nach dem Test im Scharnierbereich

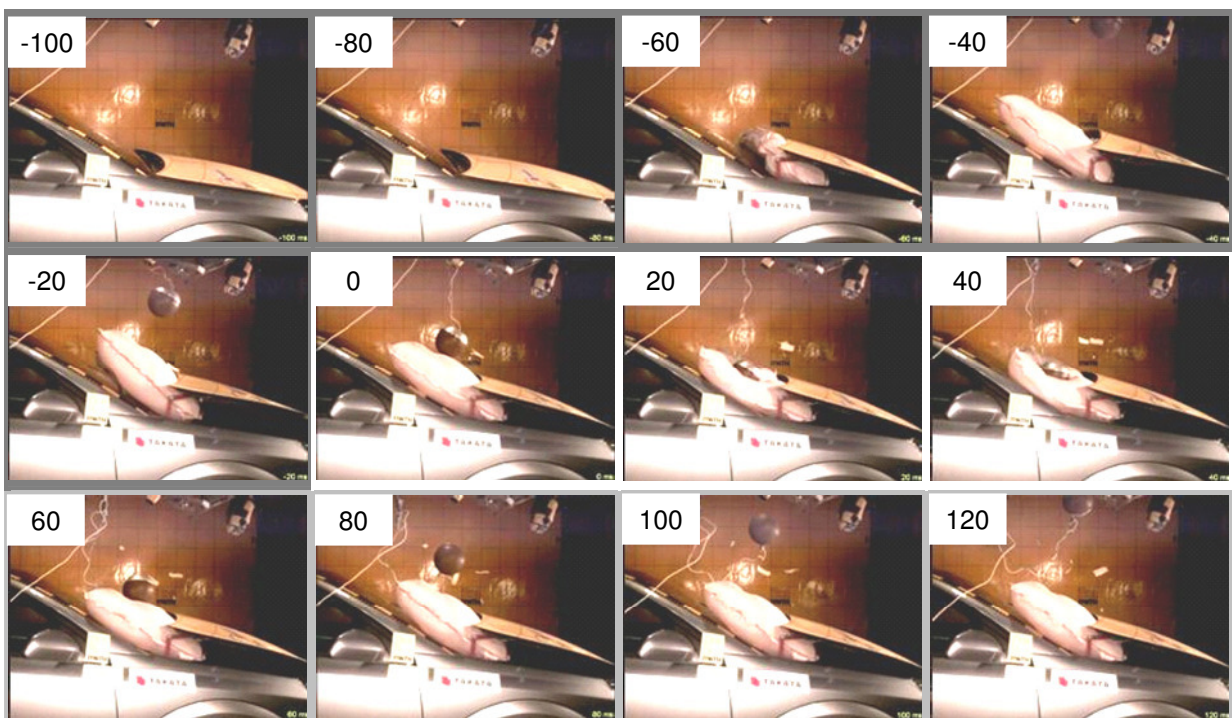
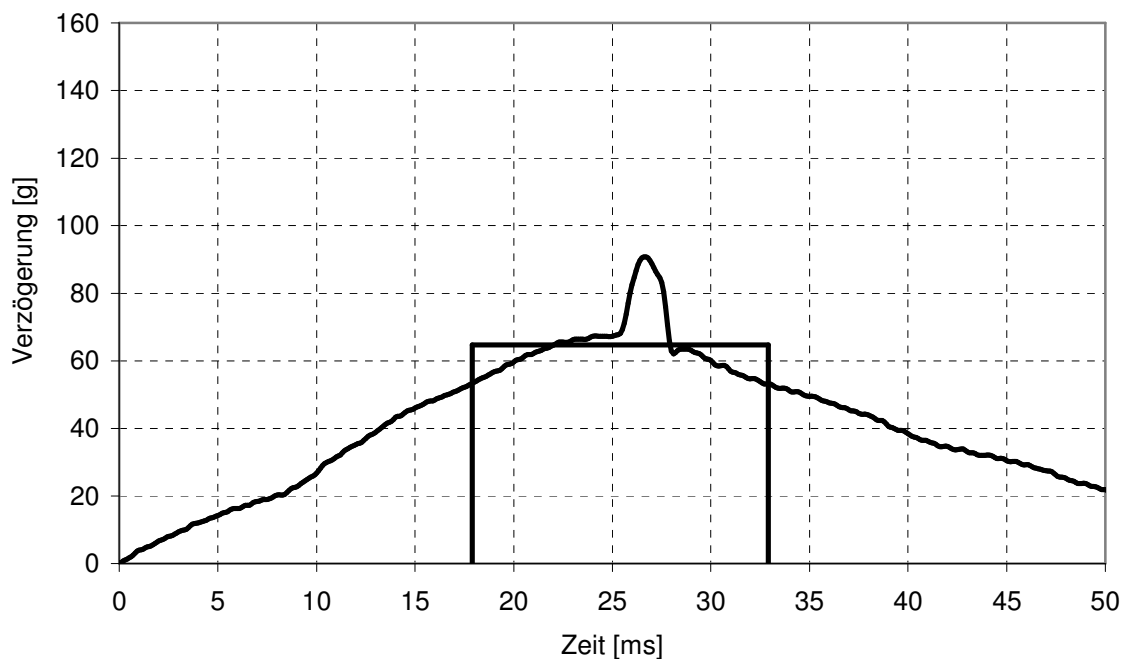


Abb. 5-50: Airbagtest im A-Säulenbereich, Zeit in [ms]

Da der Airbag beim Deformationsvorgang durch das nachgiebige Gewebe weder eine hohe beschleunigte Masse noch eine hohe Steifigkeit bereitstellt, erfolgt der lang andauernde Anstieg der Beschleunigung nahezu linear auf geringem Niveau. Durch den Aufprall selbst steigt das Niveau der Verzögerung aufgrund der progressiven Wirkung des federnden Gases im Airbag an.

Der maximale Eintrittsweg und die größte Verzögerung werden zum gleichen Zeitpunkt erreicht. Durch das vollständige Eintauchen in den Airbag berührt der Impaktor nach 25 ms die Frontscheibe (vgl. Abb. 5-51 und Abb. 5-52). Dadurch werden eine Beschädigung der Scheibe und ein kurzer Anstieg der Beschleunigung mit einem Maximum von ca. 90 g zwischen $t = 25$ ms und $t = 30$ ms verursacht. Generell sollte jedoch das Ziel bei Ab-

deckung der Scheibe bestehen, sie zu erhalten und diese zusätzliche Anhebung der Verzögerungen um ca. 20 g auf einer Dauer von 3 ms zu vermeiden, um damit auch die Reparaturkosten zu reduzieren. Der rampenförmige Abfall der Beschleunigung ist vom Verlauf her symmetrisch zu dessen Anstieg. Der HIC-Wert beträgt 505 (< 800) mit einem Zeitfenster maximaler Breite von 15 ms. Im Vergleich zu den Versuchen an Punkt 1 und 2 ist das Maximum der Verzögerung durch den deutlich langsameren Anstieg zu einem späteren Zeitpunkt bei ca. 27 ms nach Erstkontakt verschoben. Aufgrund des flachen Kurvenverlaufs ohne signifikante Verzögerungsspitzen (vgl. Versuch 1, Serienfahrzeug) wird bei allen Versuchen mit Airbagkontakt das HIC-Fenster von 15 ms vollständig ausgenutzt.



	HIC ($t_1 - t_2$ [ms])	a_{\max} [g]
Modifiziert	505 (17,9 - 32,9)	90,75

Abb. 5-51: Verzögerungs-Zeit-Diagramm – Airbagtest im A-Säulenbereich (Punkt 3)



Abb. 5-52: Ansichten nach dem Airbagtest im A-Säulenbereich

Der Vergleich von HIC-Werten und Rückpralleffekt in Abb. 5-53 deutet auf einen Zielkonflikt zwischen günstigem HIC-Wert und geringem Rückstoß hin. Ein kombinierter Kontakt des Impaktors mit der Haube und dem Airbag am Öffnungsspalt scheint die Ergebnisse vorteilhaft zu beeinflussen. Dabei erfolgt ein Teil der Energieabsorption durch die Haube und damit am Fahrzeug, so dass mögliche negative Auswirkungen eines ausgeprägten Rückpralls auf den Sekundärkontakt reduziert werden. Die Haubenkante an sich kann jedoch zu einer erhöhten Einleitung von Kontaktkräften auf einer geringen Fläche am Impaktor (d. h. hoher Kontaktdruck, vgl.

APROSYS SP3) führen, die derzeit noch nicht von den Impaktoren gemessen werden können.

5.4.5.4 Vergleich mit Simulationsergebnissen

Im Testverfahren können die Ergebnisse aus dem Versuch zur Validierung der Simulationen verwendet werden. Beispielhaft weist Abb. 5-54 die Übereinstimmung der Bewegung des Kopfimpaktors beim Aufprall auf die Haubenkante in Versuch und Simulation nach.

	(1) Haubenkante	(2) Scharnier	(3) Airbag
HIC-Wert	gering (ca. 500)	mäßig (840)	gering (500)
Rückprall	mäßig	gering	hoch

Abb. 5-53: Vergleich HIC-Wert und Rückprall-Effekt bei $v_{\text{Impaktor } 4,8 \text{ kg}} = 40 \text{ km/h}$

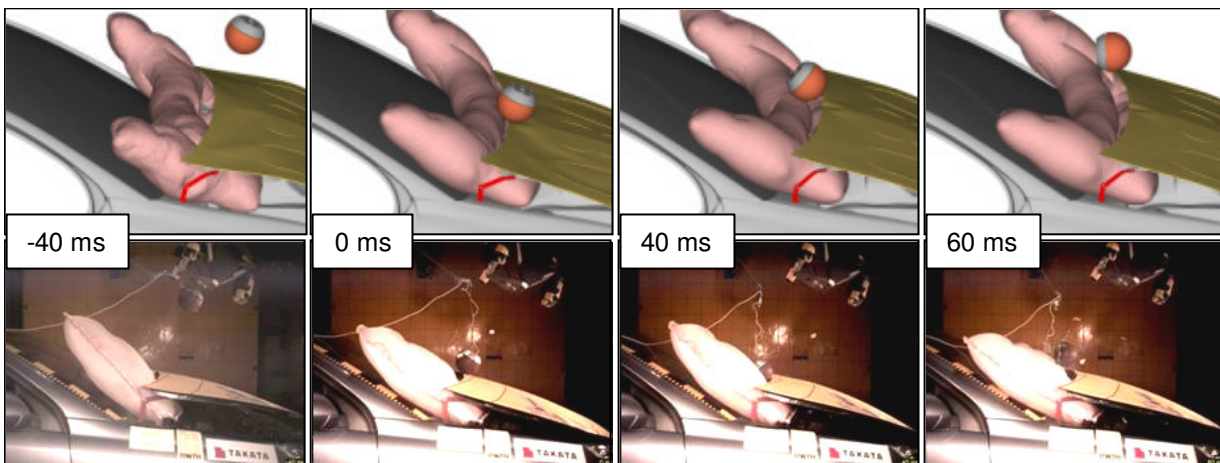


Abb. 5-54: Vergleich Simulation und Versuch – Haube Punkt (1)

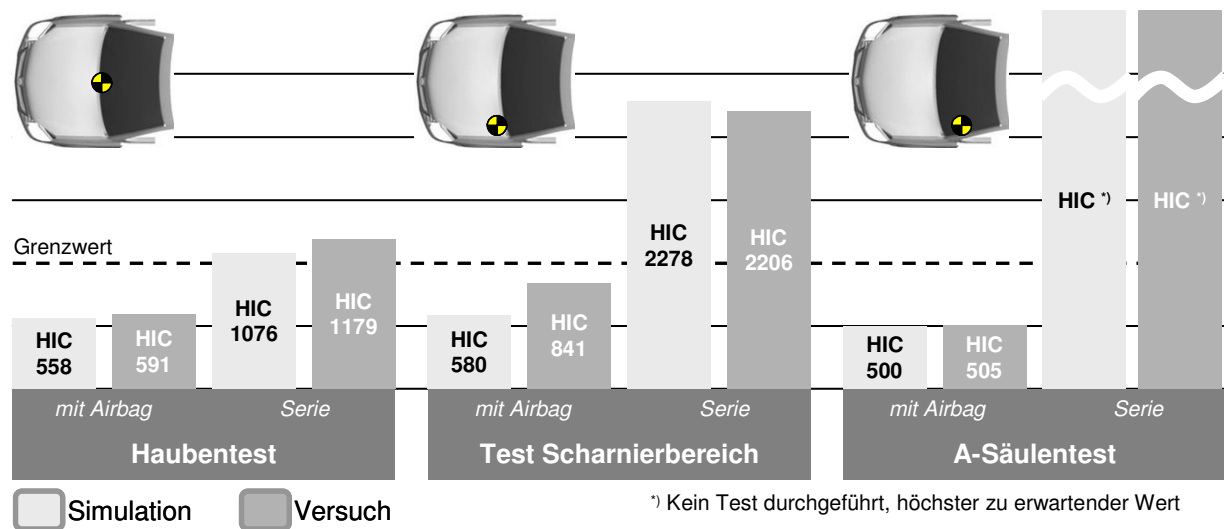


Abb. 5-55: Vergleich der HIC-Werte aus Versuch und Simulation

Die Abrollbewegung der Impaktoren und die Deformation der Haubenhinterkante stimmen gut überein. Der Rückprall ist in den Simulationen ab ca. $t = 60$ ms geringfügig höher ausgeprägt.

Abschließend können die HIC-Werte der verschiedenen virtuellen und realen Impaktortests in Abb. 5-55 gegenübergestellt werden (bei Haubentest maximaler HIC-Wert aus beiden Versuchen). Der Vergleich aus Versuch und Simulation ergibt beim Haubentest (1) und Airbagtest im A-Säulenbereich (3) sehr gute Übereinstimmungen. Beim Aufprall auf den Scharnierbereich treten aufgrund der Vernachlässigung der Reibung innerhalb des Scharniers in der Simulation Abweichungen auf. Die Rangfolge hinsichtlich der Höhe der HIC-Werte ist in Versuch und Simulation für alle Testpunkte identisch. Die Simulationen liefern gute Ergebnisse, auf deren Grundlage Systeme untersucht und verglichen werden können.

5.4.6 Bewertung von Halsbelastungen

5.4.6.1 Biomechanische Grundlagen zur Bewertung der Halsbelastung

Als Halsverletzungen beschreibt man in der Regel Verletzungen der Halswirbelsäule. Diese umfassen die ersten sieben Wirbel (C1 - C7) unterhalb des Schädels. Es wird der Wirbel C1 als Atlas bezeichnet, C2 als Axis. Durch stumpfe Gewalteinwirkung, wie sie bei Fußgängerunfällen auftritt, sind häufig folgende Verletzungsmuster zu beobachten:

- Durch eine übermäßige Flexion (Vorwärtsbewegung) des Kopfes relativ zur Halswirbelsäule im Bereich des Atlas C1 entstehen Scherkräfte, die meist tödliche Folgen haben.

- Bei einem Aufprall des Gesichtes bei gleichzeitiger Torso-Flexion oder bei einem Schlag gegen das untere Hinterhaupt kann es zu einer Fraktur des Zahnfortsatzes des Wirbels C2 (Dens) kommen.
- Aufgrund axialer Kompression der Wirbelsäule (Aufwärtsbewegung des Körpers bei unbewegtem Kopf) kommt es zum Bruch des Wirbels C5.
- Ebenfalls eine Fraktur des Wirbels C5 kann durch ein übermäßiges, schulterseitiges Wegknicken des Kopfes verursacht werden (Fraktur der seitlichen Struktur von C5).
- Darüber hinaus kann es durch Rotation des Kopf-Hals-Bereichs zu Bänderrissen und -ablösungen kommen.

In derzeitigen gesetzlichen Regelungen (ECE R94 und FMVSS 208) sind maximale Kräfte für den Hals-Nacken-Bereich der Wirbelsäule definiert. Sie erfordern zunächst eine Sortierung des realen Kraftverlaufes nach der Höhe des Betrags der Kraft bei einer diskretisierten Filterung z. B. von 1 kHz (vgl. Auswertungen aus Vorprojekt). Die in Abb. 5-56 aufgeführten Grenzwerte können für die Abschätzung der Risiken hinsichtlich der o. g. Verletzungen der gesamten Halswirbelsäule angewandt werden.

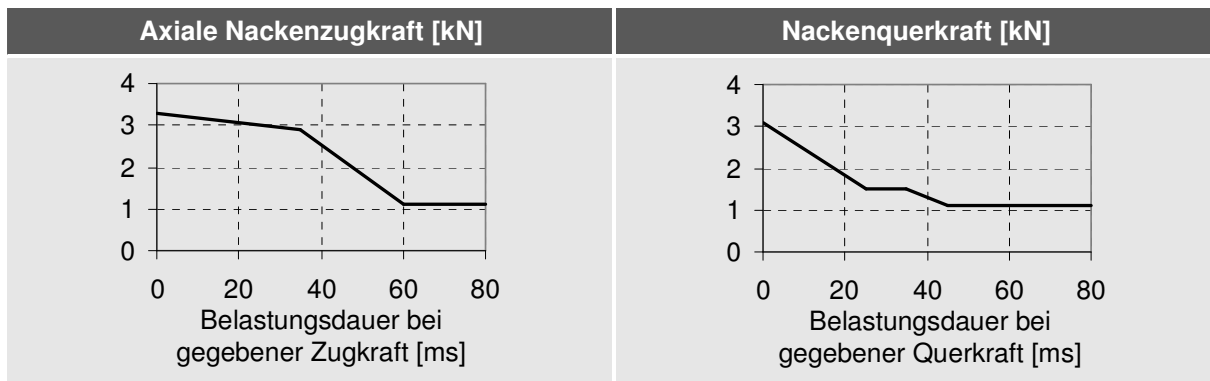


Abb. 5-56: Nackenkräfte in Abhängigkeit der Einwirkdauer aus ECE R94

Halsbelastungen nach Abb. 5-57 gliedern sich in Kräfte, Momente und Winkel in den möglichen Bewegungs- und Belastungsrichtungen des menschlichen Halses. Die Verletzungen der Halswirbelsäule finden sich dort insbesondere in der Flexion/ Extension, Inklination sowie der Zug- und Druckbelastung in z-Richtung wieder. Neben den auftretenden Belastungen in Form von Kräften und Momenten sind die Verdrehwinkel von Bedeutung. Diese sind durch die Gelenkkapseln sowie die Dehnungsfähigkeit von Bandscheiben und der Bänder zwischen den benachbarten Wirbeln limitiert und führen beim Erreichen der Bewegungsgrenzen ebenfalls zum Anstieg der Belastungen von Bändern, Knochen der Halswirbelsäule und Bandscheiben. Findet eine Überschreitung der Grenzwerte statt, so ist mit Halsverletzungen zu rechnen.

In der FMVSS 208 werden auf Basis verschiedener experimenteller Untersuchungen am 50 %-Mann die in Abb. 5-58 aufgeführten Grenzwerte genutzt. Verwendete Größen sind Biegemomente um die y-Achse (Flexion/Extension) sowie Druck- und Zugkräfte entlang der z-Achse und Scherkräfte in x- und y-Richtung.

Für die Weiterentwicklung des Testverfahrens und die Berücksichtigung von Halsbelastungen werden die aufgeführten Werte als Grundlage zur Auswertung herangezogen.

5.4.6.2 Bewertung von Halsbelastungen

Der Bewegungsablauf des Fußgängers bei der Kollision setzt sich aus einem rotatorischen und translatorischen Anteil zusammen. Die vorangegangenen Komponententests liefern Beschleunigungsverläufe beim linearen Aufprall mit den entsprechenden HIC-Werten. Es sind allerdings keine Belastungen ermittelbar, welche die Einflüsse der Rotationsbewegung beim Aufprall von Oberkörper und Schulter auf Hals- und Kopfbelastungen wie-

dergeben. Die Aufnahme der im Halsbereich auftretenden absoluten Kräfte und Momente im Realversuch ist derzeit nur mit einem Dummy (z. B. mit dem Polar-II-Dummy) möglich (vgl. Abschnitt 5.3).

Im Falle eines Schulteranpralls tritt eine ausgeprägte Rotation des Kopfes auf (vgl. [BAC05]). In der Regel verursacht der zusätzliche Impuls auf den Körper eine Zunahme von Kopfaufprallwinkeln, wobei die Geschwindigkeit beim eigentlichen Kopfaufprall schlagartig verzögert wird. Der Geschwindigkeitsunterschied ist bei kleineren Körpern (z. B. Kinderkopf) noch ausgeprägter.

Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen und der Dummytest erlauben eine Analyse der Kinematik des gesamten Körpers und damit Rückschlüsse auf auftretende Halsbelastungen. Die Messung der Halsrotation kann anhand der Dummykinematik erfolgen. Die Körpermittelachse gibt dabei die Linie der Kopfhaltung in Ausgangs- bzw. Ruhelage wieder. Abweichend von dieser Ruhelage lässt sich die lokale Kopfbewegung bzw. die relative Rotation um den jeweiligen Momentanpol messen und mit den gegebenen Werten aus Abb. 5-57 vergleichen (vgl. Abb. 5-59). Die Lage des Momentanpols vom Schulterkontakt bis zum Kopfaufprall kann näherungsweise als konstant angenommen werden.

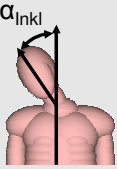
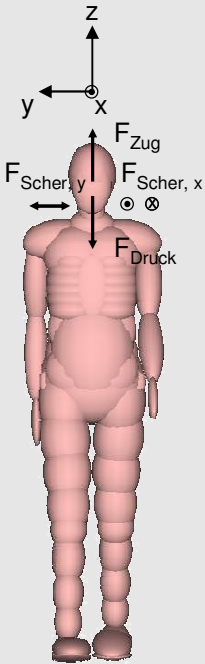
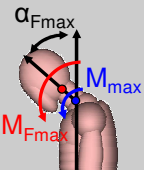
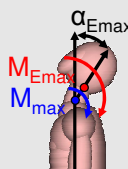
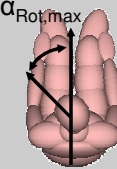
Belastung	Bewegung	Parameter	Grenzwerte	Übersicht
Inklination (x-Achse)		α_{Inkl}	40° - 50°	
Flexion (y-Achse)		M_{Fmax}	190 Nm	
		α_{Fmax}	80° - 100°	
Extension (y-Achse)		M_{Emax}	57 Nm	
		α_{Emax}	40° - 70°	
Rotation (z-Achse)		$\alpha_{\text{Rot, max}}$	60° - 80°	
Biegebelastung	Am Übergang C7/C8	M_{max}	370 Nm	
Scherbelastung (F_x, F_y)		$F_{\text{Scher, max}}$	1,8 - 2,6 kN	
Zugbelastung (F_z)		F_{Zmax}	1,1 - 2,6 kN	
Druckbelastung (F_z)		F_{Dmax}	3,6 - 5,7 kN	

Abb. 5-57: Belastungs- und Bewegungsgrenzen des menschlichen Halses [HEF06] [KRA06] [MER71]

Lastfall	Grenzwert
Flexion (y-Achse nach vorn)	190 Nm
Extension (y-Achse nach hinten)	57 Nm
Axiale Zugbelastung (z-Achse +)	4170 N
Axiale Druckbelastung (z-Achse -)	4000 N
Scherkraft (vorn und hinten liegend)	3100 N

Abb. 5-58: Nackenkräfte und -momente aus FMVSS 208

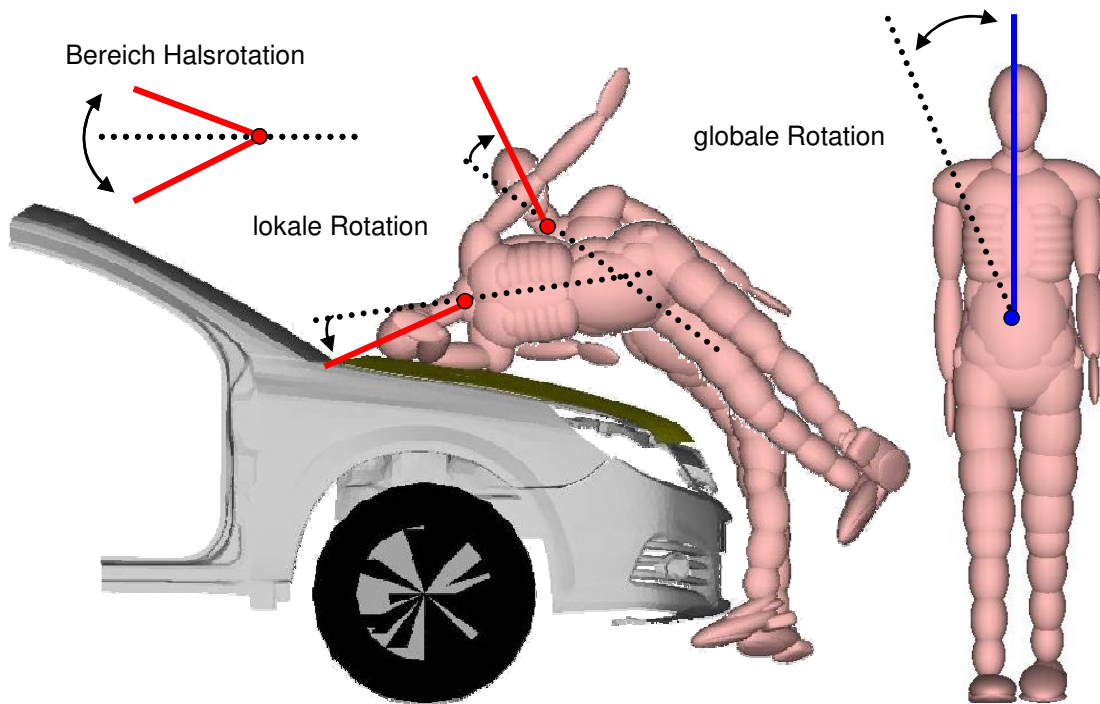


Abb. 5-59: Halsrotation, Drehmomentum um x-Achse

Die maximalen Ausschläge für die Halsrotation in beide Richtungen können in Abb. 5-60 unter Berücksichtigung der Perspektive in der realen Sequenz bestimmt werden. Bei den ermittelten Werten handelt es sich aufgrund der Schultersteifigkeit um Abschätzungen.

Bei der lokalen Rotation des Kopfes im fahrzeugfesten Koordinatensystem überwiegt die Inklination um die x-Achse des Halses. Kopf und Hals führen zuerst eine Bewegung zur fahrzeugabgewandten Seite aus, und ab dem Schulterkontakt rotiert der Kopf zurück in Richtung des Fahrzeugs (vgl. Abb. 5-59). Überlagert wird diese Bewegung durch eine Rotation des gesamten Körpers im globalen Koordinatensystem um den eigenen Schwerpunkt, die durch den Anprall an den Stoßfänger verursacht wird.

Die Messung der Winkel mit Hilfe der Referenzmarken auf dem Dummy ergeben etwa 33° bis 34° Halsrotation (vgl. Abb. 5-60), wobei weitere Änderungen nach dem Schulteranprall aufgrund der verzerrten Perspektive nicht messbar sind. Die Winkel aus den Simulationen liegen vor dem Schulteranprall im Bereich von 22° bis 24° . Nach

dem Schulteranprall werden Winkel von 12° bis 29° gemessen. Es ergeben sich hierbei maximale Winkel von bis zu 35° , so dass Rückschlüsse für die Halsrotation bei einem Realunfall gezogen werden können.

Bei einem Rotationswinkel von 40° als Anhaltswert für einen möglichen Grenzwert anhand von Abb. 5-57 liegen die o. g. Ergebnisse nahe an den biomechanisch kritischen Verdrehwinkeln. Im dynamischen Aufprallvorgang können gleichzeitig auch die anliegenden Drehmomente die ertragbaren überschreiten. Bei dem Hineinpendeln des Kopfes in einen geöffneten Haubenspalt ohne Airbag kommt es zusätzlich zu einer Erhöhung des Halswinkels, so dass in diesem Fall der Grenzwert deutlich überschritten werden kann.

Die Momente und die Kopfbeschleunigungen aus den Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen zur Bewertung der Halsbelastungen sind in Abb. 5-61 den Polar-II-Versuchen am Serienfahrzeug ohne Modifikationen beispielhaft gegenübergestellt. Absolutwerte hinsichtlich der Belastungen können aus den Simulationen wegen der vereinfachten Kontaktsteifigkeiten nicht verwendet werden.

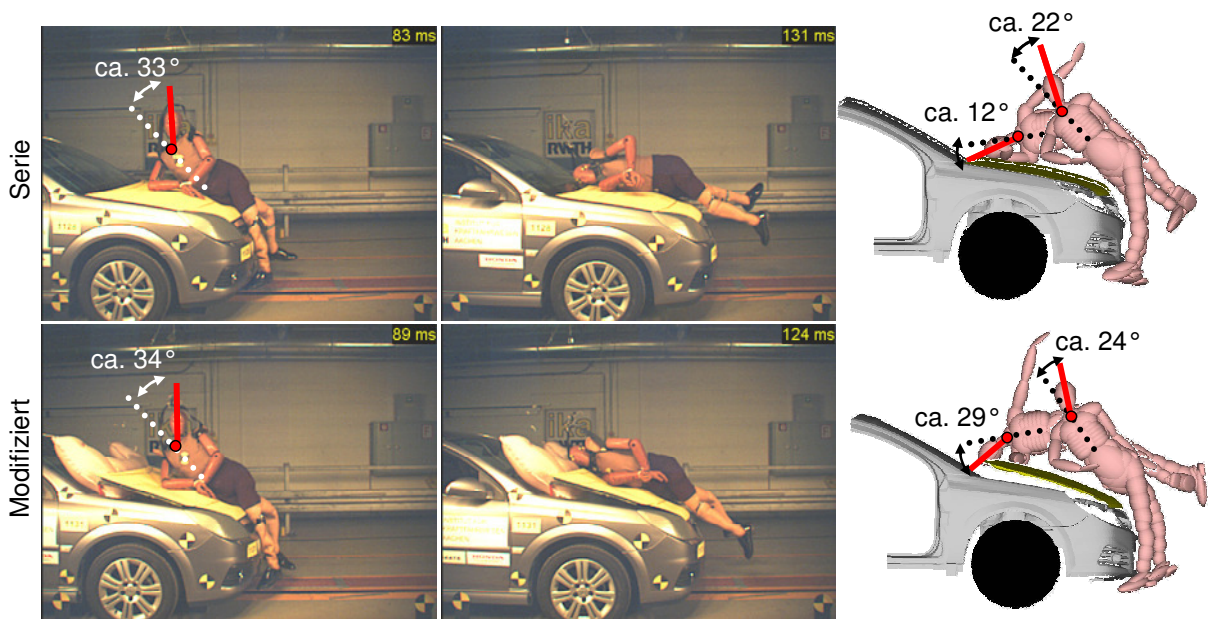


Abb. 5-60: Halsrotation Polar-II-Dummy und Fahrzeug-Fußgänger-Simulation

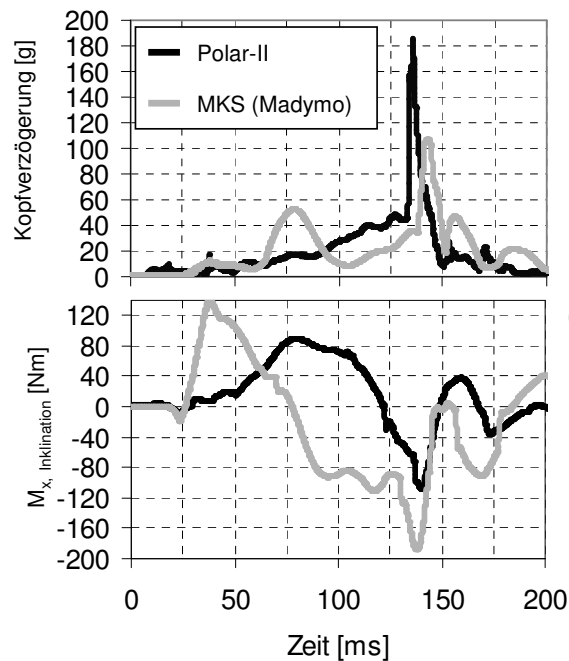


Abb. 5-61: Halsbelastungen Polar-II- und Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen

Die Trends aus den vereinfachten 3D-MKS-Simulationen stimmen mit den Absolutwerten der Dummytests überein und belegen Kopfbelastungen durch hohe Beschleunigung und Halsbelastung durch Momente. Weiterhin sind bei der Halsbelastung insbesondere hohe Zug- und Druckkräfte sowie Momente um die y-Achse zu verzeichnen. Im hybriden Testverfahren können anhand der Simulationen Trendaussagen zu den Winkeln am

Hals und zu den dadurch auftretenden Belastungen gemacht werden (vgl. Abb. 5-62).

Bei Annahme einer festen Lage des Momentenpols zwischen Schulter- und Kopfaufprall im globalen Koordinatensystem kann die Bewegung durch ein Pendel nach Abb. 5-63 und Abb. 5-65 mit einer reinen Rotation nachgestellt werden.

Der Kopfaufprall eines 50 %-Mannes in den Aufstellspalt der Haube ohne Airbagsystem gemäß Abb. 5-64 kann neben den erhöhten Halsrotationswinkeln bei der Pendelbewegung des Kopfes einen Kontakt mit der Haubenkante zur Folge haben. Bei einem derartigen Kontakt ist 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 Kräfteinleitungsfläche. Diese Druckbelastung kann bei Durchmessern der Kontaktfläche von unterhalb ca. 40 mm Eindringungsbrüche hervorrufen (vgl. APROSYS SP3, [MEL93] [WAL08a]).

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, als Ergänzung der existierenden linearen Impaktoren für den Kontakt an freien Kanten, insbesondere im Bereich des Öffnungsspalts von aktiven Hauben, sinnvoll. Entsprechende Untersuchungen sind Bestandteil des APROSYS-Projektes.

Tendenz	Kriterium	Erwachsenenmodell		Kindermodell		Bemerkung
		Trends	Absolut	Trends	Absolut	
Übereinstimmend	Kopfbewegung und Aufprallpunkt	ja	ja	ja	ja	Durch INRETS und Ishikawa geprüft
	Kopfaufprallwinkel	ja	nein	ja	nein	Visueller Vergleich
	Brusteindrückung	ja	nein	ja	nein	Validiert in Impaktortests
	Brustanprallwinkel	ja	ja	ja	nein	Durch INRETS geprüft
Abweichend	Kopfbeschleunigung	ja	nein	ja	nein	Überbewertung $\varnothing = +22\%$
	Kopfkontaktzeit	ja	ja	ja	ja	In diesem Projekt gezeigt (+5 %)
	Kopfaufprallgeschwindigkeit	ja	nein	ja	nein	Überbewertung $\varnothing = -20\%$
k. A.	HIC	ja	nein	ja	nein	Nur bei validiertem Modell

Abb. 5-62: Verwendbarkeit von Bewertungskriterien aus MKS-Simulationen [HAH06] [HOO03]

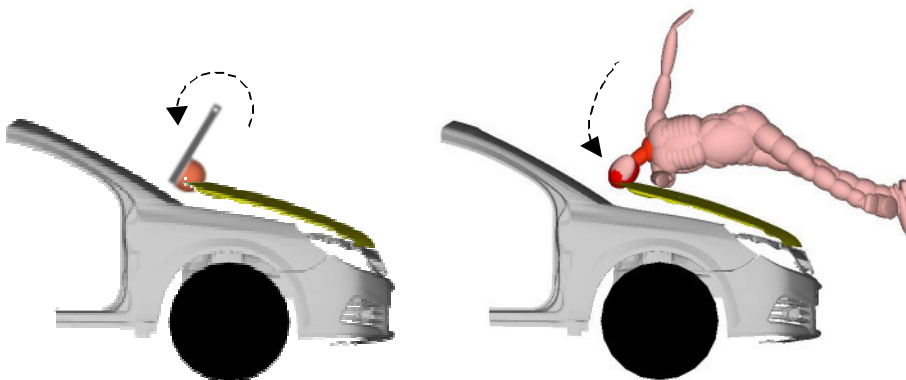


Abb. 5-63: Überlagerung der Rotationsbewegungen

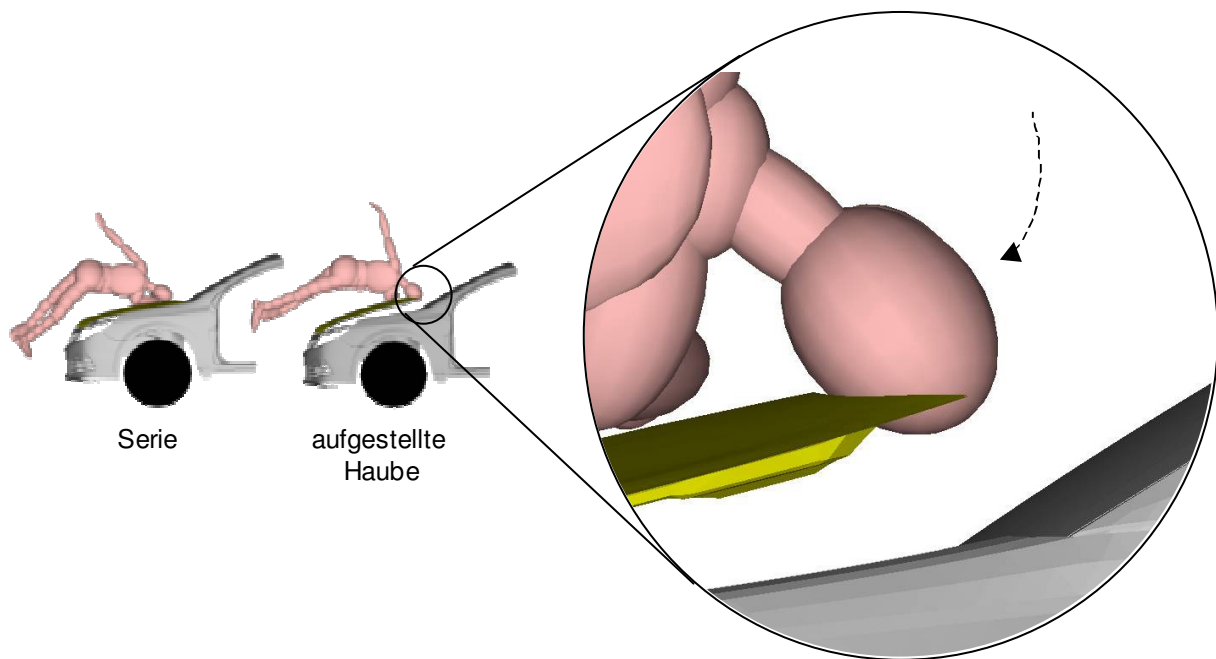


Abb. 5-64: Kopfaufprall 50 %-Mann mit und ohne aufgestellte Haube

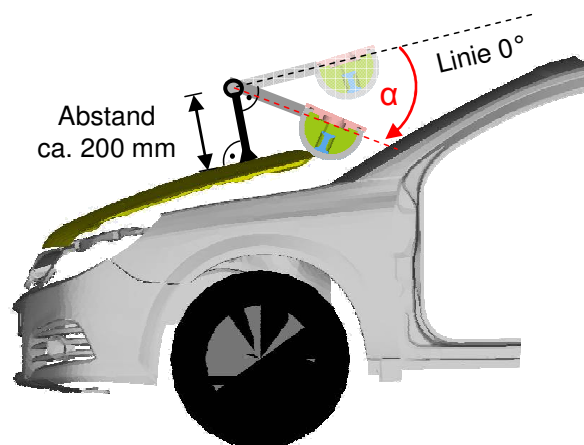


Abb. 5-65: Statische Bestimmung des Rotationswinkels (Abstand beim 50 %-Mann)

Zur Realisierung eines Tests zur Bestimmung des Halsrotationswinkels sowie zusätzlicher Belastungswerte wie z. B. rotatorische Beschleunigungen und Kontaktkräfte (vgl. APROSYS) im Realversuch kommen verschiedene Ansätze in Frage (vgl. Abb. 5-65 und Abb. 5-66): Zum einen kann eine Anpassung des existierenden ECE-R21-Insassenschutz-Prüfstands erfolgen [ECE07a]. Zum anderen kann die lineare Beschleunigungseinheit um ein Rotationselement ergänzt werden. Aktuelle Prüfstände kombinieren bereits die Möglichkeit zur Durchführung beider Versuche durch einen Aufsatz am Prüfstand. Ein weiterer Ansatz ist die Ergänzung eines Linear-Impaktors um das Halselement eines Dummies, um durch die zusätzliche exzentrische Masse eine Rotationsbewegung zu erzeugen.

Als Entscheidungsgrundlage, an welcher Aufprallposition und Fahrzeugregion in Zukunft welches Testverfahren eingesetzt wird, können die Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen aus dem Funktionstest (vgl. Abschnitt 5.4.2) und eine Analyse der Fahrzeugfront genutzt werden. Auf flächigen Strukturen sind die existierenden linearen Impaktoren geeignet. Am Haubenöffnungsspalt ist der zusätzliche Einsatz des Pendels zur Ermittlung des Rotationswinkels sowie der Kontaktkräfte sinnvoll.

Die gemessenen Winkel, Kräfte und Beschleunigungen lassen sich mit den Werten aus Abb. 5-57 vergleichen, die für den Menschen ertragbar sind. Bei Überschreitung der Grenzwerte muss dies in die Aussage über das Schutzpotenzial des zu testenden Fahrzeugs einbezogen werden.

<p>Existierender Kopfpendelprüfstand</p>		<p><u>Einsatzzweck:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • ECE-R21-Prüfstand • Insassenschutz <p><u>Messgröße:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Beschleunigung
<p>Modifizierte lineare Beschleunigungseinheit [BOV08] (aus: APROSYS)</p>		<p><u>Einsatzzweck:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Kantenkontakt • Fußgängerschutz <p><u>Messgrößen:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Rotationswinkel • Kontaktkraft • ggf. Beschleunigung
<p>Takata-Impaktor [KAL08] „Kopf-Hals-Impaktor“ (Erweiterter Linear-Impaktor) (aus: APROSYS)</p>		<p><u>Einsatzzweck:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Fußgängerschutz <p><u>Messgrößen:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Lineare Beschleunigung • Winkelbeschleunigung

Abb. 5-66: Komponententests zur Berücksichtigung der Halsrotation

5.5 Ablaufplan des Testverfahrens für den Frontscheibenbereich

Das hybride Testverfahren ist in Abb. 5-67 bis Abb. 5-69 zusammengefasst. Basis für die Tests bilden der Entwurf des GTR-Verfahrens sowie alle Erkenntnisse aus dem Vorprojekt. Das neue Testverfahren wird angewendet, wenn bei einem Fahrzeug (abhängig von der Abwickellänge des Fußgängers, Fußgängergrößen von c6 bis m95 im Rahmen dieses Projektes einbezogen) ein Kopfaufprall im Windlauf- oder Frontscheibenbereich zu erwarten ist. Voraussetzung ist die Verfügbarkeit eines Realfahrzeugs und geeigneter Simulationsmodelle.

Vorab müssen folgende Grundlagen zu diesem Testverfahren beachtet werden:

- Alle definierten Randbedingungen sind von einem Aufprallszenario mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 40 km/h abgeleitet.
- Fahrzeugbereiche, die nicht von diesem Testverfahren betroffen sind (z. B. Stoßfänger oder mittlerer Haubenbereich), werden gemäß GTR-Verfahren getestet.

Vorbedingung:

- Nachweis, dass das Fahrzeug relevant für den Kopfaufprall im Frontscheibenbereich ist (z. B. anhand Abwickellängen und Fahrzeuglänge bzw. -höhe)

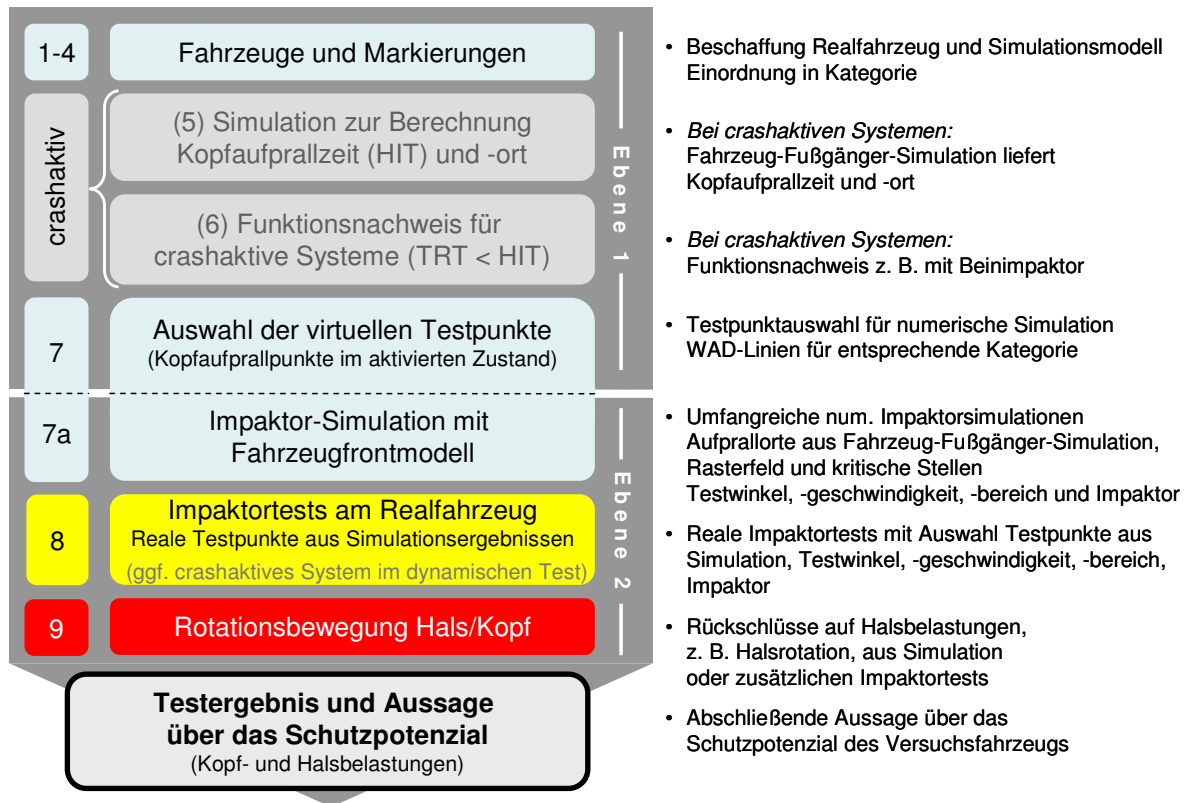


Abb. 5-67: Ablaufplan des Testverfahrens (I)

Anwendungsbereich:

- Alle M1-Fahrzeuge
- Alle M2- und N1-Fahrzeuge bis zu 3,5 t zulässige Gesamtmasse
- Ausnahmeregel: Fahrzeuge mit steiler Front:
 $D_{(R\text{-Point Fahrersitz - Frontachse})} < 1000 \text{ mm}$

Mit Hilfe der Fahrzeugparameter, Haubenwinkel und Höhe der Haubenvorderkante wird das Fahrzeug einer Kategorie zugeordnet (2, 3). Für die linearen Impaktortests sind Aufprallwinkel und -geschwindigkeit, Testbereiche, Impaktoren und der HIC-Grenzwert in Abb. 5-68 zusammengefasst. Ebene 1 beinhaltet die jeweils erforderlichen Vorbereitungen und Vortests wie z. B. die Markierungen (4) und Funktionsbedingungen (5, 6), so dass in Ebene 2 die für alle Systeme und Fahrzeuge definierten Tests in Versuch und Simulation durchgeführt werden können.

In der Bestimmung der Funktionsbedingungen werden anhand der Simulation verschiedener Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen (c6, f5, m50, m95) die Kopfaufprallzeiten und -positionen ermittelt. Die Kopfaufprallzeiten weisen bei crashaktiven Systemen die Funktionsbedingung Systemantwortzeit (TRT) < Kopfaufprallzeit (HIT) nach. Dabei muss gewährleistet sein, dass sich das System

beim Kopfaufprall in einer aktivierten Position, d. h. im Arbeitszustand, befindet. Der Funktionsnachweis für die Systemantwort kann durch einen Dummyversuch (Bestimmung von TRT und HIT möglich) oder anhand eines Beinimpaktorversuchs (nur TRT bestimmbar) erfolgen. Bei einem neuen, noch nicht im Versuch erprobten System ist die zusätzliche Durchführung eines Dummyversuchs für eine möglichst umfassende Untersuchung zur Auswirkung auf den Realunfall generell sinnvoll.

Alle Testpunkte aus dem Rasterfeld nach Abb. 10-8 werden am 3D-FE-Modell in virtuellen Komponententests hinsichtlich der HIC-Werte bei linearem Aufprall mit einer Geschwindigkeit von 35 km/h untersucht. Die unterschiedlichen Randbedingungen hinsichtlich der Abwickellängen und Aufprallwinkel innerhalb der Fahrzeugkategorien und Aufprallzonen (Windlauf, Frontscheibe) nach Abb. 5-68 nach werden dabei angewandt. Die so bestimmten kritischen Punkte mit hohen HIC-Werten werden daran anschließend in realen Komponententests überprüft. Bei einem crashaktiven System wird dabei der Airbag bzw. die aktive Haube dynamisch ausgelöst. Zur Validierung der Simulationen wird zudem auch ein Punkt mit geringem HIC-Wert getestet. Als Maß zur Beurteilung des Rückpralls bei einem Airbagsystem kann beispielsweise die Austrittsgeschwindigkeit des Im-

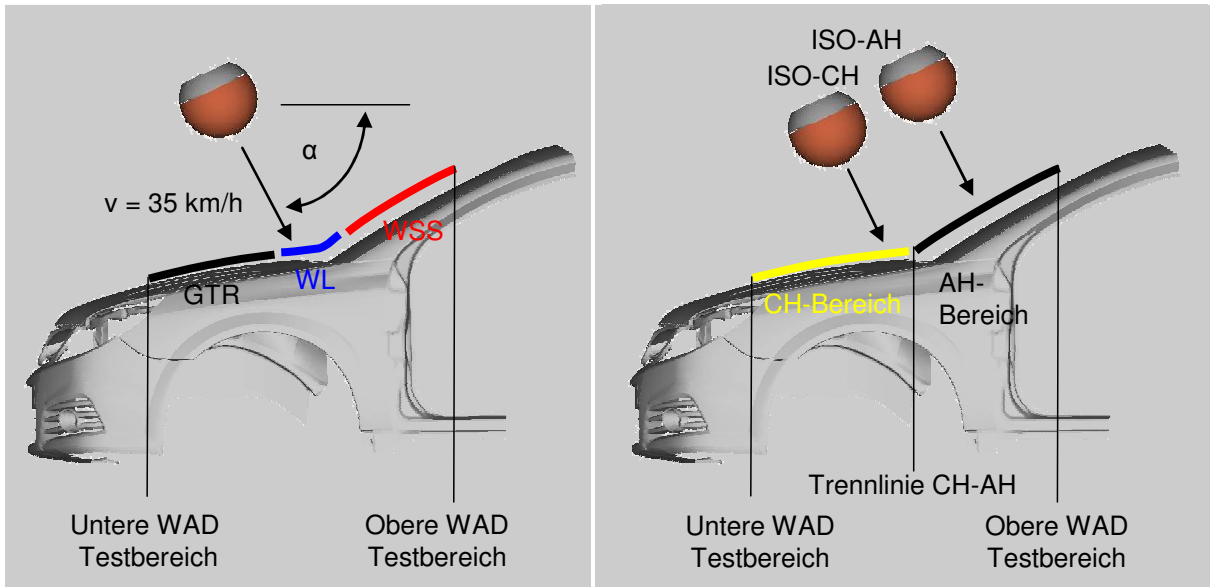
paktors genutzt werden. Sofern die Abprallgeschwindigkeit vom Fahrzeug hoch ist, kann die Wahrscheinlichkeit eines schwerwiegenden Sekundäraufpralls höher eingeschätzt werden. Ein Test zum Sekundäraufprall wird allerdings im Rahmen dieses Projektes nicht vorgeschlagen.

Zur Bewertung der Halsbelastungen werden im Rahmen dieses Projektes verschiedene Methoden vorgeschlagen. Zum einen können Trendwerte von Halsrotationswinkeln und -belastungen aus den Ergebnissen der Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen abgeleitet werden. Im Dummytest lassen sich zudem Absolutwerte der Halsbelastungen insbesondere bei crashaktiven Systemen ermitteln.

Zum anderen können die im APROSYS-Projekt vorgeschlagenen Impaktortests hinzugezogen werden, um Halsbelastungen und Kontaktkräfte zu

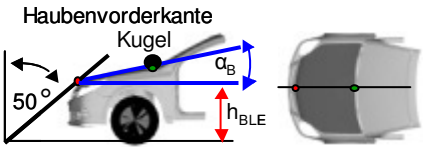
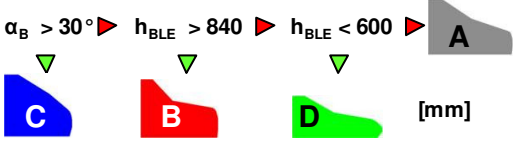
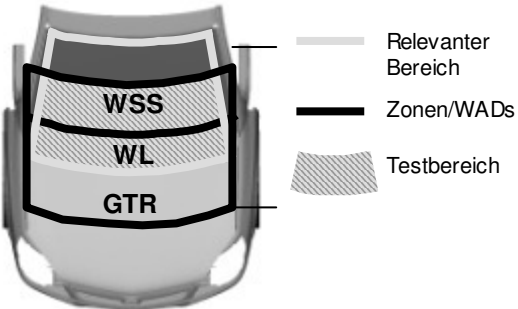
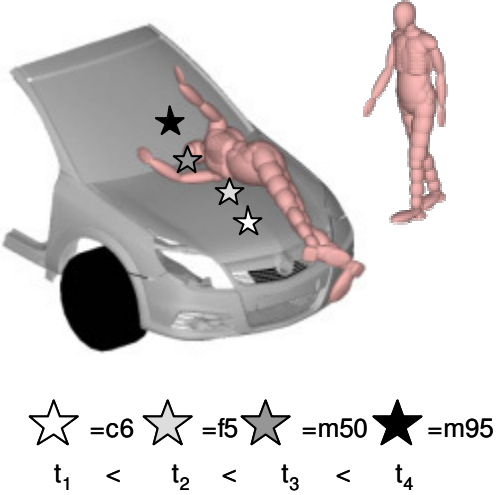
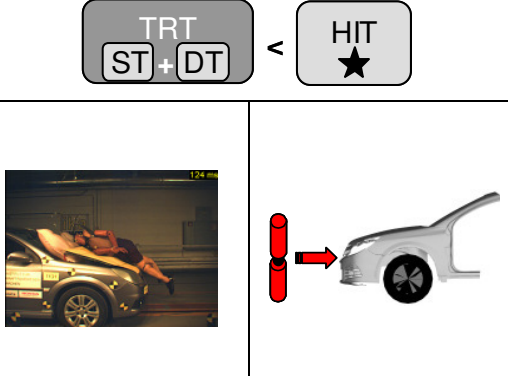
bewerten. Die Rotationswinkel am Hals sollten nach einer Abschätzung für mögliche Grenzwerte den statischen Anhaltswert von 40° nicht überschreiten. Bei Erreichen der maximalen Halsrotationswinkel wird bei dem dynamischen Lastfall von der gleichzeitigen Überschreitung der Grenzwerte für die Momente ausgegangen. Diese Anhaltswerte, die in dem vorliegenden Abschlussbericht aus den biomechanischen Betrachtungen abgeleitet worden sind, müssen in der Praxis weiter beobachtet und ggf. angepasst werden. Kräfte und Momente aus den Simulationen werden ohne mögliche Grenzwerte aufgeführt, da nur tendenzielle Aussagen und Vergleiche zu anderen Fahrzeugen möglich sind.

Nötige Definitionen und Beschreibungen hinsichtlich der allgemeinen Vorbereitungen am Fahrzeug werden der GTR entnommen.



	ISO-Impaktor	WAD [mm]		Impaktwinkel α [°]		Geschwindigkeit [km/h]	HIC	
		von	bis	Windlauf	WSS			
A Sedan	CH: 3,5 kg	1000	1700	65	50	35	1000	
	AH: 4,5 kg	1700	2300		-			
B SUV	CH	1000	1500		65			35/50
	AH	1500	2100		50			
C OneBox	CH	1000	1600		65			
	AH	1600	2100					
D Sportwagen	CH	1000	1900					
	AH	1900	2400					

Abb. 5-68: Randbedingungen für Komponententests (virtuell und real)

Schritt	Maßnahme <i>(inkl. Grenzwerte und Bedingungen)</i>	
Vorbereitung (zu Ebene 1)	1	Beschaffung der Fahrzeugmodelle: <ul style="list-style-type: none"> • Realfahrzeug (für Komponententests und ggf. Funktionsnachweis) • 3D-Simulationsmodelle
	2	Fahrzeugparameter: <ul style="list-style-type: none"> • Höhe Haubenvorderkante h_{BLE} • Haubenwinkel α_B 
	3	Kategorisierung: <ul style="list-style-type: none"> • Kategorie A (Sedan) • Kategorie B (SUV) • Kategorie C (OneBox) • Kategorie D (Sportwagen) 
	4	Markierungen der Testbereiche (im „nicht ausgelösten“ Zustand): <ol style="list-style-type: none"> (1) WAD-Zonen nach Kategorie (2) Bestimmung des relevanten WSS-Testbereichs (vgl. Anhang Abb. 10-6) (3) Überschneidung der Bereiche bildet Testbereich 
Ebene 1	5	<i>Falls Fahrzeug mit einem crashaktiven System ausgestattet:</i> Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen <ul style="list-style-type: none"> • 6-jähriges Kind • 5 %-Frau • 50 %-Mann • 95 %-Mann (v = 40 km/h, Dummy in Fahrzeugmitte, gehende Haltung, fahrzeugeitiges Bein hinten) <ul style="list-style-type: none"> • Kopfaufprallzeiten (HIT) [ms] • Kopfaufprallpositionen [mm] 
	6	<i>Falls Fahrzeug mit einem crashaktiven System ausgestattet:</i> Funktionsnachweis: <ul style="list-style-type: none"> • Dummyversuch • <u>oder</u> Beinimpaktortests und Fzg-FG-Simulationen <p>Bedingungen:</p> <ol style="list-style-type: none"> (1) Systemantwortzeit (TRT) < Kopfaufprallzeit (HIT) (2) System beim Kopfaufprall voll entfaltet 


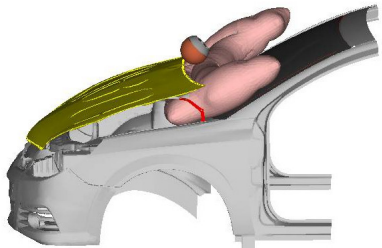
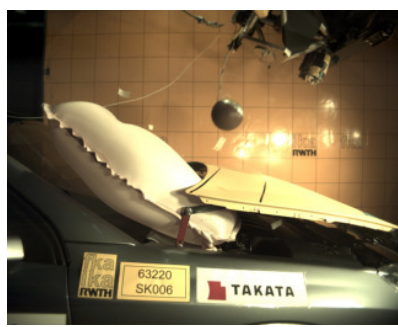
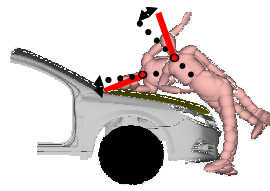

Schritt		Maßnahme	
Ebene 2	7	<p>Testpunkte für Impaktorsimulationen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Rasterfeld entsprechend Testbereichsdefinition (Anhang Abb. 10-8) • <u>Zusätzlicher Input:</u> Kopfaufprallpositionen aus Fzg.-FG-Simulationen • Erwartete kritische Stellen 	
	7a	<p>Lineare virtuelle Impaktortests:</p> <p>FE-Simulation Komponententests an allen ausgewählten Prüfpunkten (3D-FE-Modell) gemäß Randbedingungen (Winkel, Impaktor, Geschwindigkeit)</p> <p>Bestimmung aller HIC-Werte, inkl.:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Positionen maximaler HIC-Werte • Positionen geringster HIC-Werte 	
	8	<p>Lineare reale Impaktortests:</p> <p>Auswahl geeigneter Anzahl an Aufprallpositionen aus Simulation:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Positionen maximaler HIC-Werte • Position mit geringstem HIC-Wert <p>Grenzwert: $HIC < 1000$</p> <ul style="list-style-type: none"> • Systemverhalten (bei crashaktiv): z. B. Austrittsgeschwindigkeit für Rückstoßverhalten 	
	9	<p>Halsbelastungen (nur Beobachtung):</p> <p>Kinematikanalyse Halsbelastungen anhand Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tendenzen der Belastungswerte aus Simulation • Alternativ: Absolutwerte der Halsbelastungen aus Dummytest <p>Halsrotationswinkel ($< 40^\circ$)</p> <ul style="list-style-type: none"> • APROSYS-Komponententests 	 
10 Testergebnisse für Kopf- und Halsbelastungen			

Abb. 5-69: Ablaufplan des Testverfahrens (II)

6 Bewertung des hybriden Testverfahrens

Durch das modulare, hybride Testverfahren werden die Vorteile der einzelnen Methoden im Versuch und in der Simulation gezielt genutzt und kombiniert. Dabei wird das Schutzpotenzial des Frontscheibenbereiches von Fahrzeugen getestet und bewertet. Es kommen Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen und Impaktorsimulationen sowie reale Komponententests zum Einsatz. In diesem Kapitel wird das entwickelte Testverfahren mit dem durchgeführten Dummytest aus Kapitel 5 bewertend gegenübergestellt.

Mit dem Polar-II-Fußgängerdummy wird die Kinematik bei der Fahrzeug-Fußgänger-Kollision realistisch wiedergegeben. Das in der Simulation verwendete MKS-Fußgängermodell, das sog. „Human Model“, bildet den menschlichen Körper in direkter Weise nach und entspricht daher nicht einem üblichen Dummy. Beide Methoden liefern Ergebnisse, die einem Realunfall nahe kommen. Insbesondere die Gelenkcharakteristik der beiden Modelle ist unterschiedlich, was sich beispielsweise im Verhalten der Kniegelenke äußert.

Der Erstkontakt des Kopfes mit dem Fahrzeug im durchgeführten Dummyversuch beginnt ge-

mäß Abb. 6-1 bei der Serienversion bei 131 ms und bei Einsatz des Airbags bei 121 ms. Die Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen liefern bei Abweichungen von maximal ca. 9 % ähnliche Resultate. Die zeitliche Differenz von ca. 10 ms zwischen modifiziertem Fahrzeug und Serienfahrzeug durch die geometrische Veränderung der Fahrzeugfront ist bei allen Methoden annähernd übereinstimmend.

Die Gegenüberstellung des Verlaufs der Kopf-Flugbahn des Polar-II-Dummys bei aufgestellter Haube mit dem MKS-Fußgängermodell in Abb. 6-2 lässt einen Vergleich der Kopf-Trajektorien bis zum Kopfaufprall zu. Die Kinematiken von Dummy und Simulationsmodell weichen bei der reinen MKS-Simulation im Bereich der Hüfte voneinander ab, weil die Einleitung der Kontaktkraft im MKS-Modell zu einem Impuls führt, der die Hüfte vom Fahrzeug trennt. Der Dummy hingegen bleibt beim gesamten Primäraufprall am Fahrzeug angeschmiegt, ein Ablösen erfolgt erst nach dem Kopfaufprall. Dennoch bleibt die Flugbahn des Kopfes in beiden Fällen näherungsweise gleich. In der gekoppelten Simulation wird durch die Deformation am Fahrzeug ein realistischer Hüftanprall erzielt, wobei die Kopf-Flugbahn mit der des Polar-Dummys auch in diesem Fall annähernd übereinstimmt.

Kopfaufprallzeiten [ms]:	Polar-II-Dummy	Fzg.-FG-Simulation ^{*)}
Referenz (Serie)	131	140 (128)
Modifiziert	121	130 (120)

^{*)} Mehrkörpersystem (Gekoppelte FE-MKS Simulation)

Abb. 6-1: Kopfaufprallzeiten Polar-II-Dummy und Fahrzeug-Fußgänger-Simulation

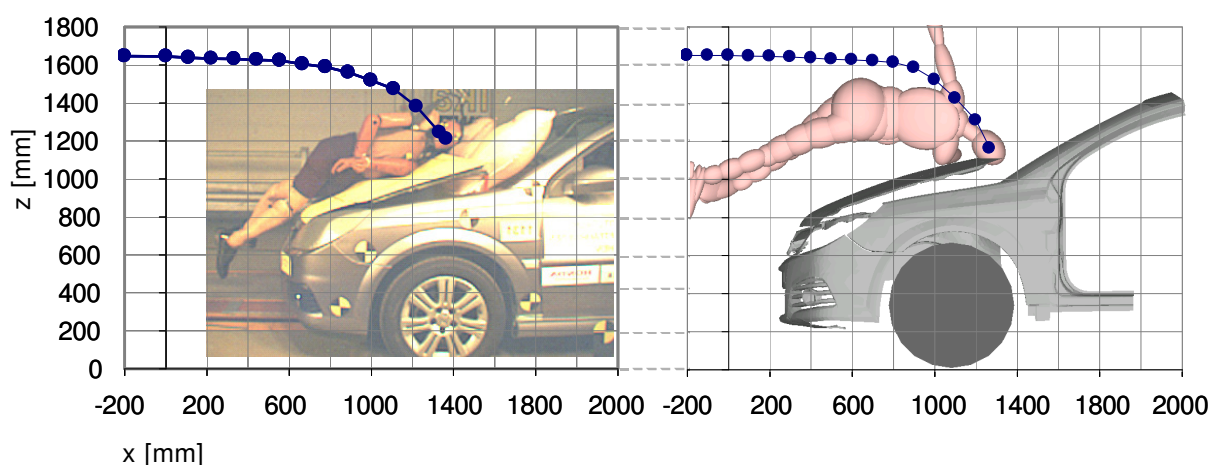


Abb. 6-2: Kinematik im Dummytest und in der Fahrzeug-Fußgänger-Simulation

Die Kopfaufprallpositionen an der Haubenhinterkante gemäß Abb. 6-3 korrelieren ebenfalls beim Dummyversuch und den Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen. Die Verwendbarkeit der Simulationen zur Untersuchung der Aufprallkinematik aus Abschnitt 3.2 wird für diesen Fall belegt. Das Verhältnis von Körpergröße und Abwickellänge zum Kopfaufprallort beträgt in beiden Methoden ca. 1,05 (Kategorie A mit dem 50 %-Mann).

Der Vorteil in der Simulation ist die erweiterte Simulationsmatrix (c6, f5, m50 und m95) bei verschiedenen Körperhaltungen und Schrittstellungen zum Funktionsnachweis eines crashaktiven Systems. Dies würde sich im Dummyversuch nur durch Erweiterung der Dummyfamilie, d. h. durch zusätzliche Dummies neben dem 50 %-Mann, realisieren lassen. Beim Funktionsnachweis sind verschiedene Fußgängergrößen aufgrund unterschiedlicher Aufprallzeiten und Aufprallorte erforderlich.

Die errechneten Ergebnisse der Belastungen aus den Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen lassen sich in der Tendenz nutzen, doch lassen sich mit dem numerischen MKS-Fußgängermodell derzeit keine realistischen Absolutwerte zuverlässig bestimmen [HAH06]. Bei dem Dummyversuch werden ähnlich wie beim Insassentest Messwerte aus allen Körperregionen ge-

wonnen und lassen direkt auf die einzelnen Belastungen schließen.

Komponententests lassen Aussagen über Belastungen in einzelnen Körperregionen zu, ohne deren Interaktion beispielsweise zwischen Kopf- und Halswirbelsäule zu betrachten. Im Rahmen des hybriden Testverfahrens werden FE-Impaktorsimulationen als virtuelle Tests und reale Komponententests durchgeführt. Die ermittelten HIC-Werte aus den virtuellen und realen Impaktortests in Abb. 6-4 lassen sich durch die abweichende Geschwindigkeit und die unterschiedliche effektive Masse des Kopfes nur eingeschränkt mit dem Dummyversuch vergleichen. Die Beschleunigungen und HIC-Werte liegen trotz dieser Einschränkungen auf einem ähnlichen Niveau, woraus sich bei übereinstimmendem Kopfaufprallort und damit identischer Struktursteifigkeit eine annähernd gleiche Kopfaufprallenergie zum Aufprallzeitpunkt ableiten lässt.

Der Dummytest ergibt für das Serienfahrzeug einen HIC-Wert von 1212 und für das modifizierte Fahrzeug mit Airbag reduzierte Kopfbelastungen bei einem HIC-Wert von 703. Die gemessenen HIC-Werte im realen Impaktortest liegen bei 1179 für die Serienversion und bei 591 mit Airbag. Die Reduktion des HIC-Werts von ca. 500 bis 600 zwischen den beiden Fahrzeugvarianten ist bei allen Methoden übereinstimmend.

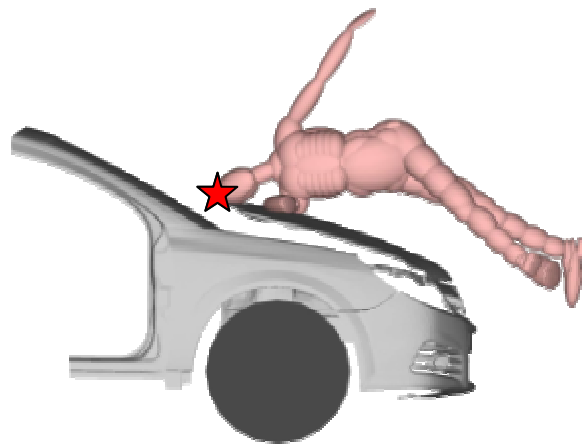
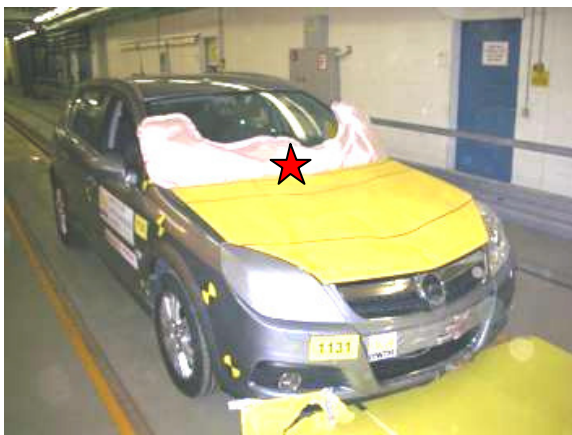


Abb. 6-3: Kopfaufprallposition

HIC-Werte	Polar-II-Dummy	FE-Impaktor	Impaktorversuch
Referenz (Serie)	1212	1076	1179
Modifiziert	703	558	591
v_{Kopf} [km/h]	≈ 35 - 40	40	40

Abb. 6-4: Ergebnisse der HIC-Belastungen

Der reale Impaktorversuch stellt bei dem Vergleich dieser Ergebnisse eine aussagekräftige Prüfung der Kopfbelastungen für den linearen, flächigen Aufprall dar. Virtuelle Komponententests am validierten Modell geben lineare Beschleunigungen und damit die HIC-Werte als eine sinnvolle Ergänzung zu realen Versuchen wieder.

Vergleichbar mit dem Dummyversuch und den validierten FE-Simulationen ist der reale Komponententest zur Bestimmung von absoluten Belastungswerten geeignet. Die FE-Impaktorsimulation und der Komponententest lassen sich sehr gut reproduzieren, da bei einer Versuchswiederholung die gleichen Parameter (Winkel, Geschwindigkeit, Aufprallort etc.) einstellbar sind. Es ergeben sich in der Regel höchstens gering voneinander abweichende Ergebnisse. Beim Dummyversuch entstehen mehr Freiheitsgrade, weil die Testbedingungen aufgrund äußerer Umgebungseinflüsse abweichen können.

Der nötige Aufwand zur Versuchsdurchführung ist in der FE-Impaktorsimulation und im Komponententest in der Regel geringer als beim Dummyversuch. Bei letzterem wird das Fahrzeug auf einer Teststrecke mit Absolutgeschwindigkeit bewegt. Beim Komponententest erfolgt der Aufprall mit der Relativgeschwindigkeit bei einem stehenden Versuchsfahrzeug. Der Aufwand für die FE-Impaktorsimulation besteht im Wesentlichen im Aufbau und in der Validierung des Simulationsmodells. Sofern ein FE-Modell verfügbar ist, lassen sich wie bei der Fahrzeug-Fußgänger-Simulation effektiv umfangreiche virtuelle Tests durchführen.

Die Kosten des Dummyversuchs sind relativ hoch, bedingt durch den Aufwand bei der Vorbereitung des Versuchsfahrzeugs und der Einrichtung und Positionierung von Dummy und Fahrzeug. Zudem entstehen Kosten durch Einbeziehung und Beschädigung der gesamten Fahrzeugfront und ggf. am Dummy. Bei der Durchführung von Komponententests sind die Kosten geringer, weil hier im Allgemeinen nur das geprüfte Bauteil beschädigt und deformiert wird. Da bei der FE-Impaktorsimulation sämtliche Bauteilbelastungen virtueller Art sind, lassen sich Materialkosten gegenüber den anderen Verfahren minimieren und die Anzahl der Prüfpunkte erhöhen.

Die Qualität der FE-Simulation hängt entscheidend von der Validierung des Modells ab. Die Ergebnisse des Komponententests im Versuch sind realitätsnah, und sie liefern Absolutwerte. Durch die zusätzlichen APROSYS-Komponen-

tentests für die Halsrotation wird dies noch verbessert [BOV09]. Die umfangreichsten auszuwertenden Ergebnisse erzielt der Dummytest, da die gesamte Fahrzeug-Fußgänger-Kollision im Realversuch abgebildet wird. Insbesondere die Interaktion aller Körperteile beim Dummy führt zu erweiterten Erkenntnissen über die Auswirkungen von Schutzsystemen.

Bei den generierten Daten liefert der Dummyversuch Kräfte und Momente für alle Körperregionen, wobei die erzeugbaren Datenmengen dabei sehr umfangreich und aussagekräftig sind. Insbesondere die Halsbelastungen können im Dummytest detailliert untersucht werden. In der FE-Impaktorsimulation und im Komponententest sind die generierbaren Daten bei der Aufnahme von Kopfbelastungen in Form von Beschleunigungsverläufen deutlich geringer.

Da die Halsbelastungen im Gegensatz zu den Kopfbelastungen fast ausschließlich aus der Interaktion der Körperteile Kopf und Torso beruhen, lassen sich diese nur unzureichend durch Komponententests abbilden. Daten über Halsbelastungen werden daher über die Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen gewonnen. Tendenzielle Aussagen können darin zu den Belastungen gemacht werden, wobei im Fall eines Airbagsystems ein Dummytest für die Betrachtung der Halsbelastung und deren Absolutwerte von Vorteil ist.

Als Kriterium für die Halsbelastung wird ein statischer Rotationswinkel vorgeschlagen, der im dynamischen Lastfall in der Regel zum Überschreiten der ertragbaren Halsbelastungen gemessen in Kräften und Momenten führt. Hier handelt es sich allerdings um eine Abschätzung auf Basis der Dummyergebnisse und Simulationen, die Verdrehwinkel von maximal ca. 34° aufwiesen. Dabei traten gleichzeitig Kräfte- und Momente auf, die deutlich oberhalb bzw. nahe an den ertragbaren Grenzen nach Abb. 5-57 lagen.

Über ergänzende APROSYS-Impaktortests aus [BOV09] können ebenfalls Rückschlüsse auf Halsrotationswinkel gezogen werden und zusätzliche Kriterien wie Winkelbeschleunigungen oder Kontaktkräfte aufgezeichnet werden. Auf diese Weise lässt sich durch Komponententests die reale Kinematik verbessert abbilden.

In der FE-Impaktorsimulation und im Komponententest sind beliebige Variationsmöglichkeiten hinsichtlich der Aufprallposition bei verschiedenen Abwickellängen vorhanden. Das Testen einzelner Körperkomponenten wirkt sich in die-

ser Hinsicht als Vorteil aus. Im Versuch und in der Simulation kann durch die Impaktoren jede beliebige potenziell kritische Stelle getestet werden, die beim Dummyversuch bedingt durch die Kinematik festgelegt ist. Sie wird von den übrigen Körperteilen entscheidend beeinflusst und hat somit Auswirkungen auf die Lage der Kopfaufprallposition.

In Abb. 6-5 und Abb. 6-6 sind die Vor- und Nachteile der verschiedenen Module des hybriden Testverfahrens dem Dummyversuch gegenübergestellt. Durch die Kombination der Mehrkörpersimulation mit der FE-Simulation und dem realen Komponententest ist es möglich, die jeweils gewünschten positiven Eigenschaften gemäß Abb. 6-6 zu nutzen.

Der Vergleich des Dummytests mit dem hybriden Testverfahren zeigt in Abb. 6-6, dass vor

allem in den Parametern Reproduzierbarkeit, Robustheit und Variationsmöglichkeit Vorteile des hybriden Testverfahrens entstehen. Durch die Verknüpfung zum hybriden Testverfahren ergeben sich bei der Bewertung allerdings auch einige Nachteile im Vergleich zu den einzelnen Testmethoden hinsichtlich des Aufwands, der Kosten und des entstehenden Datenumfangs. Der Aufwand und Umfang sowie die Datenmenge der einzelnen Verfahren werden sich in dem hybriden Verfahren addieren und daher zu einem Mehraufwand zu führen.


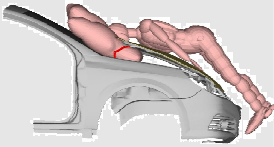
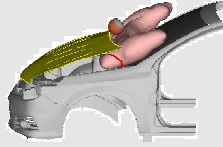

Verfahren	Dummytest	Bestandteile hybrides Testverfahren		
		Fzg.-FG-Simulationen	FE-Impaktorsimulation	Komponententest
Abbildung				
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Abbildung des realen Unfallgeschehens • Belastungsergebnisse für alle Körperteile • Absolutwerte für Kopf- und Halsbelastungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Berechnung von Kopfaufprallzeit und -ort für unterschiedliche Randbedingungen • Analyse der Kinematik und Halsbelastungen • Große Simulationsmatrix 	<ul style="list-style-type: none"> • Bestimmung kritischer Punkte • Virtuelle Tests verschiedener Aufprallorte • Strukturdeformationen abbilden 	<ul style="list-style-type: none"> • Wiederholbarkeit der Ergebnisse • Einfache Variation des Aufprallortes
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Versuchsaufbau aufwändig • Kopfaufprallort durch Dummykinematik bestimmt 	<ul style="list-style-type: none"> • Nur Trendwerte für Halsbelastungen • Keine Strukturdeformation in MKS 	<ul style="list-style-type: none"> • Komplexer Modellaufbau • Validierung des Modells nötig • Fehlende Interaktion der Körperteile 	<ul style="list-style-type: none"> • Fehlende Interaktion der Körperteile • Linearer Aufprall, nur HIC-Wert (bei existierendem Test)

Abb. 6-5: Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren

	Bewertung				Verknüpfung Hybrides Testverfahren
	Dummytest	Fzg.-FG- Simulation	FE-Simulation	Komponenten- test	
Reproduzier- barkeit	o	+	++	++	→ ++
Robustheit	+	o	+	++	→ ++
Aufwand	-	+	o	+	o
Kosten	-	+	+	o	o
Realitätsnähe	++	+	o	+	→ +
Datenumfang	++	+	-	-	o
Variations- möglichkeit	-	o	++	++	→ ++
Kinematik- analyse	++	+	-	-	→ +

++ sehr gut, + gut, o mittel, - schlecht

Abb. 6-6: Bewertung der verschiedenen Verfahren

7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes FE 82.308/2006 „Schutz von Fußgängern beim Scheibenanprall II“ wurde ein hybrides Testverfahren bestehend aus Versuch und Simulation ausgearbeitet, das den Bereich der Windschutzscheibe und dabei auch crashaktive Systeme wie Airbags berücksichtigt. Das im Vorprojekt FE 82.0229/2002 „Schutz von Fußgängern beim Scheibenaufprall“ erarbeitete Konzept für ein Testverfahren wurde dazu weiterentwickelt. Der Frontscheibenbereich weist eine hohe Relevanz im realen Unfallgeschehen auf, wurde aber bisher in bestehenden Verfahren nicht in ausreichendem Maße abgedeckt. Es lag kein ausgearbeitetes Testverfahren vor.

Das in diesem Abschlussbericht dokumentierte Testverfahren kombiniert reale Komponententests (aus Vorprojekt: Modul 1) mit einem Simulationsteil (Modul 2). Im Simulationsteil werden Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen und FE-Impaktorsimulationen durchgeführt. Als reale Testmethoden werden Komponententests und Dummyversuche angewendet.

Alle erarbeiteten virtuellen und realen Testmethoden wurden an einem Referenzfahrzeug (Opel Signum), welches repräsentativ für eine durchschnittliche Mittelklasselimousine steht, demonstriert.

Auf Grundlage der Ergebnisse und existierender Prüfverfahren wurden die bereits vorliegenden Kinematik-Untersuchungen aus dem Vorprojekt auf generische Fahrzeugfrontkonturen ausgedehnt. Dazu wurden verschiedene digitale Fahrzeugmodelle erstellt, um die Möglichkeiten der numerischen Simulation in einem Testverfahren zu untersuchen. Für Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen wurden 3D-Mehrkörpermodelle eingesetzt, in denen die Außenhaut der Fahrzeuge als Facette mit Kontaktcharakteristik enthalten ist. Ergänzt wurden diese durch 2D-Profile basierend auf den Fahrzeugvermessungen aus dem Vorprojekt, die verbreiterte Fahrzeugmittelflächen darstellen.

Um erweiterte Simulationsmethoden aufzuzeigen, wurde vom Referenzfahrzeug durch Re-engineering ein FE-Modell erstellt. Alle realen und virtuellen Methoden wurden am Referenzfahrzeug mit und ohne crashaktivem Airbagsystem angewendet. In Realversuchen wurden Dummyaufprallprüfungen und Komponententests durchgeführt. Im virtuellen Bereich wurden Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen sowie Impaktorsimulationen auf ihre Eignung zur Einbe-

ziehung in das Testverfahren untersucht. Der Dummyversuch wurde später ergänzend als Bewertungsgrundlage für das hybride Verfahren herangezogen.

Bei den allgemeinen Anforderungen an das Testverfahren wurde beispielsweise die Notwendigkeit einer robusten Auslegung hervorgehoben, die den Bestand des Verfahrens gegenüber jeglicher Art von Neuerungen und Änderungen am Produkt gewährleistet. Bei der Ausarbeitung dieses hybriden Testverfahrens wurde die internationale Harmonisierung von Prüfverfahren berücksichtigt. Hierzu wurde eine weitgehende Übernahme von Randbedingungen aus existierenden Verfahren angestrebt. Insbesondere die Bedingungen aus der Globalen Technischen Regelung (GTR) wurden berücksichtigt und genutzt. Der Anwendungsbereich der Fahrzeuge, die von diesem Testverfahren berücksichtigt werden sollen, wurde genauer beschrieben. Außerdem wurden Anforderungen an crashaktive Systeme, die nur im Kollisionsfall auslösen, erläutert, z. B. externe Airbags.

Die Fahrzeuge des Anwendungsbereiches wurden in vier verschiedene Fahrzeugkategorien entsprechend dem Vorprojekt eingeteilt. Diese lauten Sedan (Kategorie A), SUV (Kategorie B), OneBox (Kategorie C) und Sportwagen (Kategorie D). Hierzu wurde der Anwendungsbereich auf Fahrzeuge der Klassen M1 ohne Begrenzung der zulässigen Gesamtmasse, M2 und N1 erweitert. Eine Ausnahmeregelung betraf so genannte „Flat-Front-Vehicles“ und schließt diese aus dem Anwendungsbereich aus, da sie aufgrund ihrer Frontgeometrie in der Regel andere technische Lösungen benötigen, die in diesem Projekt nicht betrachtet wurden.

Die Randbedingungen für den Kopfaufprall stellten die Grundlage für das hybride Testverfahren dar. Nach einer Analyse und Erweiterung bestehender Ergebnisse wurden alle bei der Versuchsdurchführung relevanten Parameter abgeleitet und zusammengefasst. Dazu zählen Parameter, die die Kinematik des Fußgängers in einer Fahrzeug-Fußgänger-Kollision bestimmen und sich auf den existierenden Komponententest übertragen lassen. Dies sind insbesondere Aufprallwinkel und -geschwindigkeiten. Für die Aufprallwinkel des Impaktors wurde der Prüfbereich in eine Windlaufzone und eine Zone für den Windschutzscheibenbereich geteilt. Der Windlaufzone wurde für alle Fahrzeuge einheitlich ein Prüfwinkel von 65° zugeteilt. Zudem wurde jeder Fahrzeugkategorie für den gesam-

ten Bereich der Frontscheibe nur jeweils ein Prüfwinkel von 35° bis 65° zugeordnet. Als Prüfungsgeschwindigkeit wurden auf Basis der biomechanischen Belastungen gemäß der so genannten „S-Kurve“ der „AIS 3+“-Verletzungen und der resultierenden Strukturauslegung am Fahrzeug einheitlich 35 km/h ausgewählt. Auf diese Weise soll sichergestellt werden, dass die Anforderungen an die Strukturauslegung vergleichbar bleiben und gleichzeitig eine Anlehnung an das GTR-Verfahren realisiert wird. Die durchgeführten Simulationen bestätigen diese Definitionen hinsichtlich Winkel und Geschwindigkeit des Impaktors innerhalb der einzelnen Fahrzeugkategorien.

Weitere Randbedingungen sind die Prüfbereiche und Impaktoren für die einzelnen Fahrzeugkategorien, die auf Basis der Ergebnisse des Vorprojektes und der erweiterten Kinematik-Untersuchungen in diesem Projekt definiert und zusammengestellt wurden. Die Prüfbereiche wurden jeweils in Kinderkopf- und Erwachsenenkopfbereich mit Hilfe von Abwickellängen unterteilt und variieren zwischen den Fahrzeugkategorien. Der Übergang von Kinder- zu Erwachsenenkopfbereich liegt zwischen 1500 mm beim „SUV“ mit hoher Haubenkante und 1900 mm beim Sportwagen mit geringer Fronthöhe verteilt. Die entsprechenden oberen Grenzen des Prüfbereichs liegen bei 2100 mm und 2400 mm Abwickellänge (WAD). Für die Testdurchführung in diesen Aufprallbereichen wurden die ISO-Impaktoren ausgewählt. Dazu wurde ein HIC-Grenzwert von 1000 definiert, der bei der Fahrzeugprüfung im gesamten Prüfbereich eingehalten werden muss.

Zusätzlich wurde eine Funktionsbedingung für crashaktive Systeme einbezogen. Zur Erfüllung der Funktionsbedingung muss zum einen die Gesamtauslösezeit (Systemantwortzeit, TRT) geringer als die Kopfaufprallzeit (HIT) sein. Zum anderen muss sich das System in jedem Fall beim Kopfaufprall durch eine ausreichende Standzeit (mindestens ca. 200 bis 300 ms) in Arbeitsposition befinden, um bei einem möglichen späteren Kopfaufprall noch funktionsfähig zu sein.

Bei der Auslegung des Testverfahrens am Referenzfahrzeug unter Berücksichtigung von crashaktiven Systemen wurden durch Versuche mit dem Honda Polar-II-Dummy Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen mit und ohne Airbagsystem nachgestellt. Die Kopf- und Halsbelastungen wurden beim Aufprall maßgeblich beeinflusst. Der Einsatz des Airbags zeigte eine um etwa

42 % niedrigere HIC-Belastung auf den Dummykopf sowie eine Reduktion der Nackendruckkraft um 60 % und der Nackenmomente um 30 %. Die Dummytests wurden zur Bewertung des weiterentwickelten hybriden Testverfahrens herangezogen.

Das hybride Testverfahren vereint virtuelle und reale Testmethoden. In der Durchführung des Testverfahrens werden zunächst Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen simuliert. Durch diese virtuellen Tests werden die Kopfaufprallzeiten und -positionen ermittelt. Die Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen liefern Eingangsdaten für die Funktionsbedingung crashaktiver Systeme, für die Testpunktauswahl sowie für die später folgenden Bewertungen der Halsbelastungen. Für die Funktionsbedingung müssen zusätzliche Beinimpaktortests bzw. ein Dummytest durchgeführt werden, um die Funktion des Sensors am Fahrzeug sicherzustellen und die Systemantwortzeit zu ermitteln. Bei der Testpunktauswahl für die virtuellen Impaktortests wird ein Rasterfeld über den Prüfbereich gelegt, in dem die FE-Impaktorsimulationen durchgeführt werden. Dabei werden die Aufprallpositionen aus Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen sowie die zu erwartenden kritischen Stellen mit berücksichtigt.

Anschließend werden anhand dieser Ergebnisse aus dem virtuellen Teil die Testpunkte für die reale Durchführung von Komponententests ausgewählt. Durch das Hinzuziehen der Impaktorsimulation soll die Anzahl der realen Tests auf ein Minimum reduziert werden. Für die realen Komponententests wurde der HIC-Grenzwert $HIC = 1000$ auf Grundlage der sog. „S-Kurve“ definiert und die Prüfungsgeschwindigkeit von 35 km/h aus dem GTR-Verfahren übernommen.

Eine anschließende Untersuchung der Halsbelastungen wurde anhand der Ergebnisse aus den Fahrzeug-Fußgänger-Simulationen durchgeführt. Hierzu wurden relevante Belastungsgrenzen aus dem Vorprojekt aufgegriffen und erweitert. Es wurden biomechanisch tolerierbare Winkel, Kräfte und Momente für den Halsbereich zusammengestellt. Im Dummyversuch bzw. am Fußgängermodell lässt sich die Halsrotation bestehend aus globalen und lokalen Rotationsanteilen des Fußgängers ermitteln. Weiterhin können Trendwerte für die Belastungen herangezogen werden und mit den zulässigen Werten verglichen werden. Im Rahmen dieses Projektes wurde dazu ein Anhaltswert von maximal 40° für die dynamische Halsrotation vorgeschlagen.

Weitere Anhaltswerte können aus den aufgeführten Belastungsgrenzen abgeleitet werden.

Zudem wurden erweiterte Prüfmethode aus dem APROSYS-Projekt einbezogen, die die Untersuchung von Kopf- und Halsbelastungen in Zukunft verbessern können. Zum einen kann durch die Ermittlung von Kontaktkräften und Halsrotationswinkeln insbesondere der Einfluss von aufstehenden Haubenkanten bei aktiven Haubensystemen geprüft werden. Zum anderen kann durch eine exzentrische Masse an einem „Kopf-Hals“-Impaktor die rotatorische Beschleunigung mit einbezogen werden.

Darauf aufbauend wurden die Testmethoden vergleichend bewertet und deren Vor- und Nachteile aufgeführt. Der Dummyversuch diente hierbei als Bewertungsgrundlage, um die einzelnen Bestandteile des ausgearbeiteten modularen bzw. hybriden Prüfverfahrens beurteilen zu können. Durch den Dummytest wird das reale Unfallgeschehen realistisch abgebildet, und es können Absolutwerte für Belastungen aller Körperteile genutzt werden. Insbesondere wird hier die Interaktion von Kopf und Hals untersucht.

Das hybride Verfahren ermöglicht durch eine geeignete Verknüpfung die positiven Eigenschaften der einzelnen Testmethoden zu nutzen. Im virtuellen Teil des Testverfahrens wird die Fahrzeug-Fußgänger-Simulation zur Berechnung der Kopfaufprallzeit und -position genutzt und ermöglicht eine realistische Abbildung der Kinematik. In den Simulationen werden hinsichtlich Kopfbelastungen keine Absolutwerte errechnet, sondern die Ergebnisse für Kopfbelastungen liegen nur in der Tendenz vor. Im virtuellen Teil wird die FE-Impaktorsimulation zur Berechnung von Absolutwerten für Kopfbelastungen mit ausreichend validierten Modellen genutzt. Die Ergebnisse lassen sich direkt mit den realen Komponententests vergleichen. Die HIC-Werte aus dem FE-Impaktortest im virtuellen Teil des Testverfahrens und aus dem realen Komponententest im Versuchsteil wichen etwa 5 % bis 9 % voneinander ab. Aufgrund der fehlenden restlichen Körperteile lässt sich die Kinematik des Fußgängers in virtuellen und realen Impaktorversuchen jedoch nicht darstellen.

Innerhalb dieser Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass es neue Testmethoden unter Ausnutzung von Simulationen und Komponententests erlauben, realistischere Versuchsbedingungen unter Berücksichtigung von potenziellen Kopfaufprallpositionen und -zeiten zu definieren.

Dabei konnten sehr gute Übereinstimmungen zwischen Fußgängersimulation und Dummyversuch erreicht werden. Die Randbedingungen für den Kopfaufprall und die Aufprallzeit wurden durch den Einsatz von Fußgängermodellen ermittelt. Weiterhin ermöglichen die Simulationen zusätzliche Einflussdaten wie Vektoren mit den Kopfaufprallgeschwindigkeiten und -winkeln zu bestimmen.

Diese Ergebnisse wurden ebenfalls genutzt, um das Schutzpotenzial von crashaktiven Sicherheitssystemen wie Airbags an möglichen zukünftigen Fahrzeugfrontstrukturen zu untersuchen. Dabei zielen die Ergebnisse nicht auf ein Sensorsystem ab, das für eine Serienausführung des vorgestellten crashaktiven Systems notwendig ist und aufgrund der Gefahr von Fehlauslösungen eine weitere sehr hohe Herausforderung darstellt. Ein möglicher Rückstoßeffekt, der negative Auswirkungen auf den Sekundäraufprall haben kann, muss bei der Auslegung eines derartigen Systems vermieden werden. Es konnte herausgestellt werden, dass hochentwickelte Sicherheitssysteme mit integrierten Airbags ein sehr gutes Schutzpotenzial für Fußgänger beim Kopfaufprall im relevanten Rahmenbereich der Frontscheibe aufweisen.

Insgesamt stellt das hybride Testverfahren mit einer Verknüpfung von Versuch und Simulation eine machbare Lösung für einen verbesserten Fußgängerschutz dar. Im Vergleich zu bereits bestehenden Methoden führt bei diesem Verfahren der damit verbundene Mehraufwand zu einer Effizienzsteigerung, indem die Unfallrealität genauer abgebildet wird. Es werden sowohl Kopf- als auch Halsverletzungen beim Aufprall im Frontscheibenbereich einbezogen.

Es besteht noch Forschungsbedarf beim Testen von Sensoren, die den Fußgängeraufprall durch Kontakt erkennen. Dafür ist die Entwicklung bzw. Bewertung von neuen Beinimpaktoren notwendig, um tatsächliches, menschliches Verhalten realistisch abbilden zu können. Diese Anforderungen werden derzeit beispielsweise von dem EEVC WG17 Beinimpaktor durch zu hohe Punktlasten und lediglich zwei starren Gliedern für das gesamte Bein möglicherweise nur unzureichend erfüllt.

Im Anschluss an diesem Forschungsprojekt hat eine Expertenbefragung stattgefunden, dessen Ergebnisse sowie eine weitere Stellungnahme des VDA sich im Anhang Abschnitt 10.8 befinden.

8 Formelzeichen und Abkürzungen

8.1 Formelzeichen und Indizes

α_B	globaler Haubenwinkel [°]
α_{BS}	Haubenwinkel Sekante [°]
α_{BT}	Haubenwinkel Tangente [°]
$\alpha_{E_{max}}$	Extensionswinkel [°]
$\alpha_{F_{max}}$	Flexionswinkel [°]
α_{Inkl}	Inklinationswinkel [°]
α_{Rot}	Rotationswinkel [°]
Δt_{DT}	Aufstellzeit
Δt_{HIT}	Kopfaufprallzeit, Beinkontakt bis Kopfkontakt
Δt_{ST}	Sensierzeit
Δt_{TRT}	Systemantwortzeit, gesamte Reaktionszeit des aktiven Systems
h_C	Fahrzeughöhe [mm]
h_{BLE}	Höhe der Haubenvorderkante [mm]
h_F	Fahrzeugseitiger Stoßpunkt [mm]
h_{SP}	Höhe Schwerpunkt Fußgänger [mm]
h_{FG}	Körpergröße des Fußgängers [mm]
m_F	Gesamtmasse des Fahrzeugs [kg]
$\dot{t}_{Kopfaufprall, min}$	Minimale Kopfaufprallzeit (geringste HIT) bei Funktionstest
$\dot{t}_{Kopfaufprall, max}$	Maximale Kopfaufprallzeit (höchste HIT) bei Funktionstest
v	Geschwindigkeit [km/h]
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit [km/h]

8.2 Abkürzungen

ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles (Europäischer Automobilherstellerverband)
AH	Adult Head (Erwachsenenkopf)
AIS	Abbreviated Injury Scale
ANCAP	Australasian New Car Assessment Program
APROSYS	Integrated Project on Advanced Protection Systems
BAS	Bremsassistentensystem
BLE	Bonnet Leading Edge
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BRL	Bonnet Rear Reference Line (auch: BRRL)
c6	6-jähriges Kind
CAD	Computer Aided Design
CFC	Channel Frequency Class
CH	Child Head (Kinderkopf)
D	Abstand zwischen SgRP und Vorderachse
DT	Deployment Time (Aufstellzeit)
ECE	Economic Commission for Europe (auch: UNECE)
EEVC	European Enhanced Vehicle Safety Committee (früher: European Experimental Vehicles Committee)
ESV	Enhanced Safety of Vehicles (früher: Experimental Safety Vehicles)
Euro NCAP	European New Car Assessment Programme
f5	5 %-Frau, Frau deren Körpergröße und Masse von 5 % der weiblichen Bevölkerung unterschritten wird
FE	Finite Elemente
FG	Fußgänger
FlexPLI	Flexible Pedestrian Legform Impactor (Flexibler Beinprüfkörper)
fps	Frames per second (Bilder pro Sekunde)
Fzg.	Fahrzeug
GTR	Globale Technische Regelung (Global Technical Regulation)
HIC	Head Injury Criterion
HIT	Head Impact Time (Kopfaufprallzeit)
HPC	Head Performance Criterion
IHRA	International Harmonized Research Activities
ISO	International Organization for Standardization
J-MLIT	Japan Ministry of Land, Infrastructure and Transport
JAMA	Japan Automobile Manufacturers Association, Inc.
JARI	Japan Automobile Research Institute

JNCAP	Japan New Car Assessment Programme
m50	50 %-Mann, Mann dessen Körpergröße und Masse von 50 % der männlichen Bevölkerung über- und unterschritten wird
m95	95 %-Mann, Mann dessen Körpergröße und Masse von 95 % der männlichen Bevölkerung unterschritten wird
MB	Multi-body
MKS	Mehrkörpersystem (= MB)
SAE	Society of Automotive Engineers
SgRP	Seating Reference Point
SRL	Seitliche Referenzlinien (Side Reference Line)
ST	Sensor Time (Sensierzeit)
TRT	Total Response Time (Gesamtauslöse- bzw. Systemantwortzeit)
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.
WAD	Wrap Around Distance, Abwickellänge
WAD _{FG}	Aufwurfweite (Abwickellänge) des Fußgängers am Fahrzeug
WAD _{HK}	Fahrzeugseitige Abwickellänge bis zur Haubenhinterkante
WAD ₁	Abwickellänge für den Beginn des Kinderkopfaufprallbereichs
WAD ₂	Abwickellänge für den Übergang zwischen Kinderkopf- und Erwachsenenaufprallbereich
WAD ₃	Abwickellänge die obere Grenze des Erwachsenenkopfaufprallbereichs
WL	Windlauf (hintere Haubenkante)
WSS	Windschutzscheibe
zGM	zulässige Gesamtmasse

9 Literatur

- [ANC08] N.N.
Australasian New Car Assessment Program (ANCAP)
www.ancap.com.au
September 2008
- [ACE01] N.N.
European Automobile Manufacturers Association (ACEA)
ACEA Commitment Relating to the Protection of Pedestrians and Cyclists
Verpflichtung des Europäischen Automobilverbandes ACEA im Auftrag seiner Mitgliedsfirmen BMW, DaimlerChrysler, Fiat, Ford, General Motors, Porsche, PSA Peugeot Citroën, Renault und Volkswagen
www.acea.be, Brüssel, 2001
- [BAC05] BACHEM, H.
Schutzpotenzial von realisierbaren Lösungen zum fahrzeugseitigen Fußgängerschutz
Schriftenreihe Automobiltechnik
Dissertation am Institut für Kraftfahrzeugwesen Aachen, RWTH Aachen, 2005
- [BEA07] BEAUDET, B.; WU, J.
Optimization of Head Impact Waveform to Minimize HIC
SAE International Document SP-2114 Pedestrian Safety
DaimlerChrysler Corporation
www.sae.org, USA, 2007
- [BER00] BERG, F. A.; SCHMITT, B.; WEISS, S.; HÖFER, V.
Fußgängerschutz bei Kompaktfahrzeugen
Abschlussbericht Forschungsprojekt FE 82.079/1995
BAST-Forschungsbericht, Bergisch Gladbach, 2000
- [BLU05] N.N.
Test procedure for head protection of pedestrians
Automobile Type Approval Handbook for Japanese Certification ("Blue Book") mit den Ergänzungen in TRIAS 63
Japan, 2005
- [BOV06] BOVENKERK, J.; LORENZ, B.; ZANDER, O.
1. Expertenhearing – Entwicklung eines Prüfverfahrens für den Windschutzscheibenbereich (Forschungsprojekt FE 82.0229/2002)
BAST, Bergisch Gladbach, 4. Dezember 2006
- [BOV07] BOVENKERK, J.
Fußgängerschutz: Entwicklung von Schutzsystemen für die Fahrzeugfront
mobiles 33 - Fachzeitschrift für Konstrukteure
Redaktion mobiles, Hamburg, 2007
- [BOV08] 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 2008
- [BOV08a] BOVENKERK, J.; SAHR, C.; ZANDER O.; KALLISKE, I.; PORSTMANN, M.; TAKAHASHI, Y.; AKIYAMA, A.
Möglichkeiten zum realitätsnahen Fußgängerschutz unter Verwendung des Polar-II-Fußgänger-Dummies
Praxiskonferenz Fußgängerschutz, carhs.training / BGS Böhme & Gehring, Bergisch Gladbach, 2008
- [BOV09] BOVENKERK, J.; KALLISKE, I.
APROSYS SP3
New and Improved Test Methods to Address Head Impacts
Deliverable D3.3.3.C, Report Nr. AP-SP31-021R
Brüssel, 2009
- [CAR05] CARTER, E. L.; NEAL-STURGESS, C. E.
APROSYS SP3
Analysis of the in-depth database of real-world pedestrian and cyclist accident cases
Deliverable D3.1.3, Report Nr. AP-SP31-006R
Brüssel, 2005

- [CAR08] N.N.
CARE Reports and graphics
Road fatalities in EU: 2006
ec.europa.eu/transport/roadsafety_library/care/doc/annual_statistics/
European Commission, April 2008
- [ECE05] N.N.
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
- [ECE07] N.N.
Proposal for a draft global technical regulation on pedestrian safety
World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations
Working Document
ECE/TRANS/WP.29/2007/94
UNECE, Genf, 23. Juli 2007
- [ECE07a] N.N.
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
- [EEV94] N.N.
EUROPEAN ENHANCED VEHICLE-SAFETY COMMITTEE (EEVC)
EEVC Working Group 10 Report – Proposals for methods to evaluate pedestrian protection for passenger cars
1994
- [EEV03] N.N.
EUROPEAN ENHANCED VEHICLE-SAFETY COMMITTEE (EEVC)
EEVC Working Group 17 Report - Improved Test Methods To Evaluate Pedestrian Protection Afforded By Passenger Cars (December 1998 with September 2002 updates)
Mai 2003
- [EGR70] N.N.
70/156/EWG
Richtlinie 70/156/EWG des Rates vom 6. Februar 1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Betriebserlaubnis für Kraftfahrzeuge und Kraftfahrzeuganhänger
1970
- [EGR03] N.N.
2003/102/EG
Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. November 2003 zum Schutz von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern vor und bei Kollisionen mit Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates
2003
- [EGR04] N.N.
2004/90/EC
Entscheidung der Kommission vom 23. Dezember 2003 über die technischen Vorschriften zur Ausführung von Artikel 3 der Richtlinie 2003/102/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zum Schutz von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern vor und bei Kollisionen mit Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG
Brüssel, Februar 2004

- [EGR05] N.N.
2005/66/EC
Richtlinie 2005/66/EC des Europäischen Parlaments und des Rates vom
26. Oktober 2005 über die Verwendung von Frontschutzsystemen an Fahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates Oktober 2005
- [EUP07] N.N.
EUROPÄISCHE KOMMISSION
Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on the Protection of Pedestrians and other Vulnerable road users
COM(2007)560 Final
Brüssel, Oktober 2007
- [EUP08] N.N.
EUROPÄISCHES PARLAMENT
Schutz von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern
Dokument A6-0081/2008 - Entwurf einer legislativen Entschließung des Europäischen Parlaments
www.europarl.europa.eu
Brüssel, März 2008
- [EUR07] N.N.
EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME (Euro NCAP)
Draft procedure for assessing the protection provided by deployable protection devices, Version 1.2
Brüssel, September 2007
- [EUR08] N.N.
EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME (Euro NCAP)
Pedestrian Testing Protocol Version 4.2
www.euroncap.com
Brüssel, Juni 2008
- [HAH06] HAHN, W.
Fußgängerschutz: Entwicklungswerkzeuge – biomechanische Bewertung und Anwendung
Tagungsunterlagen zur Praxiskonferenz Fußgängerschutz
Bergisch Gladbach, 2006
- [HEF06] HEFTI, F.
Kinderorthopädie in der Praxis
Springer-Verlag, Berlin, März 2006
- [HON04] N.N.
Honda R&D Americas, Inc.
Polar-II Testing Protocol, 2004
- [HON08] N.N.
Internetpräsenz
Polar-II-Dummy
www.honda.de, 2008
- [HOO03] VAN HOOFF, J.; DE LANGE, R.; WISMANS, J.
Improving pedestrian safety using numerical human models
Stapp Car Crash Journal, Vol. 47, Oktober 2003
- [ISO03] N.N.
Pedestrian impact test procedure
International Organization for Standardization, Genf, 2003
- [JNC08] N.N.
Japan New Car Assessment Programme (JNCAP)
www.jafmate.co.jp/anzen/ncap/
August 2008
- [JAM04] N.N.
Design of JAMA-JARI Pedestrian Headform Impactor
Informal document INF/GR/PS/93
JAMA, JARI, 2004
- [KAL08] KALLISKE, I; FERNANDEZ, J.
Session 2: Head Impact Test Methods – Head-Neck Testing
APROSYS SP3, Pedestrian and Pedal Cyclists, Workshop on initial concepts for new or improved vulnerable road user test methods
Brüssel, 2008
- [KAL08a] KALLISKE, I.
TAKATA PETRI, Performance Requirements Airbag Systems
APROSYS SP3 WP3.4 Technical Meeting
Aachen, Januar 2008

- [KAN98] KANIANTHRA, J. N.
International Harmonization of Research: Countries working together for higher levels of safety in passenger vehicles, Dokument Nr.: 982268
www.sae.org/technical/papers/982268
SAE International, September 1998
- [KBA07] N.N.
Fahrzeugzulassungen – Neuzulassungen
www.kba.de
Kraftfahrt-Bundesamt, Flensburg, Januar 2007
- [KIN08] KINSKY, T.
Aktuelle Diskussionen zum Thema Fußgängerschutz
General Motors Europe Engineering, Adam Opel GmbH
Konferenz „SafetyUpdate2008“, Aschaffenburg, April 2008
- [KRA06] KRAMER, F.
Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen
Vieweg+Teubner-Verlag, Mai 2006
- [KÜH07] KÜHN, M.; FRÖMING, R.; SCHINDLER, V.
Fußgängerschutz
Unfallgeschehen, Fahrzeuggestaltung, Testverfahren
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007
- [LAW05] LAWRENCE, G. J. L.
Assessment of the FTSS 4.5 kg aluminium headform as a possible alternative for EEVC WG17
Published project report PPR052/S222C/VF
TRL, Juli 2005
- [LAW06] 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
- [LES07] LESSMANN, P.
Bewertung der Prüfkörperergebnisse
BGS Böhme & Gehring
Bergisch Gladbach, Praxiskonferenz Fußgängerschutz, 2007
- [LOR08] LORENZ, B.
Grundlagen und aktueller Stand der internationalen Vorschriften
Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
Bergisch Gladbach, Praxiskonferenz Fußgängerschutz, Juni 2008
- [MAR06] MARTINEZ, L.; GUERRA, L. J.; FERICHOLA, G.; GARCIA, A.; YANG, J.; YAO, J.
APROSYS SP3
Stiffness Corridors for the Current European Fleet
Deliverable D3.1.2.B, Report Nr. AP-SP31-009R
Brüssel, 2006
- [MEL93] MELVIN, J. W.; EVANS, F. G.
A strain energy approach to the mechanics of skull fracture
The University of Michigan, USA, 1993
- [MER71] MERTZ, H. J.; PATRICK, L. M.
Strength and response of the human neck
SAE Paper No. 710855
Proceedings 15th Stapp Car Crash Conference, 1971
- [MIZ03] MIZUNO, Y.
Summary of IHRA pedestrian safety WG activities – proposed test methods to evaluate pedestrian protection afforded by passenger cars
18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Proceedings (19 May - 22 May 2003, Nagoya Japan)
- [MOU08] MOUSEL, T.
IEE S.A. LUXEMBOURG
Lower limit Impactor
Juni 2008

- [NAS08] N.N.
National Agency for Automotive Safety & Victims Aid (NASVA)
Pedestrians Head protection performance tests
www.nasva.go.jp
Januar 2008
- [TAK07] TAKAHASHI, Y.; AKIYAMA, A.; OKAMOTO, M.
Honda R&D Co., Ltd., Japan
Polar-II Pedestrian Dummy
1. VKU Konferenz Fußgängerunfälle und Fußgängerschutz, Aachen 2007
- [NHT08] N.N.
National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)
Consumer Information; New Car Assessment Program
www.nhtsa.gov
NHTSA, Juli 2008
- [TRL08] N.N.
Transport Research Laboratory (TRL)
TRL SensorLeg™
www.trl.co.uk/sensorleg, 2008
- [PUP08] PUPPINI, R.
Integration of virtual testing in regulatory procedures
APROSYS 2nd Virtual Testing Workshop Helmond
Centro Ricerche Fiat (CRF), Januar 2008
- [WAL07] WALLENTOWITZ, H.; BOVENKERK, J.
Institut für Kraftfahrwesen RWTH Aachen
Abschlussbericht Forschungsprojekt FE 82.229/2002
Schutz von Fußgängern beim Scheibenaufprall
BAST-Forschungsbericht, Bergisch Gladbach, 2007
- [SAE07] N.N.
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
- [WAL08] WALLENTOWITZ, H.; BOVENKERK, J.; SAHR, C.; KALLISKE, I.; PORSTMANN, M.; ZANDER, O.
Institut für Kraftfahrwesen RWTH Aachen; TAKATA-PETRI, Berlin; Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Bergisch Gladbach
Challenge and approach to real-world pedestrian protection – investigated by Polar-II Pedestrian Dummy (Paper No. 2008-057)
ICrash International Crashworthiness Conference Kyoto, Juli 2008
- [SEI07] SEIFFERT, U.; WECH, L.
Automotive Safety Handbook – Second Edition
SAE International, Warrendale, 2007
- [WAL08a] WALLENTOWITZ, H.; BOVENKERK, J.
Institut für Kraftfahrwesen Aachen
New Protection Systems and related Testing Methods for Head Impact of Pedestrians (Paper No. F2008-08-072)
FISITA2008 World Automotive Congress, München, 14.-19.09.2008
- [STA08] N.N.
BUNDESAMT FÜR STATISTIK
Internetauftritt des Bundesamt für Statistik
www.destatis.de/themen/d/thm_verkehr.php
August 2008

10 Anhang

10.1 Definitionen

10.1.1 Definition der Ausnahmeregelung für „FlatFront-Vehicles“

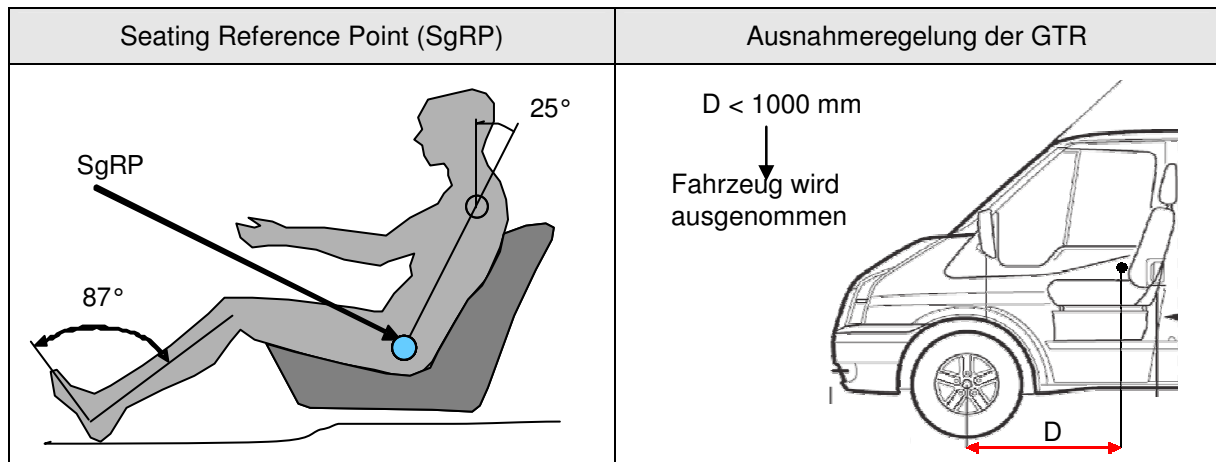


Abb. 10-1: Definition der Ausnahmeregelung für „FlatFront-Vehicles“

10.1.2 Vereinfachung der Prüfwinkel

Kategorie A

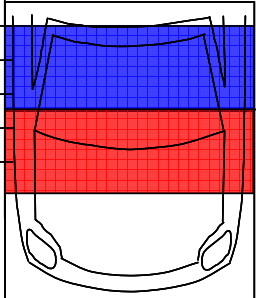
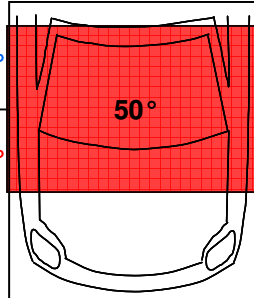
Winkel aus Vorprojekt:	GTR	Simulationswerte	„Worst Case“ Winkel	Vorschlag Winkel:	
Obere Zone 40°		52°	48°		
Mittlere Zone 50°	65°				
Untere Zone 55°		53°	57°		
Windlauf 60°	50°	89°	66°		

Abb. 10-2: Vereinfachung der Prüfwinkel am Beispiel Kategorie A

Kategorie B

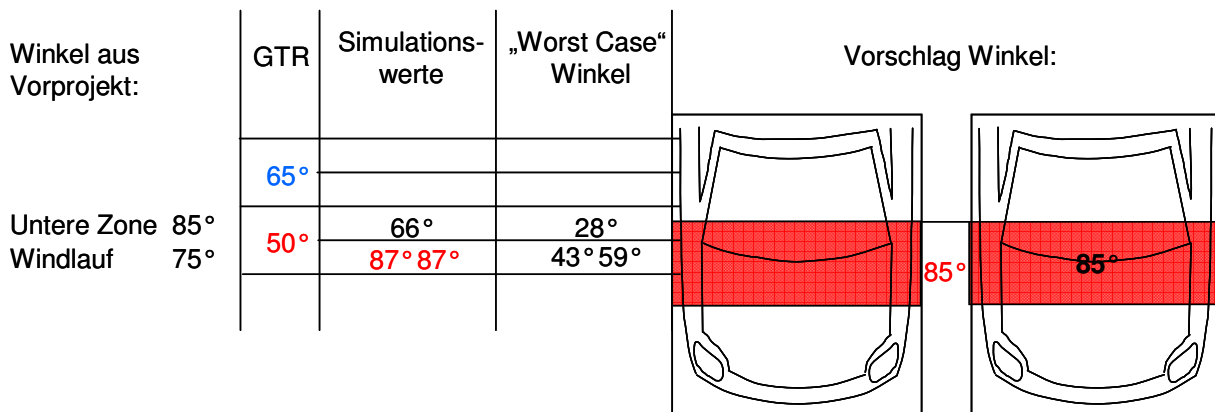


Abb. 10-3: Vereinfachung der Prüfwinkel am Beispiel Kategorie B

Kategorie C

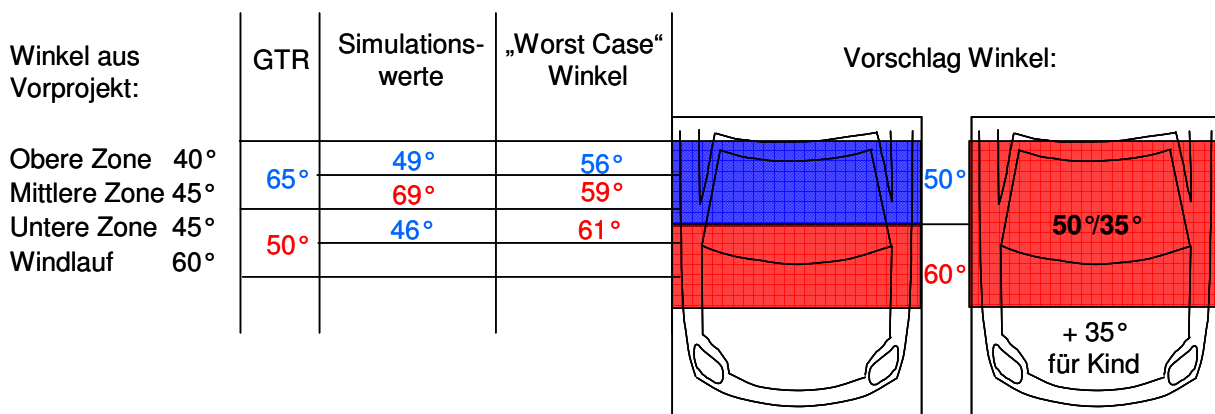


Abb. 10-4: Vereinfachung der Prüfwinkel am Beispiel Kategorie C

Kategorie D

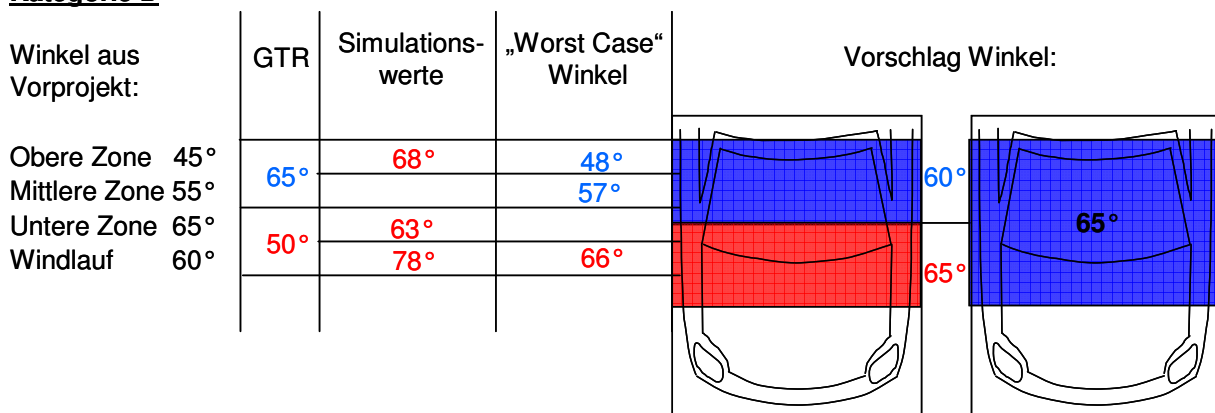


Abb. 10-5: Vereinfachung der Prüfwinkel am Beispiel Kategorie D

10.1.3 Seitliche Begrenzungslinien des Prüfbereichs

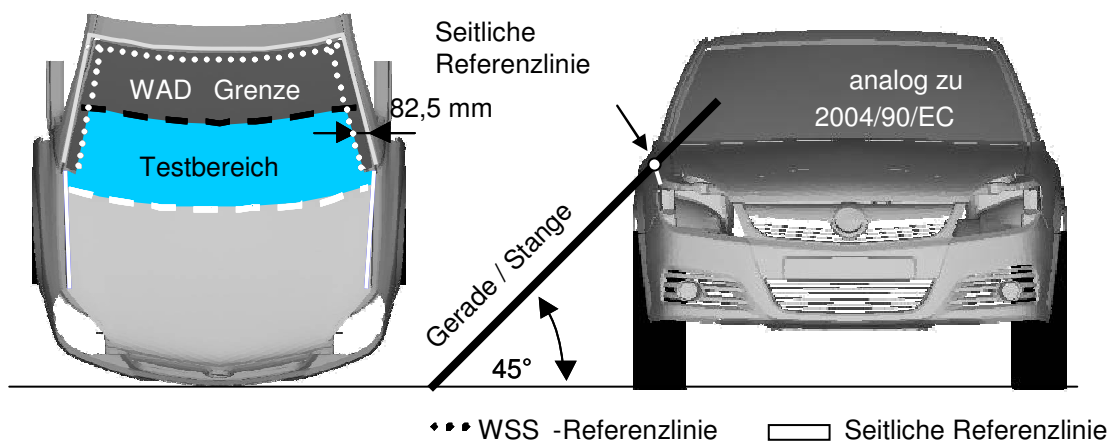


Abb. 10-6: Bestimmung der seitlichen Referenzlinie (Side reference line)

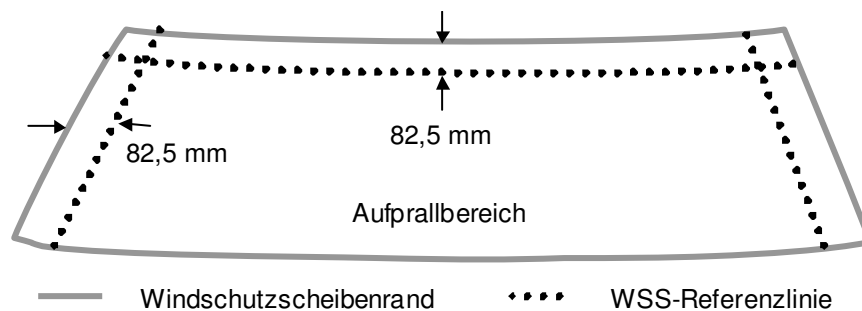
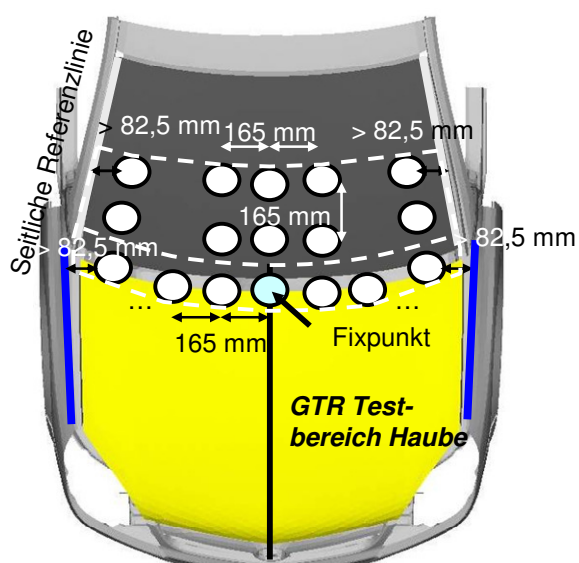


Abb. 10-7: Referenz des Windschutzscheibenrands

10.2 Aufbau des Rasterfeldes



- (1) Punkte entlang WAD Linien mit Start an Fixpunkt (z. B. Mitte Haubenhinterkante), Abstand je 165 mm.
- (2) Seitliche Begrenzung durch SRL
- (3) Abstand zu SRL min. 82,5 mm (halber \varnothing Impaktor)

Abb. 10-8: Festlegung Rasterfeld

10.3 Abwickellängen auf 2D-Profilen

K = Kopfaufprallposition, S= Schulteraufprallposition

		2D-Profil Kategorie A			2D-Profil Kategorie B		
		Maximum	Durchschnitt	Minimum	Maximum	Durchschnitt	Minimum
C6	K	1050	1100	1130	710	1010	1040
	S	900	890	910	650	950	1010
F6	K	1370	1695	1680	1250	1380	1430
	S	1080	1390	1400	1080	1140	1130
M50	K	1790	1940	1850	1540	1580	1781
	S	1550	1590	1640	1270	1250	1390
M95	K	2240	2210	2668	1820	-	2110
	S	1860	1890	1830	1510	-	1850
		2D-Profil Kategorie C			2D-Profil Kategorie D		
		Maximum	Durchschnitt	Minimum	Maximum	Durchschnitt	Minimum
C6	K	1019	1110	1070	1220	1200	1350
	S	900	950	890	1010	1000	1120
F6	K	1460	1525	1420	1640	1670	1818
	S	1220	1300	1150	1370	1460	1550
M50	K	1830	2300	1770	2056	1994	2040
	S	1510	1550	1440	1680	1740	1740
M95	K	2080	2010	2104	2352	2281	-
	S	1750	1710	1750	1950	1970	2000

Abb. 10-9: Abwickellängen auf 2D-Profilen

10.4 Mehrkörpersimulationen mit Real- und Profil-Fahrzeugen

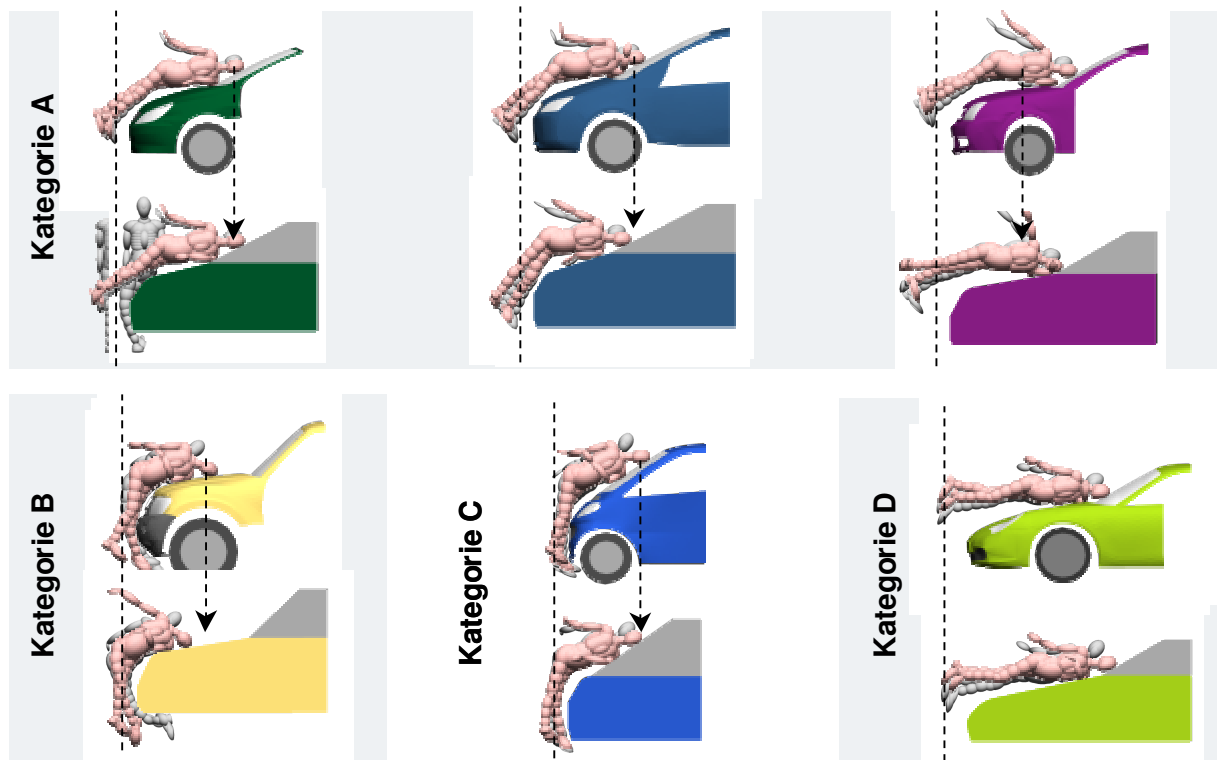
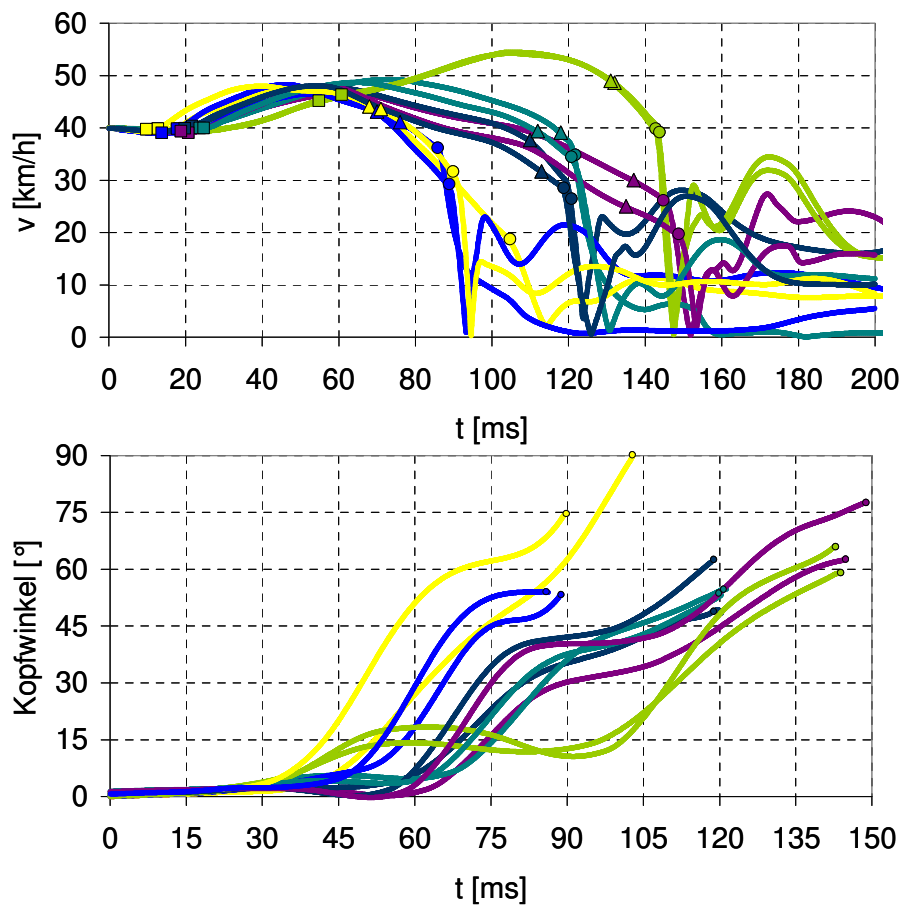


Abb. 10-10: Vergleich Realfahrzeuge und 2D-Profile

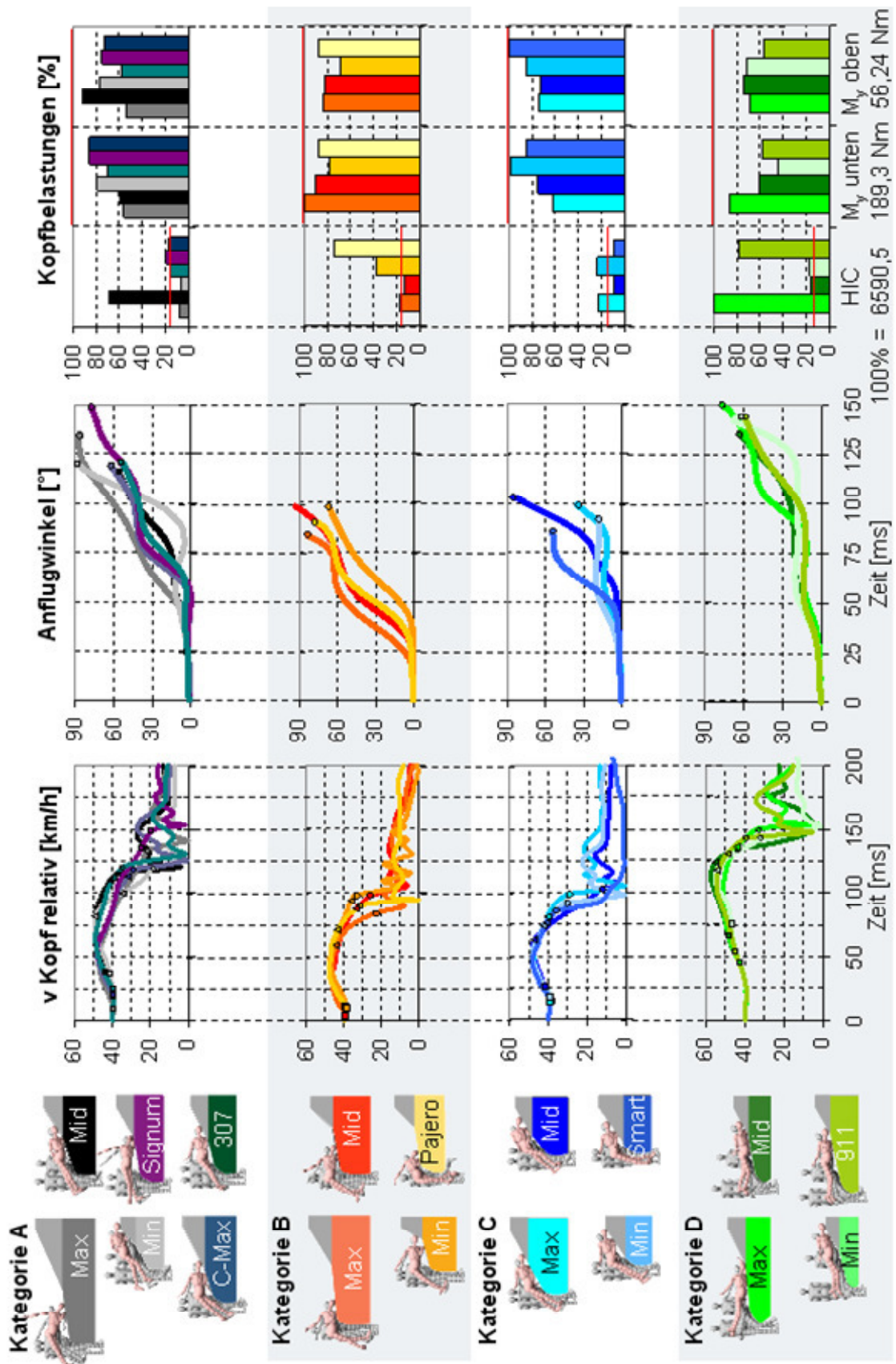


Abb. 10-11: Übersicht 2D-Profile

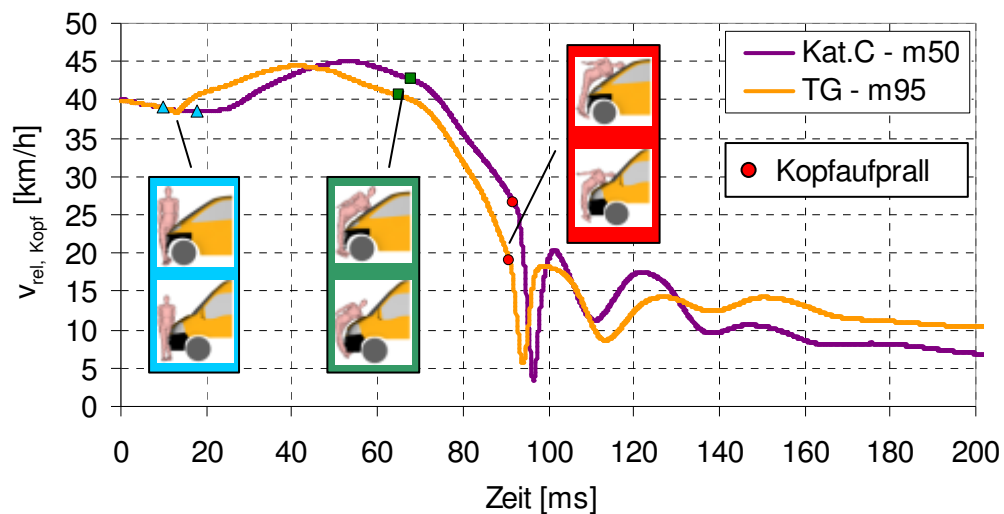


Abb. 10-12: Vergleich der Relativgeschwindigkeiten von Kategorie C (Smart)/50 %-Mann und Transporter groß/95 %-Mann bei identischem Stoßpunktverhältnis

10.5 HIC-Berechnung für den Rechteckverlauf

Der rechteckige Verlauf liefert:

$$a = \frac{dv}{dt} \Rightarrow \text{mit } a = \text{konst} : a = \frac{v_1}{\Delta t},$$

Einheiten bei HIC-Berechnung [s] und [g]

Für den nötigen Deformationsweg ergibt sich:

$$s(t) = \int v(t)dt = v_1 t - \frac{1}{2} a t^2$$

$$\Rightarrow s(\Delta t) = v_1 \Delta t - \frac{1}{2} \frac{v_1}{\Delta t} (\Delta t)^2 = \frac{1}{2} v_1 \Delta t$$

$$\text{HIC} = \max \left\{ \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a_{\text{res}}(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \right\} = \Delta t a^{2.5}$$

$$\Delta t = \text{HIC} a^{-\frac{5}{2}} = \text{HIC} \left[\frac{v_1}{\Delta t g} \right]^{\frac{5}{2}} \Rightarrow \Delta t^{\frac{3}{2}} = \text{HIC} \left[\frac{v_1}{g} \right]^{\frac{5}{2}} = \text{HIC}^{\frac{2}{3}} \left[\frac{v_1}{g} \right]^{\frac{5}{3}}$$

$$\Rightarrow s_{\text{Defo, HIC1000}} = \frac{1}{2} v_1 \text{HIC}^{-\frac{2}{3}} \cdot \left[\frac{v_1}{g} \right]^{\frac{5}{3}}$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 9,72 \cdot (1000)^{-\frac{2}{3}} \cdot \left[\frac{9,72}{9,81} \right]^{\frac{5}{3}}$$

$$s_{\text{Defo, 1}} = 47,89 \text{ mm}$$

Der HIC-Wert bei $v_2 = 40 \text{ km/h}$ und gleichem Deformationsweg errechnet sich zu:

$$\Rightarrow \underline{\text{Annahme:}} s_{\text{Defo, 1}} = s_{\text{Defo, 2}} = \text{konstant}$$

$$\Delta t = \frac{2 \cdot S_{\text{Defo},1}}{v_2} = 0,008617 \text{ s}$$

$$a = \frac{2 \cdot S_{\text{Defo,HIC1000}}}{\Delta t^2} = \frac{v_2^2}{2 \cdot S_{\text{Defo,HIC1000}}} = 131,36 \text{ g}$$

$$\Rightarrow \text{HIC} = a^{2,5} \Delta t = (131,36 \text{ g})^{2,5} \cdot 0,008617 \text{ s} = 1705$$

Die auf v_1 bezogene Erhöhung der kinetischen Aufprallenergie bei $m_1 = m_2$ ergibt sich zu:

$$\Rightarrow \frac{E_2 - E_1}{E_1} = \frac{\frac{1}{2} m_2 v_2^2 - \frac{1}{2} m_1 v_1^2}{\frac{1}{2} m_1 v_1^2} = \frac{v_2^2}{v_1^2} - 1 = 0,3061$$

10.6 Modellaufbau

Digitalisierung

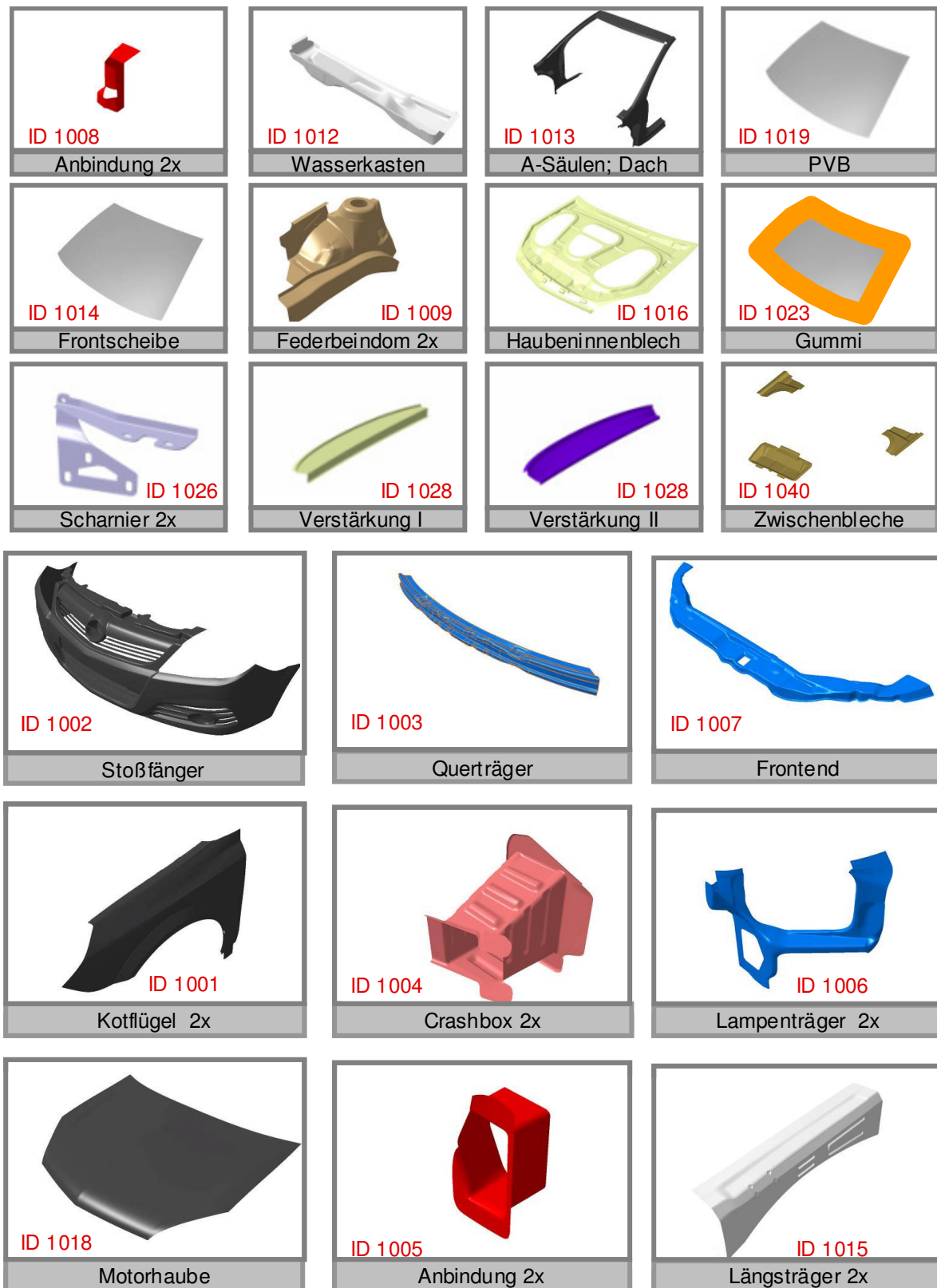
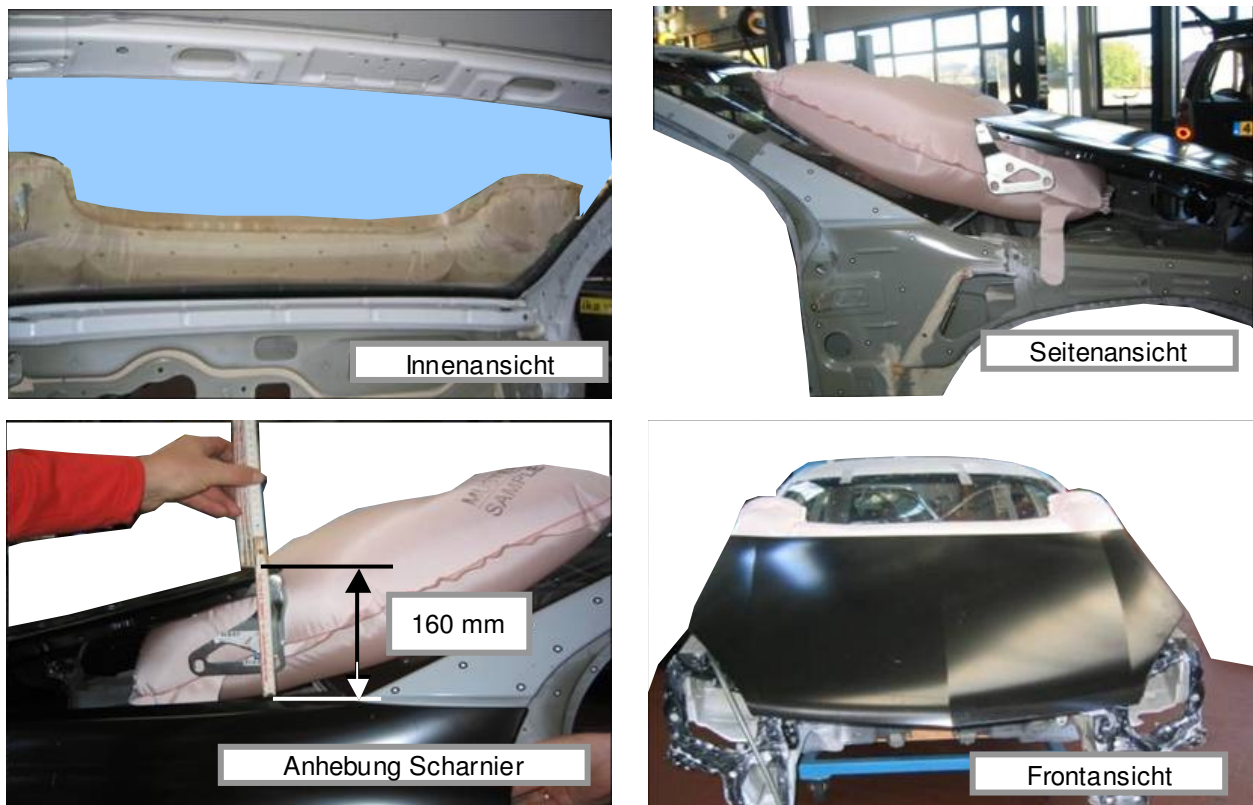


Abb. 10-13: Digitalisierte Fahrzeugkomponenten

Bauteilname	Materialdicke [mm]	Masse [kg]
Kotflügel	2,00	1,99
Stoßfänger	2,00	3,75
Querträger	1,00	2,81
Crashboxen	1,00	1,30
Anbindung (2 x)	1,25	1,87
Lampenträger	1,50	2,09
Frontend	1,25	2,34
Anbindung (2 x)	2,00	1,01
Dom links	1,20	4,71
Dom rechts	1,20	4,75
Abdeckung	1,00	0,42
Wasserkasten	1,30	7,36
A-Säulen, Dach	1,50	14,8
Frontscheibe	3,93	5,63
Oberer Längsträger	1,20	2,43
Haubeninnenblech	1,20	3,52
Haubenaußenblech	1,20	4,63
PVB	3,93	--
Kleber	Volumenelemente	0,17
Gummi	Volumenelemente	--
Scharnier	5,00	0,56
Fensterscheibe (1)	1,40	3,03
Fensterscheibe (2)	1,00	1,89
Haubenanbindung	2,00	0,41
Verstärkungsbleche	1,50	1,67
Gesamt		119,28

Abb. 10-14: Masse und Materialdicke der digitalisierten Fahrzeugkomponenten



- Einbauversuch mit Airbag
- Airbag über Druckluftleitung statisch in Aufschlagposition gehalten
- Haube für Einbauversuche an hinteren Scharnieren gelöst
- Erforderlicher Öffnungswinkel von 5° (Vorspannung)
- Öffnung ca. von 100 bis 120 mm

Abb. 10-15: Einbauansichten

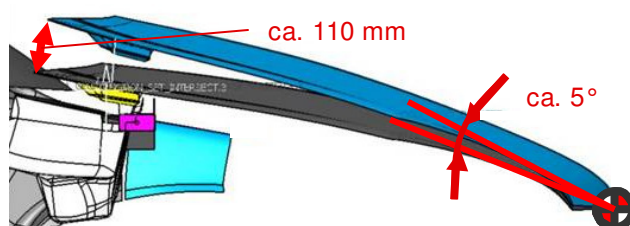


Abb. 10-16: Haubenöffnungswinkel

Anhebung auf ca. 5° begrenzt, um Airbag Vorspannung zu geben und Schwingungen zu vermeiden

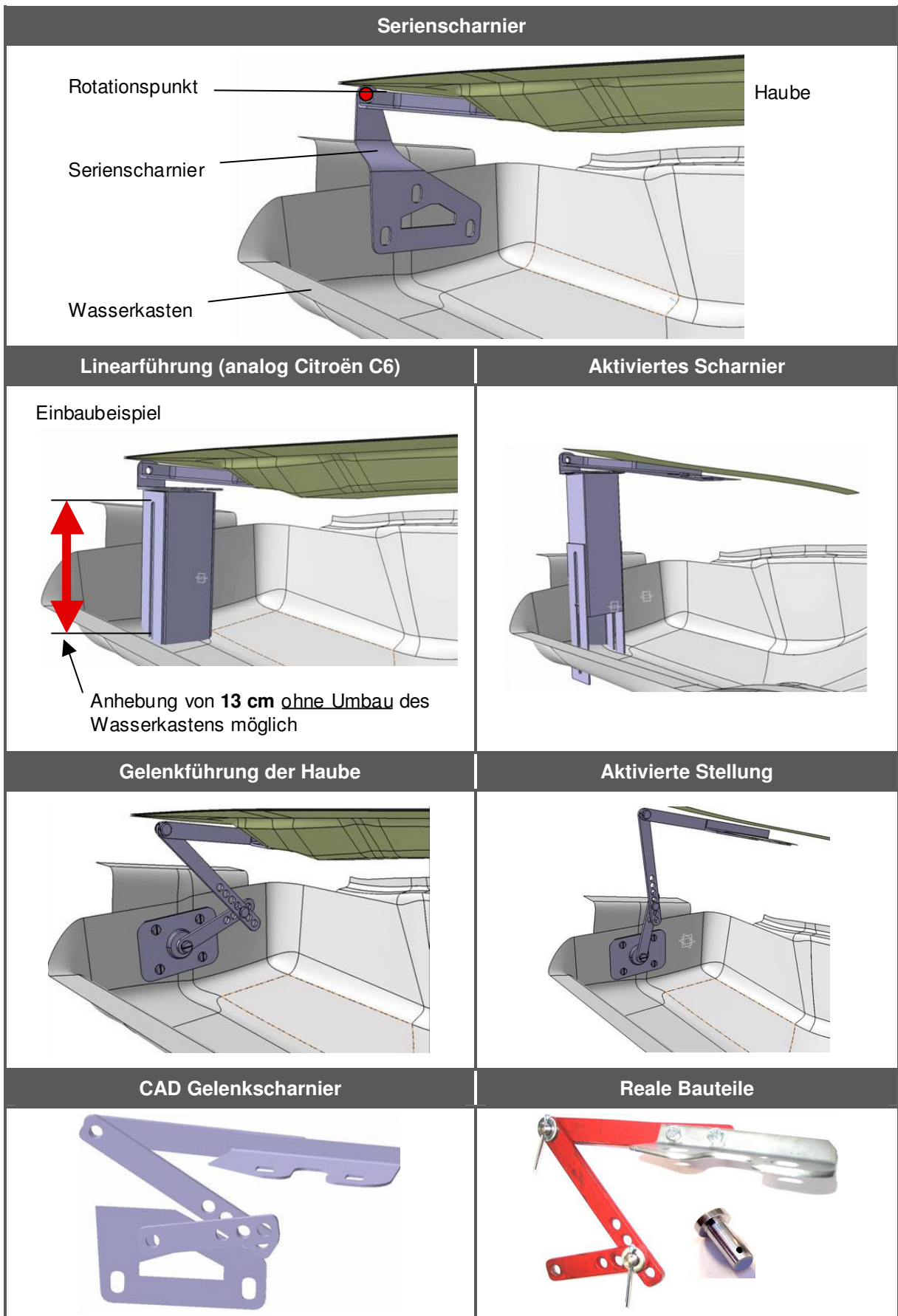


Abb. 10-17: Lagerungsmöglichkeiten der Haube

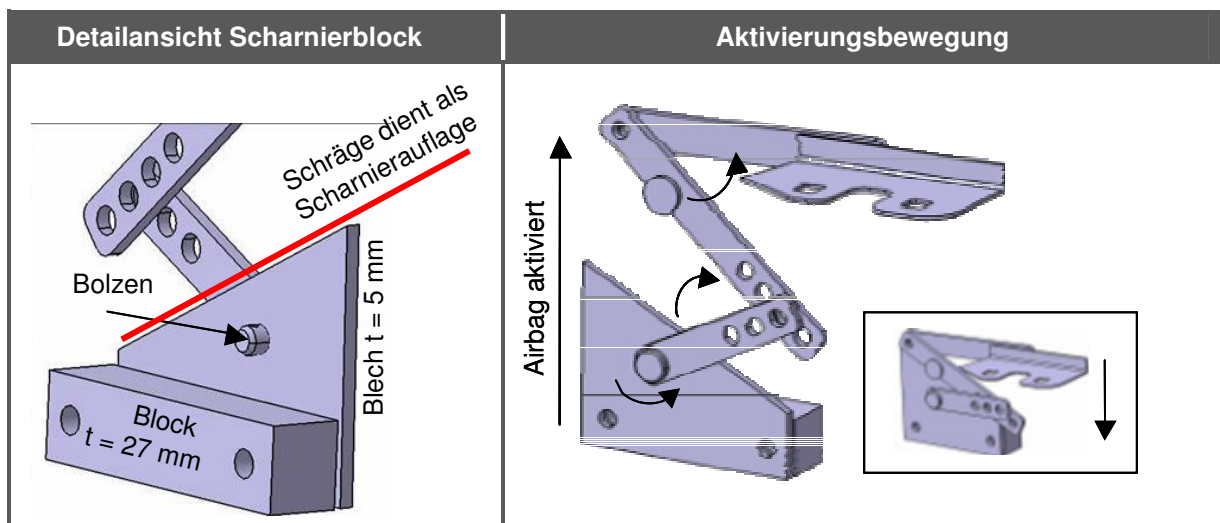


Abb. 10-18: Scharnierfunktionen

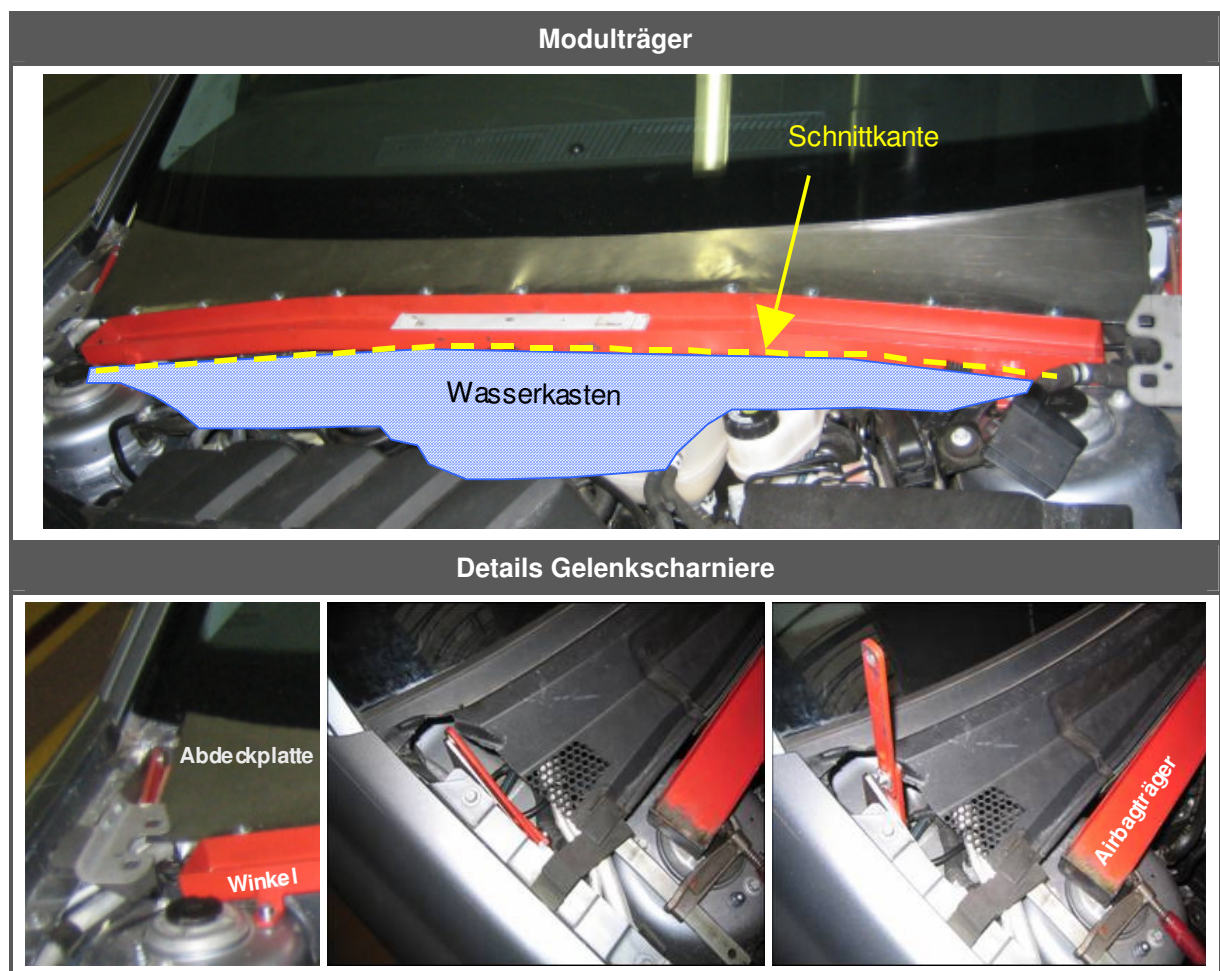


Abb. 10-19: Umbau Versuchsfahrzeug 1/2



Abb. 10-20: Umbau Versuchsfahrzeug 2/2



Abb. 10-21: Einbauansichten



Abb. 10-22: Auslöseverhalten Airbagsystem ohne Haube, t in [ms]

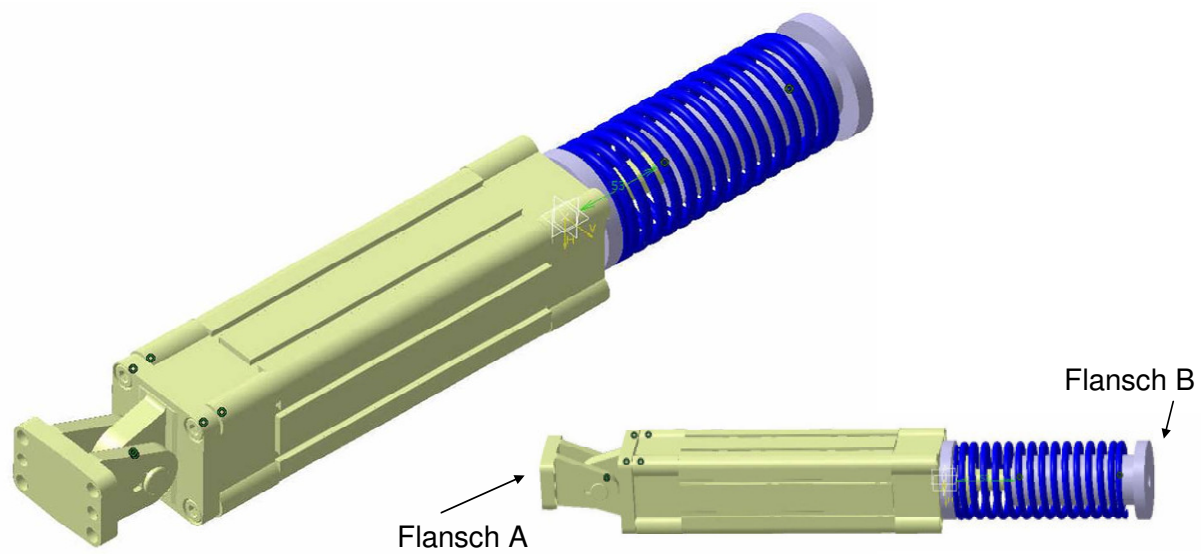


Abb. 10-23: Pneumatikzylinder

10.7 Versuchsdetails



Abb. 10-24: Aufbauansichten Versuch Serienfahrzeug



Abb. 10-25: Versuch 1 Serienfahrzeug, t in [ms]



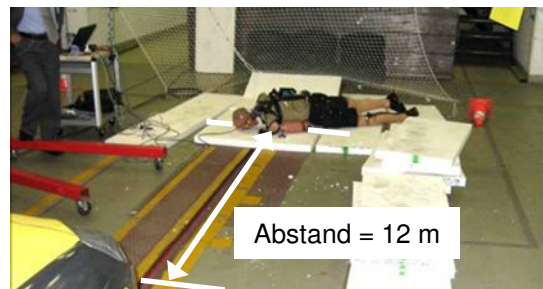
Beschädigung durch Aufhängung



Kopfaufprall



Hüftaufprall



Sekundäraufprall

Abb. 10-26: Ansichten nach Versuch 1

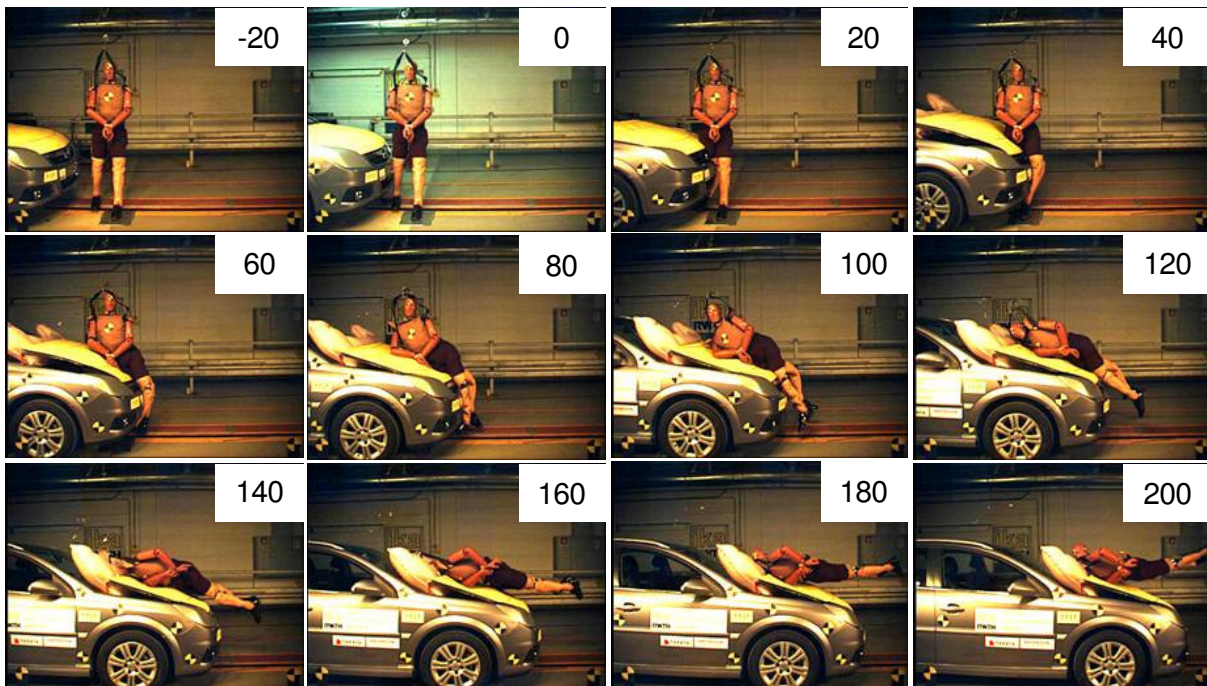


Abb. 10-27: Versuch 2 – Kollision mit Airbagsystem, t in [ms]

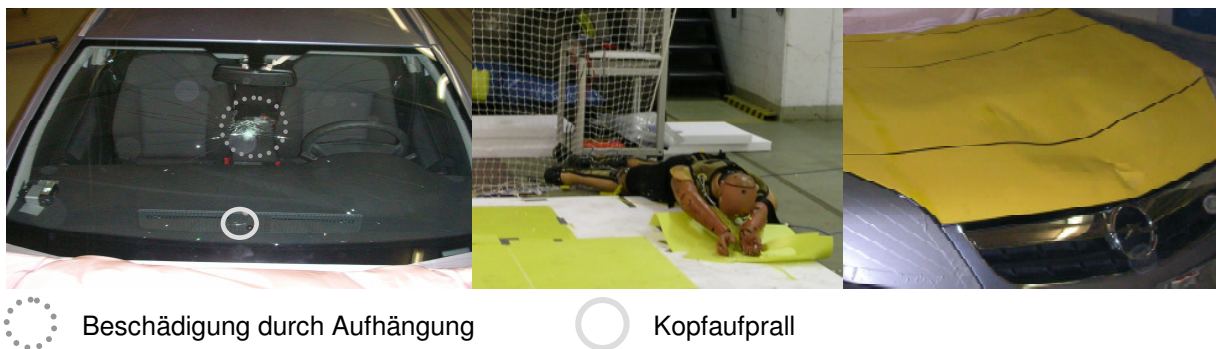


Abb. 10-28: Ansichten nach Versuch 2

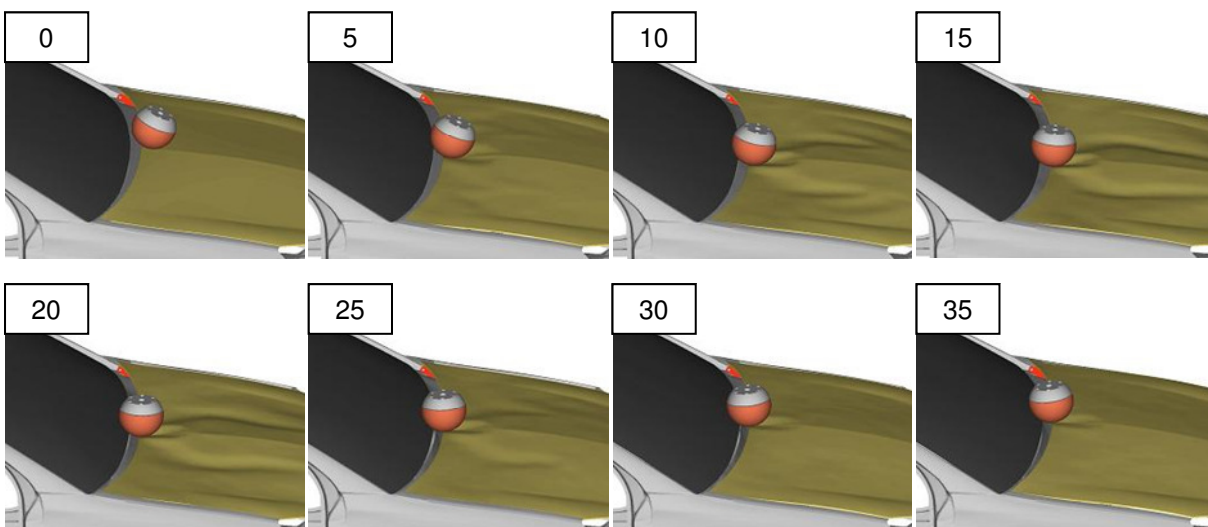


Abb. 10-29: Impaktorsimulation Haubenhinterkante Serienfahrzeug, t in [ms]

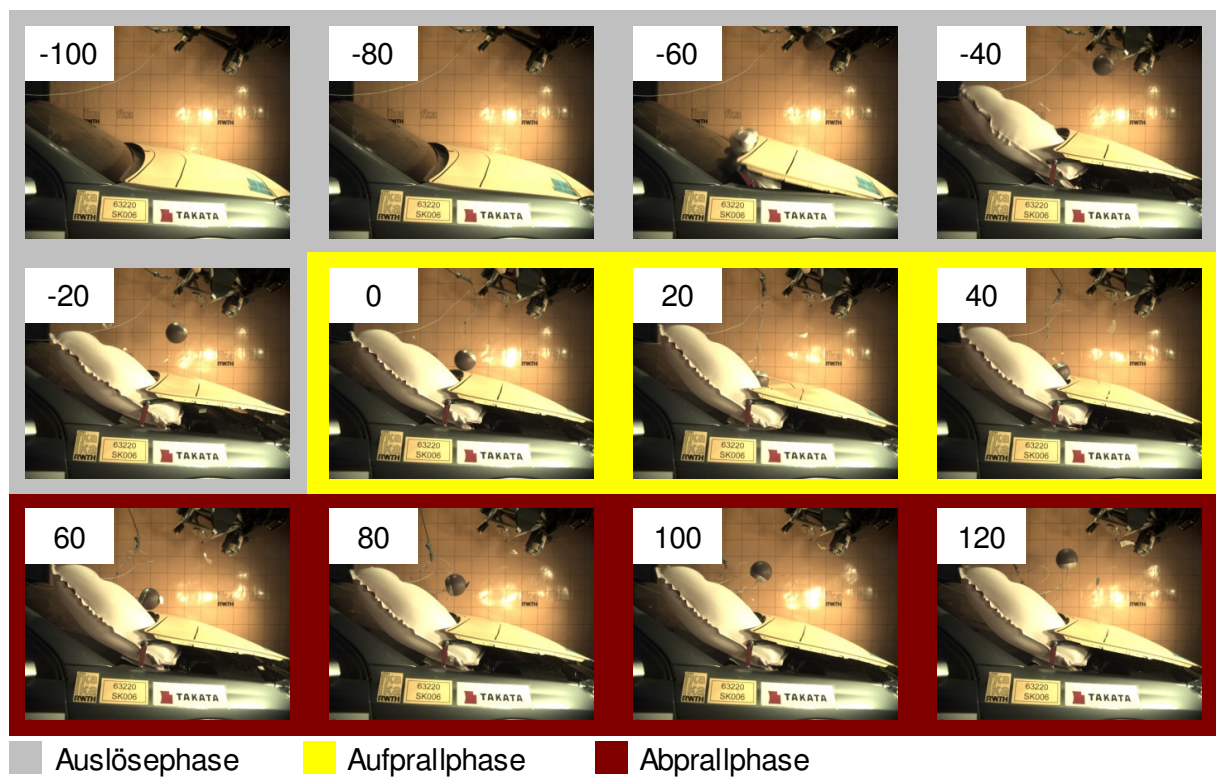


Abb. 10-30: Test auf die Haubenmitte, Zeit in [ms] (vgl. Abb. 5-44)

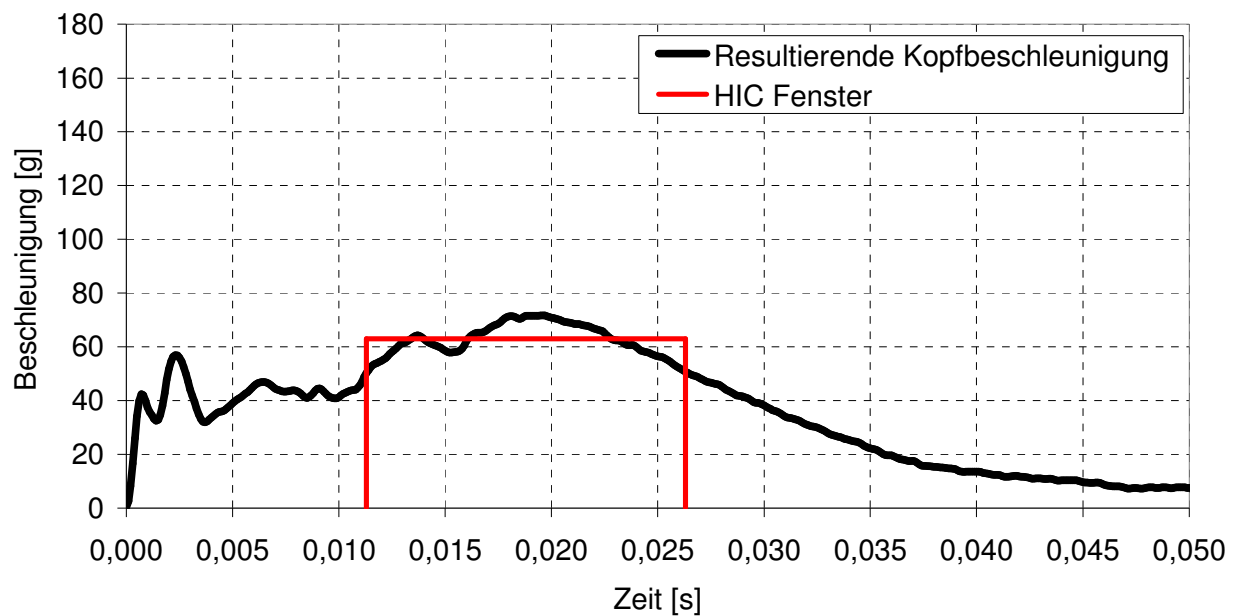


Abb. 10-31: Beschleunigungs-Zeit Diagramm – Wiederholversuch Haubenmitte

10.8 Ergebnisse einer Expertenbefragung

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen und das darauf basierende Prüfverfahren wurden von der BAST und dem ika einer gemeinsamen Expertenrunde mit Vertretern des BMVBS und des VDA-Arbeitskreises „passive Sicherheit“ vorgestellt (BAST, 28. November 2008).

Gegenstand waren die Projektergebnisse aus diesem und dem vorangegangenen Forschungsprojekt zum Scheibenaufprall von Fußgängern. Die Beurteilung aus der Sicht von Fahrzeugherstellern (OEMs) soll in eine Bewertung und in die weitere Ausarbeitung und Vervollständigung eines machbaren und anwendbaren Testverfahrens einfließen. Diese Ergebnisse gliedern sich zum einen in die Inhalte des Protokolls sowie ergänzend dazu in einer anschließenden Stellungnahme mit Kommentaren des VDA ad hoc Arbeitskreises „Fußgängerschutz“ vom 27.02.2009.

Es wird ausschließlich die Meinung der Industrie wiedergegeben, welche sich nicht immer mit den Ansichten von Auftragnehmer (ika) und Auftraggeber (BAST) deckt.

1) Inhalte des Protokolls zum Meeting

Die Machbarkeit der durch das Testverfahren geforderten technischen Lösungen am Fahrzeug im Windlauf- und Scheibenrahmenbereich ist nach wie vor eine der größten Herausforderungen beim passiven Fußgängerschutz. Für das Erreichen des Grenzwertes von HIC = 1000 wird in diesem Bereich ein sehr hoher (Kosten-) Aufwand erwartet. Durch die steifen Strukturen in der Übergangzone zwischen Haube und Scheibe erscheinen aus Sicht der OEMs die Bedingungen des Testverfahrens durch rein passive Lösungen nicht mehr erfüllbar. Nur durch den Einsatz von crashaktiven Systemen wäre dann eine Erfüllung der geforderten Bedingungen zu realisieren.

Die Ergebnisse aus den Forschungsprojekten stufen den mittleren Scheibenbereich für den Kopfaufprall des Fußgängers als relativ unkritisch im Vergleich zum Rahmenbereich ein. Hierbei muss allerdings berücksichtigt werden, dass zukünftig Kunststoffscheiben aus Polycarbonat wegen ihrer geringeren Nachgiebigkeit zu neuen Risiken im Scheibenbereich führen können. Auch Panoramascheiben können aufgrund ihrer Wölbung und der damit erhöhten Bruchfestigkeit ebenfalls zu HIC-Werten oberhalb des

definierten Grenzwertes führen. Für derartige Frontscheiben sollte der Prüfbereich eine hintere Begrenzung (z. B. durch eine 45°-Tangente) beinhalten, um den Kopfaufprallbereich nicht allein durch den Einbau einer solchen Scheibe unangemessen zu vergrößern.

Die Überprüfung des sinnvollen Einsatzes eines crashaktiven Systems wurde in diesem Projekt für eine Fahrzeuggeschwindigkeit von 40 km/h durchgeführt. Zu untersuchen bleibt, ob der Einsatz dieser Systeme auch für höhere Geschwindigkeiten und damit verbundene kürzere Kopfaufprallzeiten sinnvoll und umsetzbar ist.

Der variierende Aufprallwinkel im Prüfverfahren für den Kinderkopf zwischen 35° bis 50° (Haube, Scheibe) und 65° (Windlauf) im Vergleich zur GTR-Vorgabe kann stark unterschiedliche Beschleunigungen bewirken.

Die Wirksamkeit und der Nutzen des eingesetzten crashaktiven Airbagsystems hinsichtlich der Reduktion der HIC-Werte konnte in diesem Abschlussbericht nachgewiesen werden. Aufgrund der Relevanz der untersuchten Bereiche für den Kopfaufprall im realen Unfallgeschehen besteht nach Expertenmeinung mitunter die Notwendigkeit zu weiteren Untersuchungen und Verbesserungskonzepten. Hierbei sollten sowohl die Testmethoden als auch aktive und passive Sicherheitsmaßnahmen am Fahrzeug berücksichtigt werden.

Zusätzlich werden diese Systeme zukünftig durch ein verändertes Bewertungsverfahren in Euro NCAP stärker motiviert. Als ein alternativer bzw. ergänzender Lösungsansatz zur Verminderung von Unfallfolgen gilt der Einsatz von „Advanced Safety Systems“ im Rahmen der aktiven Sicherheit wie z. B. Bremsassistentensysteme, die laut Meinung der Experten auch im Prüfverfahren berücksichtigt werden sollten.

2) Stellungnahme VDA Arbeitskreises „Fußgängerschutz“ vom 27.02.2009

„Der VDA ad hoc Arbeitskreis „Fußgängerschutz“ bedankt sich bei der Bundesanstalt für Straßenwesen für die Einladung zu dem Expertenhearing zum Thema „Scheibenanprall“, das am 28.11.2008 in Bergisch Gladbach stattfand. Dank gebührt ebenfalls den Vortragenden des Instituts für Kraftfahrzeuge (ika) der RWTH Aachen für die informative Präsentation der Thematik.“

An dieser Stelle möchte der VDA ad hoc AK die Gelegenheit zu einer Stellungnahme zum obigen Thema nutzen.

Zuerst muss festgestellt werden, dass sich die in dem Projekt vorgestellten außen liegenden Airbagsysteme derzeit im Forschungsstadium befinden: Bisher gibt es keinerlei Erfahrungen zur Verwendung solcher Systeme, speziell auch im Hinblick auf die zu erwartende ordnungsgemäße Funktion über die gesamte Fahrzeuglebensdauer und den Einfluss der Umwelt auf solche Systeme.

Darüber hinaus sind zwei wichtige Themenbereiche nach Ansicht der Automobilindustrie zu wenig berücksichtigt:

Effektivität

In den letzten Jahren wird in Verbindung mit neuen Testprozeduren immer mehr auch auf einen Nachweis der Effektivität der vorgeschlagenen Maßnahmen geachtet, um einerseits die Notwendigkeit von Änderungen zu begründen und andererseits teure Fehlentwicklungen zu vermeiden. Dieser Aspekt muss auch bei der hier dargestellten Scheibentestprozedur Berücksichtigung finden. Dabei ist es aus Sicht des VDA ad hoc AK notwendig, auch den Sekundäraufprall einzubeziehen und dabei mögliche Rückpralleffekte auf die Straße infolge von fahrerseitigen Maßnahmen zu berücksichtigen. Zusätzlich ist – insbesondere mit Blick auf zukünftige vorausschauende und der Unfallvermeidung dienende Fahrzeugsysteme – eine Überprüfung der gewählten Testparameter unbedingt erforderlich. So wird die Reduzierung der Fahrzeuggeschwindigkeit vor dem Fußgängerunfall bei der Prüfkörper-Anprallgeschwindigkeit auf die Fahrzeugfront zu berücksichtigen sein, um die Realität im Unfallgeschehen möglichst genau widerspiegeln zu können.

Machbarkeit

Für die Zukunft sind Maßnahmen zur Unfallvermeidung bzw. zur Unfallschwereminderung im Gespräch – beispielsweise Kombinationen von passiven und aktiven Maßnahmen mit vorausschauender Sensorik. Ein mögliches Testverfahren im Scheibenbereich sollte auch diese neuen Entwicklungen mit berücksichtigen. Dabei wird es notwendig sein, auch bereits etablierte Parameter wie die Anprallgeschwindigkeit der vorgeschlagenen Prüfkörper mit Blick auf solche Maßnahmen neu zu überdenken.

Zum jetzigen Zeitpunkt sind vorausschauende Sensorsysteme für aktive Maßnahmen noch nicht ausreichend für einen Serieneinsatz untersucht. Für passive Systeme im Scheibenbereich wurden aber erhebliche Zielkonflikte identifiziert und der Testbereich Scheibe wurde in den ge-

genwärtigen Gesetzgebungsverfahren aufgrund von nicht ausreichenden Kenntnissen über das Bruchverhalten von Glas aus den gesetzlichen Regelungen ausgeschlossen. Offen sind auch Fragen zu der zukünftigen Zulässigkeit von „harten“ Scheiben aus Kunststoff-Materialien, die einerseits deutliche Vorteile für die Scheibenfestigkeit und die Formgebung von Windschutzscheiben erwarten lassen, die andererseits aber kontraproduktiv zu der für den Fußgängerschutz geforderten „weichen“ Fahrzeugfront sind.

Der VDA ad hoc AK schlägt deshalb vor, im Abschlussbericht nur die Testprozedur zu beschreiben und von Hinweisen auf mögliche Grenzwerte Abstand zu nehmen.

Außerdem ergeben sich aus Sicht des VDA ad hoc AK folgende generelle Probleme:

- Der Kopfaufprallwinkel des Kinderkopftests in der Testprozedur weist Unstetigkeiten auf.
- Die Aussagekraft des MADYMO Fußgängermodells ist aufgrund der starren Darstellung der Schulter als eingeschränkt zu betrachten.
- Die Umsetzung von virtuellen Tests anhand von realen Fahrzeug-Modellen ist unklar, da FE-Daten der Hersteller aus Gründen des Schutzes von geistigem Eigentum während bzw. am Ende der Entwicklung nicht extern zur Verfügung gestellt werden können. Eine Verfahrensweise hierzu wurde bisher nicht erarbeitet.

Weitere detaillierte Anmerkungen sind dem Protokoll der Sitzung zu entnehmen.“

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

1997

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

1998

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

1999

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

2000

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

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, Weillkes, Steinauer, Bölling, Richter, Gaupp € 19,00

- F 36: Anforderungen an Rückspiegel von Krafträdern
van de Sand, Wallentowitz, Schrüllkamp € 14,00
- F 37: Abgasuntersuchung - Erfolgskontrolle: Ottomotor – G-Kat
Afflerbach, Hassel, Schmidt, Sonnborn, Weber € 11,50
- F 38: Optimierte Fahrzeugfront hinsichtlich des Fußgängerschutzes
Friesen, Wallentowitz, Philipps € 12,50

2002

- F 39: Optimierung des rückwärtigen Signalbildes zur Reduzierung von Auffahrunfällen bei Gefahrenbremsung
Gail, Lorig, Gelau, Heuzeroth, Sievert € 19,50
- F 40: 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 Notausstiegssystems bei Reisebussen
Krieg, Rüter, Weißgerber € 15,00
- F 43: Testverfahren zur Bewertung und Verbesserung von Kinderschutzsystemen beim Pkw-Seitenaufprall
Nett € 16,50
- F 44: Aktive und passive Sicherheit gebrauchter Leichtkraftfahrzeuge
Gail, Pastor, Spiering, Sander, Lorig € 12,00

2004

- F 45: Untersuchungen zur Abgasemission von Motorrädern im Rahmen der WMTC-Aktivitäten
Steven € 12,50
- F 46: Anforderungen an zukünftige Kraftrad-Bremssysteme zur Steigerung der Fahrsicherheit
Funke, Winner € 12,00
- F 47: Kompetenzerwerb im Umgang mit Fahrerinformationssystemen
Jahn, Oehme, Rösler, Krems € 13,50
- F 48: Standgeräuschmessung an Motorrädern im Verkehr und bei der Hauptuntersuchung nach § 29 StVZO
Pullwitt, Redmann € 13,50
- F 49: Prüfverfahren für die passive Sicherheit motorisierter Zweiräder
Berg, Rücker, 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 Belange 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 Fahrzeugbeleuchtung 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 Fahrverhalten
Vollrath, Briest, Oeltze € 15,50

F 75: Fehlgebrauch der Airbagabschaltung bei der Beförderung von Kindern in Kinderschutzsystemen

Müller, Johannsen, Fastenmaier € 15,50

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

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

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

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.