4 Bewertung von Maßnahmen zum Fußgängerschutz

Die Sicherheit im Straßenverkehr ergibt sich aus dem Zusammenspiel von aktiver und passiver Sicherheit, jeweils in den drei Ebenen Mensch, Fahrzeug und Umwelt (s. Abb. 4.1). Bisher wurden nur für einzelne Teilgebiete der Straßenverkehrssicherheit Bewertungsmethoden entwickelt, die den Beitrag einzelner Maßnahmen überprüfbar machen. Als am fortgeschrittensten ist hier neben den Bewertungsverfahren zur passiven Sicherheit von Kraftfahrzeugen die Bewertung von straßenseitigen Verkehrssicherheitsmaßnahmen anzusehen. Schutzmaßnahmen wirken auf den verschiedenen Ebenen ganz unterschiedlich. Sie sind aber alle mit Kosten verbunden und bergen ein gewisses Risiko an Fehlfunktionen oder Fehlbenutzung.

Ansatz	Fahrzeug	Straße	Mensch
Unfallvermeidung (aktive Sicherheit)	- Abbiegeassistent - Sichtassistent -Infrarot -Radar -Lidar	- Lichtsignalanlagen - Sichtkontakt - Querungshilfen	- Schulwegsicherung
	- Geschwindigkeitregelung ISA/ISM - Bremsassistent	- Bauliche Geschwindigkeitsdämpfung -Kreisverkehr -Aufpflasterungen -Starenkasten	- legislative Maßnahmen (Bußgeld)
Minderung der Unfallfolgen (passive Sicherheit)	- Fahrzeugfronten -Konstruktion -Technische Maßnahmen	- Entschärfung des Straßenrandes -Schutzplanken - Sicherheitsaudit	- Notfallmedizin - Rettungswesen

Wirkung →
- ■ nachgewiesen durch Unfallanalysen
- ▢ nachgewiesen durch Modellrechnungen
- □ vermutet

Abb. 4.1 Übersicht über Teilgebiete der Verkehrssicherheit mit Bezug zum Fußgängerschutz und deren Bewertungsmethoden.

In der politischen Diskussion wäre es höchst wünschenswert, alle diese Maßnahmen auf einer gemeinsamen Skala quantifizierbar zu machen. So könnten die zur Verfügung stehenden, begrenzten volkswirtschaftlichen Mittel auf das effektivste und kostenwirksamste Bündel an Maßnahmen konzentriert werden. Verfahren, die aktive und passive Sicherheit in gleicher Weise bewerten, fehlen aber bisher.

4.1 Straßenseitige Maßnahmen

Generell gilt: Um die Wirksamkeit einer verkehrsicherheitsbezogenen Maßnahme zu überprüfen, ist es wichtig, Verfahren zur Verfügung zu haben, die in der Lage sind, Sicherheitsdefizite aufzuzeigen und zu bewerten. Dies sollte in allen sicherheitsrelevanten Bereichen des Verkehrs geschehen, vor allem im Bereich des Fahrzeugs selbst, aber auch im Bereich der Straße.
In Deutschland wurde 1999 damit begonnen, ein Sicherheitsaudit für Straßen zu entwickeln, das für die deutsche Planungs- und Verwaltungspraxis geeignet ist. In der Vergangenheit hat sich nämlich gezeigt, dass immer wieder Straßenbaumaßnahmen geplant und realisiert wurden, bei denen die Möglichkeiten der geltenden technischen Regelwerke für eine verkehrssichere Gestaltung nicht ausgenutzt oder sogar missachtet wurden. Im Jahre 2002 wurde mit den Empfehlungen für Sicherheitsaudits von Straßen (ESAS) ein formalisiertes Verfahren eingeführt, mit dem Sicherheitsdefizite bei Planung und Entwurf von Straßen vermieden werden sollen (ESAS 2002). Im Ausland wurden bereits beginnend in den 80iger Jahren Erfahrungen mit solchen formalisierten Verfahren, so genannten „Road Safety Audits“, gemacht (Großbritannien, Dänemark, Australien). Diese sollen Sicherheitsmängel bei Planung und Entwurf von Straßen vermeiden helfen. Sie sind in ihren Grundzügen gleich, weisen aber länderspezifische Besonderheiten auf.

Das Ziel des Sicherheitsaudits in Deutschland ist es, Straßen beim Neu-, Um- oder Ausbau für alle Verkehrsteilnehmer so sicher wie möglich zu gestalten, um damit Unfallgefahren so gering wie möglich zu halten. Der Fokus des Audits liegt also im Bereich der Verkehrssicherheit.

Allgemein müssen aber in einem Abwägungsprozess beim Entwurf einer Straße auch alle übrigen Belange beachtet werden, wie z. B.:

- Verkehrsablauf
- Wirtschaftlichkeit
- Straßenraumgestaltung
- Umfeldverträglichkeit

Das Sicherheitsaudit kann in verschiedenen Phasen in den Planungsablauf eines Projektes integriert werden:

- Auditphase 1: Vorplanung
- Auditphase 2: Vorentwurf
- Auditphase 3: Ausführungsentwurf
- Auditphase 4: Verkehrsfreigabe

Allgemein gilt: je früher mit dem Auditprozess begonnen wird, desto geringer ist der Aufwand bei den folgenden Auditphasen. Im Gegensatz zum im Ausland oft praktizierten Audit bestehender Straßen (Betriebsaudit), enthält das vom BMVBS[1] vorgeschlagene deutsche Audit diese Phase nicht. Hier greifen die gesetzlich verankerten Verfahren der so genannten Verkehrsschau und die örtliche Unfalluntersuchung. Die eigentliche Auditdurchführung gliedert sich in 4 Arbeitsschritte:

1. Sichtung der Unterlagen, Prüfung auf Vollständigkeit
2. Auditierung der Planunterlagen durch
   - „virtuelle Benutzung“ der Verkehrsanlage aus Sicht der verschiedenen Verkehrsteilnehmer
   - Überprüfung der sicheren Gestaltung wichtiger räumlich-funktionaler Situationen, wie z. B. Ortseingangsbereiche, Überquerungsstellen, Haltestellenbereiche
   - Überprüfung der Planung auf mögliche missbräuchliche Benutzung, z. B: Gehwegparken
3. „Selbstkontrolle“ mit Hilfe der ESAS-Checklisten
   - Ortsbesichtigung in Form teilnehmender Beobachtung, Prüfung der Planung vor Ort, Ergebnisprotokoll mit Fotodokumentation
4. Anfertigen eines Auditberichtes mit Angabe von
   - Projektdaten
   - Grundsätzlichen Entwurfsdefiziten
   - Detaildefiziten

[1] BMVBS – Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung

Die bisher durchgeführten Audits zeigen, dass bei insgesamt hoher Akzeptanz der Auditergebnisse die Bereitschaft für die Umsetzung der Änderungen in den frühen Auditphasen größer ist als in den späteren. Viele der festgestellten Defizite sind dabei sicherheitsrelevante Abweichungen von den Regelwerken (s. Abb. 4.2). Dies zeigt u.a. den Bedarf an Weiterbildungsmaßnahmen für Planer.

Abb. 4.2 Festgestellte Defizitbereiche bei den Sicherheitsaudits im Land Brandenburg (SAS 2002).

Abb. 4.3 Festgestellte Defizite bei auditierten Ortsdurchfahrten im Land Brandenburg (SAS 2002).

Speziell bei Audits für Ortsdurchfahrten die im Land Brandenburg durchgeführt wurden, konnte festgestellt werden, dass keine oder nur unzureichende Maßnahmen zur Geschwindigkeitsreduzierung durchgeführt

wurden. Weitere Defizite waren u.a. nicht gesicherte Haltestellen, nicht ausreichende Sichtverhältnisse bei Grundstückszufahrten sowie fehlende oder falsch angeordnete Parkstände. So betrafen z. B. 25 % der Defizite den Radverkehr und 8 % die Fußgänger (s. Abb. 4.3).

Entscheidend für die Motivation der Durchführung einer Maßnahme allgemein ist deren Nutzen/Kosten-Verhältnis. Bisherige Erfahrungen in Deutschland und im Ausland zeigen, dass der Nutzen eines Sicherheitsaudits weit höher ist als die Kosten. Die Kosten eines Sicherheitsaudits werden im Wesentlichen durch den Zeitbedarf des Auditors bestimmt. Er kann, je nach Umfang des Projektes, zwischen einem und mehreren Tagen liegen. Dagegen ist der wesentliche Nutzen dieses Sicherheitsaudits die Reduzierung der Unfallkosten (SAS 2002).

Die Qualität des Sicherheitsaudit hängt entscheidend von der Qualifikation der Auditoren ab. Sie müssen über vertiefte Kenntnisse und Erfahrungen im Bereich des Entwurfs und der Beurteilung der Verkehrssicherheit von Straßenverkehrsanlagen verfügen. Grundqualifikation ist u.a. ein abgeschlossenes einschlägiges Hochschulstudium. Die Auditoren sollten unabhängig sein, um die Projekte unvoreingenommen und unbeeinflusst bewerten zu können (SAS 2002).

Monetäre Bewertungsansätze für Infrastrukturmaßnahmen zum Schutz von Fußgängern

Im Rahmen einer französisch-englischen Kooperation wurde im Jahr 1998 auf Anregung des Verbandes der europäischen Automobilhersteller (ACEA) eine Studie zur Bewertung der Effizienz von Infrastrukturmaßnahmen durchgeführt (ORI 98). Insgesamt wurden 346 Örtlichkeiten untersucht, an denen Fußgängerunfälle aufgetreten sind und nachträglich zwölf Typen von Infrastrukturmaßnahmen eingeleitet wurden. Die statistische Analyse umfasste einen Untersuchungszeitraum von sechs Jahren, geteilt in jeweils drei Jahre vor und drei Jahre nach Einführung der Infrastrukturmaßnahme. Die Örtlichkeiten wurden in sechs Typen entsprechend des Fahrzeug- und Fußgängeraufkommens unterteilt. Als Bewertungskriterien dienten:

- Reduktion der Zahl der verunglückten Fußgänger (s. Tab. 4.1)
- First Year Rate of Return (Nutzen/Kosten-Analyse bezogen auf das erste Jahr nach Maßnahmeneinführung, s. Tab. 4.2)
- Severity Index (Zahl der Getöteten und Schwerverletzten pro Unfall)

Tabelle 4.1 Reduktion der Zahl der verunglückten Fußgänger durch die Einführung von Infrastrukturmaßnahmen (ORI 1998), zitiert in (SAVE-U D6 2005).

Vehicles/Day Pedestrian Presence		<7000 limited	<7000 medium	<7000 high	<7000 limited	>7000 medium	>7000 high	
Drop of Victims		Area	Area	Area	Area	Area	Area	All
Measure	Type	Type1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	Type 6	Areas
Traffic management	1	-71%		-38%	-63%		-28%	-45%
Road markings	2	-54%			-48%	-50%		-51%
Street lighting	3	0%	-44%		-36%	-39%		-39%
Refuge	4	-40%			-56%	-34%		-41%
30kph zone	5	-58%	-32%	-52%				-51%
Horizontal traffic calming	6	-50%	-17%	-20%	-33%	-36%	-55%	-39%
Vertical traffic calming	7	-69%	-70%	0%	-66%	-55%		-67%
Pedestrian crossings	8	-91%	-100%	-39%	-65%	-57%	-16%	-49%
Guard rails	9	-67%			-68%	-55%	-26%	-43%
Packages (horiz./vertical)	10	-75%	-24%		-83%	-80%	-23%	-29%
Traffic signals	11			-52%		-46%	-36%	-42%
All Measures	**12**	**-61%**	**-44%**	**-40%**	**-55%**	**-49%**	**-32%**	**-46%**

Tabelle 4.2 Nutzen/Kosten-Quotient für das erste Jahr (FYRR - First Year Rate of Return) nach Einführung der Infrastrukturmaßnahme (ORI 1998), zitiert in (SAVE-U D6 2005).

Vehicles/Day Pedestrian Presence		<7000 limited	<7000 medium	<7000 high	<7000 limited	>7000 medium	>7000 high	
FYRR		Area	Area	Area	Area	Area	Area	All
Measure	Type	Type1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5	Type 6	Areas
Traffic management	1	37%		-13%	-7%		101%	4%
Road markings	2	131%			98%	534%		124%
Street lighting	3	628%	793%		35%	88%		261%
Refuge	4	1188%			1085%	90%		318%
30kph zone	5	97%	62%	-8%				73%
Horizontal traffic calming	6	364%	33%	56%	2%	65%	106%	94%
Vertical traffic calming	7	163%	50%	59%	127%	34%		96%
Pedestrian crossings	8	994%	216%	288%	162%	208%	147%	249%
Guard rails	9	21%			2035%	920%	-75%	796%
Packages (horiz./vertical)	10	19%	154%		420%	11%	15%	43%
Traffic signals	11			177%		935%	216%	433%
All Measures	**12**	**183%**	**99%**	**24%**	**220%**	**187%**	**106%**	**145%**

Im Untersuchungsgebiet konnte durch die Einführung von Infrastrukturmaßnahmen die Zahl der verunglückten Fußgänger um 46 % (Getötete: -63 %, Verletzte: -34 %) gesenkt werden. Andere Unfalltypen konnten um 30 % reduziert werden. Die erreichte Reduktion der Zahl der verunglückten Fußgänger (s. Tabelle 4.1) sowie die Ergebnisse der Nutzen/Kosten - Analyse (s. Tabelle 4.2) zeigen deutlich die hohe Effizienz der getätigten Infrastrukturmaßnahmen. Fast alle umgesetzten Infrastrukturmaßnahmen konnten die Zahl der verunglückten Fußgänger als auch die Zahl der Un-

fälle überhaupt reduzieren. Als effektivste Infrastrukturmaßnahmen wurden Verkehrsinseln, Straßenbeleuchtung, Fußgängerüberwege und Schutzplanken identifiziert. Bei Betrachtung aller umgesetzten Maßnahmen in allen Gebieten konnte im ersten Jahr ein Nutzen/Kosten-Quotient von 145 % erreicht werden. Insgesamt wurden durch die Einführung der Infrastrukturmaßnahmen volkswirtschaftliche Kosten von 200 Millionen Euro gespart. Die Reduktion der Verunglücktenzahlen und auch der Nutzen/Kosten-Quotient hängen weniger von der Verkehrsdichte des untersuchten Gebietes ab, vielmehr muss im Einzelfall entsprechend der lokalen Gegebenheiten eine passende Maßnahme umgesetzt werden.

4.2 Untersuchungsmethoden zum fahrzeugseitigen Fußgängerschutz

Die Frage, wie fahrzeugseitige Maßnahmen zum Fußgängerschutz entsprechend der Biomechanik des Fußgängerunfalls ausgelegt und angemessen getestet werden können, ist schon seit längerem Gegenstand von Untersuchungen. In der Fahrzeugsicherheit allgemein haben sich mit dem Full-Scale-Test und dem Komponententest zwei verschiedene Prüfphilosophien entwickelt. Beide lassen sich auch im Bereich der Fußgängersicherheit anwenden, haben allerdings hier spezifische Vor- und Nachteile. Im Bereich der Bewertung von Fußgängerschutzmaßnahmen am Kraftfahrzeug befassen sich nahezu alle aktuellen internationalen Aktivitäten mit dem Komponentenprüfverfahren, wobei der Prüfumfang variiert.

4.2.1 Der Full-Scale-Test

In Full-Scale-Tests, auch Globaltest genannt, wird angestrebt, das Unfallgeschehen möglichst umfassend und realitätsgetreu abzubilden. Letztendlich wird der Mensch im Unfallgeschehen durch ein Testwerkzeug ersetzt. Die dazu erforderlichen Dummys sind mechanisch komplex, erfordern eine umfangreiche Messtechnik und der Versuchsaufbau ist sehr aufwendig. Gleichzeitig sind die so entwickelten Dummys nur für einen genau definierten Einsatzzweck einsetzbar und validiert. Im Bereich der Insassensicherheitsforschung hat dies zu einer Vielzahl verschiedener Dummymodelle und -familien zur Untersuchung von Frontal-, Seiten- und Heckcrashes geführt.

Frühe Ansätze zur Erforschung des Fußgängerunfalls und seiner Kinematik und Biomechanik waren durch das Fehlen spezieller Fußgängerdummys bestimmt. Man versuchte sich dem realen Fußgänger durch die Umrüstung von geeignet erscheinenden Insassendummys anzunähern. Diese wichen jedoch in wichtigen Eigenschaften von der Biomechanik des Menschen ab. Die Eigenschaften verfügbarer, modifizierter Erwachsenendummys stimmten nicht mit den Beobachtungen in PMTO-Tests überein (Glaeser 1984). Die benutzten Fußgängermodelle weisen u.a. eine zu hohe laterale Steifigkeit auf, so dass sich eine wenig realitätsnahe Anprallkinematik einstellt. Dies führt u.a. dazu, dass die Kopfanprallstellen aus Versuchen mit Dummys und PMTOs) deutlich auseinander liegen (Heger u. Appel 1980; Glaeser 1995; Hahn 2001). Bereits zu Beginn der 80er Jahre wurden deshalb Modifizierungen an bestehenden Erwachsendummys vorgenommen. So ergänzte Glaeser bestehende Dummys mit u.a. „Seitendummy“–Brustkörben und seitlich beweglichen Kniegelenken. Die Ver-

besserungen führten zu einer besseren Abbildung der Abwickelbewegung des Dummys um die Fahrzeugkontur (Glaeser 1984). Auch Fredriksson (Fredrikson et al. 2001) verfolgte diesen Ansatz für seine Untersuchungen. Er fügte die Extremitäten eines Hybrid III – Dummys mit dem Kopf und Hals des EURO-SID, dem Oberkörper des US-SID und dem Hybrid II-Stehbecken zu einem Fußgängermodell zusammen. Dabei wurde das Knie mit Biegeelementen, ähnlich den Eigenschaften des EEVC-Beinprüfkörpers (EEVC WG 17 1998), versehen.

Insgesamt bleibt die Qualität dieser Art von Fußgängerdummys hinsichtlich der Biofidelität deutlich hinter speziellen Fußgängerdummys zurück. Die Reproduzierbarkeit von Full-Scale-Tests zum Fußgängerschutz ist mit diesen Dummys bisher nicht gewährleistet (Stürtz 1984, Eggert 1998). Selbst die Abwickellänge kann im Vergleich zu Versuchen mit PMTO nicht zuverlässig nachgebildet werden. Belastungswerte streuen außerdem sehr stark aufgrund großer lokaler Steifigkeitsunterschiede typischer Fronthauben und können nicht reproduzierbar erfasst werden. Teilweise Abhilfe kann hier möglicherweise durch die Verwendung des POLAR-Dummys geschaffen werden (s. Abb. 4.4). Dennoch bleibt auch bei einer optimalen Abbildung der Biofidelität des Fußgängers ein Grundproblem bei der Verwendung von Fußgängerdummys bestehen. Die Wahl der Kopfanprallorte ist durch die Dummygröße und die sich im Versuch ergebende Aufwurfweite festgelegt. Somit kann auch bei Verwendung mehrerer Dummygrößen nicht jeder beliebige Punkt an der Fahrzeugfront einer Kopfanprallprüfung unterzogen werden.

Der Polar II - Fußgängerdummy

Für die Analyse von speziellen Problemstellungen zur Fußgängersicherheit sollten in der rechnerischen Simulation möglichst Fußgängermodelle Anwendung finden, die durch reale Versuche validiert wurden. Dies ist bei der Verwendung von numerischen Menschmodellen nur durch die Verwendung von PMTO möglich und im Versuchsalltag nicht anwendbar. Ein speziell entwickeltes Hilfsmittel zur Untersuchung von Fußgängerunfällen existiert erst seit kurzem mit dem POLAR II-Dummy von Honda (s. Abb. 4.4). Er wurde zur Bewertung von Fahrzeugen im Full-Scale-Test entwickelt (Akiyama et al. 1999a; Akiyama et al. 1999b; Sugimoto 2002). Es existiert ein validiertes FE–Modell des POLAR II (Okamoto et al. 2000; Akiyama et al. 1999b).

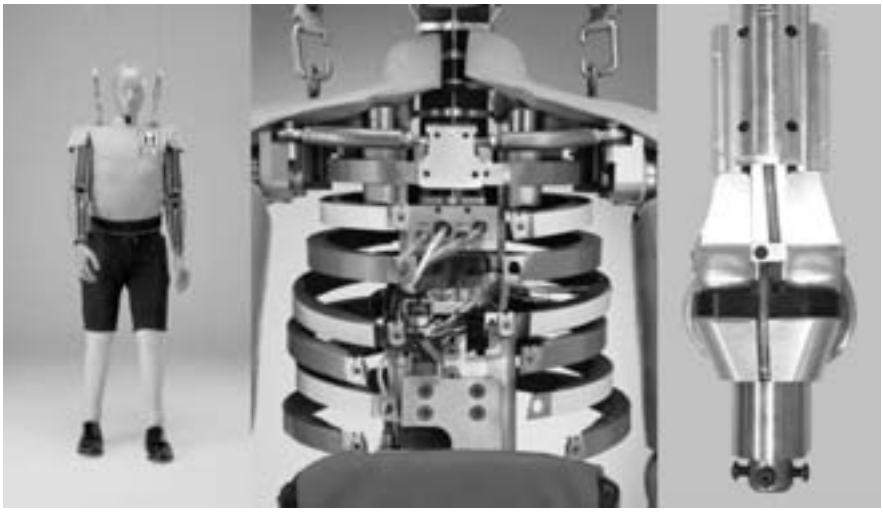


Abb. 4.4 POLAR II - Dummy der Firma Honda (links, Honda 2006). Einzeln dargestellt sind der Aufbau des Thorax (mitte) und des Kniegelenkes (rechts). Im Kniegelenk wird durch die Anordnung der Stahlbänder entsprechend der menschlichen Anatomie eine hohe Biofidelität erreicht (Honda 2006).

Das Full Body Pedestrian Model

Die numerische Simulation bietet u.a. die Möglichkeit, Erkenntnisse über Problembereiche des Fußgänger-Fahrzeug-Unfalls und mögliche Prüfverfahren zu gewinnen. Mit ihrer Hilfe können spezielle Fragestellungen beantwortet werden, ohne kosten- und zeitintensive Experimente durchführen zu müssen. Hierfür gibt es speziell für die Zwecke der numerischen Simulation entwickelte Fußgängermodelle. Nach Sicherstellung der Validität der verwendeten Modelle können aus den Erkenntnissen der numerischen Simulation Handlungsfelder und Maßnahmen zum Fußgängerschutz abgeleitet werden.

In der Simulationswelt der Mehrkörpersysteme existieren Menschmodelle kommerzieller Anbieter und universitäre Eigenentwicklungen (Yang 1997; Winata 1998). Allgemein führt die Verwendung der Mehrkörpersystemtechnik (MKS) zu kürzeren Rechenzeiten, verglichen mit den FEM[2]-basierten Fußgängermodellen. Die Aussagekraft der Mehrkörpermodelle ist den Modelleigenschaften entsprechend begrenzt, in vielen An-

[2] FE – Finite Elemente Methode; Zerlegung eines Kontinuums in Substrukturen (Finite Elemente), die geschlossen mathematisch behandelt werden können. Somit wird die numerische Analyse sehr komplexer Zusammenhänge möglich.

wendungsfällen aber dennoch zielführend (s. Tab. 4.3). Durch die Modellierung des menschlichen Körpers mit der Methode der finiten Elemente kann zukünftig die Aussagekraft der numerischen Simulation hinsichtlich der zu erwartenden Verletzungen des Fußgängers deutlich gesteigert werden, allerdings unter Inkaufnahme deutlich längerer Rechenzeiten.

Die Firma TNO vertreibt eine u.a. an PMTO-Versuchen validierte MKS-Fußgänger-Modellfamilie. Besonderes Augenmerk wurde hier auf eine gute Wiedergabe der Anprallkinematik gelegt. Die Beine des Modells verfügen über die Möglichkeit, an der Tibia und dem Femur zu brechen. Dadurch kann die Anprallkinematik und Energieaufnahme eines Fußgängers exakter nachgebildet werden. Zusätzlich stehen an mehreren Stellen Messpunkte zur Auswertung von Beschleunigungen, Kräften und Momenten bereit. Es existieren 5 verschiedene Modelle, die eine so genannte Modellfamilie bilden (s. Abb. 4.5).

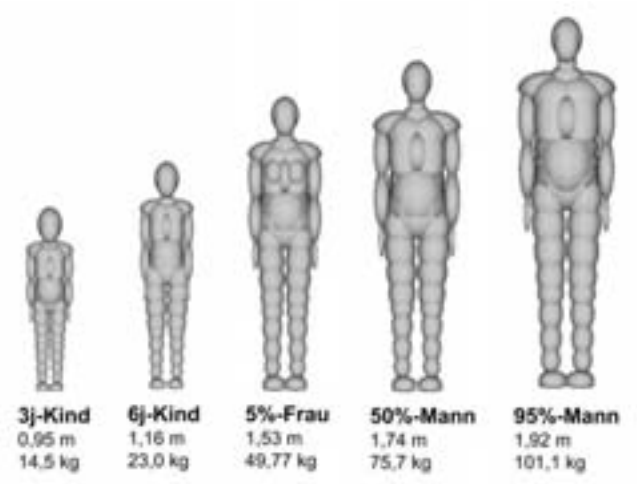


Abb. 4.5 Die Familie der Full Body Pedestrian Modelle mit Angaben zu Größe und Gewicht (Lange u. Happee 2001).

Das Fußgängermodell ist primär auf den lateralen Lastfall ausgelegt worden (Lange u. Happee 2001). Die Realitätsnähe der mit dem Modell gewonnenen Ergebnisse kann anhand eines mitgelieferten Datenblattes eingeschätzt werden (s. Tab. 4.3). Aussagen zur Anprallkinematik und Aufwurfweite des Fußgängers können sehr gut mit diesem Modell getroffen werden, die Kopfanprallgeschwindigkeiten werden im Trend richtig abgebildet. Konkrete Aussagen zu Verletzungen an bestimmten Körperteilen können mit diesem Modell nicht getroffen werden, da das benutzte

Starrkörperkontaktmodell in MADYMO[3] nur mit globalisierten Kräften arbeitet.

Tabelle 4.3 Validierungstand und Abbildungsgüte des TNO Pedestrian Models (nach Hahn 2006, s. auch Hoof, 2006).

		Erwachsenen-Modell		Kinder-Modell		
Signal	Modell-tendenzen	Trends	Absolute Werte	Trends	Absolute Werte	Bemerkungen
Kopfbeschleunigung	↗	Ja	Nein	Ja	Nein	durchschnittliche Überbewertung: +22%
HIC		Ja	Nein	Ja	Nein	nicht validiert
Kopfbewegung und Anprallpunkt	→	Ja	Ja	Ja	Ja	geprüft in Ishikawa und INRETS Simulationen
Kopfkontaktzeit	↗	Ja	Ja	Ja	Ja	geringer Zeitverzug, durchschn. Überbewertung + 5%
Kopfanprall-geschwindigkeit	↗	Ja	Nein	Ja	Nein	sehr wenige Daten verfügbar, durchschn. Überbewertung –20%
Kopfanprallwinkel	→	Ja	Nein	Ja	Nein	visueller Vergleich
Brusteindrückung	→	Ja	Nein	Ja	Nein	validiert in Impaktortests, unterschiedliche Fußgängerbelastung
Brustbeschleunigung	↘	Ja	Nein	Ja	Nein	durchschn. Unterbewertung: 36%
Brustanprall-zeitpunkt	↗	Ja	Nein	Ja	Nein	durchschn. Überbewertung +36%
Kraft auf Lenden-wirbelsäule		Ja	Nein	Ja	Nein	keine experimentellen Daten verfügbar, Trendaussage aufgrund der Gesamtkinematik möglich
Moment in Lendenwirbelsäule		Ja	Nein	Ja	Nein	keine experimentellen Daten verfügbar, Trendaussage aufgrund der Gesamtkinematik möglich
Beckenanprallpunkt	→	Ja	Ja	Ja	Nein	in INRETS Simulationen geprüft
Kraft bei Beckenanprall	↘	Nein	Nein	Nein	Nein	keine verläßlichen Parameter
Beckenbeschleu-nigung (Spitzenwert)	↗	Ja	Nein	Ja	Nein	durchschnittliche Unterbewertung = 39%
Beschleunigungs-verlauf des Beckens	↗	Ja	Nein	Ja	Nein	durchschnittliche Überbewertung = +10%

↗ überbewertend → übereinstimmend ↘ unterbewertend

FE-Menschmodelle

Modelle des Menschen auf Basis der Methode der finiten Elemente (FE-Methode) finden immer öfter Anwendung, um die Verletzungsmechanik als Fahrzeuginsasse oder Fußgänger numerisch zu analysieren. Durch die

[3] MADYMO – Mehrkörpersimulationssystem der Firma TNO

Eigenschaften der FE-Methode können z. B. lokale Verletzungen (Brüche, Quetschungen etc.) besser als mit Mehrkörpermodellen vorhergesagt werden (Koch 2002). Das Versagen der Struktur kann direkt im Modell beobachtet werden und muss nicht aus entsprechenden Belastungsgrößen gefolgert werden. FE-Modelle bieten den Vorteil, bei entsprechend genauer Modellierung, vielfältige Lastfälle abdecken zu können. Das FE-Menschmodell THUMS (Total Human Model for Safety) ist ein besonders hoch entwickeltes Modell (s. Abb. 4.6). Es wurde zur besseren Abbildung des Menschen für Fahrzeuginsassensimulationen und Fußgängeranwendungen von Toyota entwickelt.

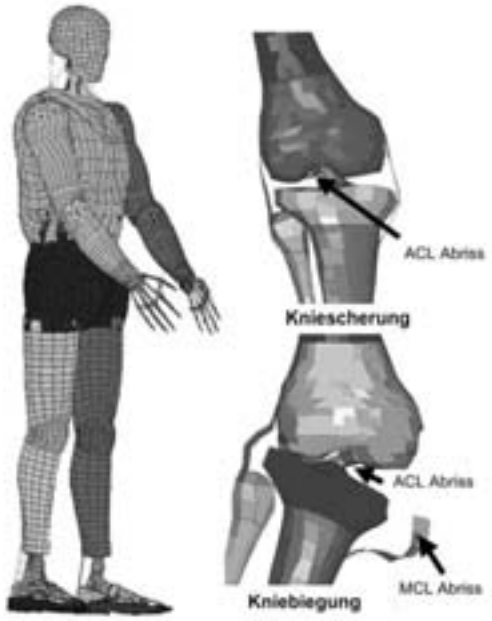


Abb. 4.6 Das von Toyota entwickelte THUMS-Fußgänger-Modell. Besondere Beachtung fand die realistische Modellierung des Bänderapparates im Knie, um Verletzungen durch Biegung und Scherung realistisch abbilden zu können (Toyota Central R&D Labs 2006).

Das Modell besteht aus 60000 Knoten, die 83500 Elemente verbinden. Dabei kommen 1000 verschiedene Materialgruppen zum Einsatz. Speziell für die Fußgängeranwendung wurde THUMS auf den lateralen Lastfall durch die Kollision mit einer Fahrzeugfront validiert. Das entstandene Fußgängermodell soll es ermöglichen, Verletzungen der unteren Extremitäten und die Gesamtkinematik des Fußgängers genauer vorherzusagen

(Maeno u. Hasegawa 2001; Muser 2006). Neuere Untersuchungen mit dem THUMS-Modell belegen den signifikanten Einfluss der Fahrzeugfrontgeometrie auf die Entstehung von Bein- und Beckenverletzungen (Muser 2006).

Auch auf europäischer Ebene entstanden FE-Menschmodelle im Rahmen der Forschungsprojekte HUMOS uns HUMOS2.

4.2.2 Der Komponententest

Komponententests bilden im Gegensatz zu den Full-Scale-Tests nur einen kleinen Ausschnitt des Gesamtunfallgeschehens ab. Nur fundierte Kenntnisse über das Unfallgeschehen und seine Biomechanik lassen sinnvolle Rückschlüsse aus den Ergebnissen auf das Gesamtgeschehen zu. Bei einfachen Zusammenhängen liefern Komponententests gute Ergebnisse und sind in der Fachwelt etabliert. Ein Beispiel ist die Überprüfung der Gurtverankerungspunkte im Fahrzeuginnenraum mittels eines statischen Zugversuchs nach ECE-R14[4]. Die heutigen Komponententestverfahren zum Fußgängerschutz beschränken sich auf die Abbildung des Kopf-, Bein- und Beckenanpralls an die Fahrzeugfront (s. Kap. 4.3). Bei einem kinematisch komplizierteren Vorgang wie dem Fußgängerunfall sind die herkömmlichen Komponententests mit starren Prüfparametern für manche Konstellationen nicht zutreffend und können das Fußgängerunfallgeschehen mit seiner Vielzahl von Variationen nicht ausreichend genau abbilden.

Die richtige Wahl der Masse des Prüfkörpers in einem Komponententest ist eine entscheidende Grundvoraussetzung, um realitätsnahe Prüfergebnisse zu erzielen. So hängt die Kopfprüfkörpermasse von der Größe des Fußgängers ab und es ergeben sich mit steigender Aufwurfweite (WAD) zunehmende Prüfkörpermassen. Entsprechende Untersuchungen zur Anthropometrie des Menschen wurden vor allem in der Sportmedizin durchgeführt und können bei der Wahl der Prüfkörpermassen berücksichtigt werden.

[4] ECE-R14 – Economic Commission for Europe – Regulation 14: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Personenkraftwagen hinsichtlich der Verankerung der Sicherheitsgurte.

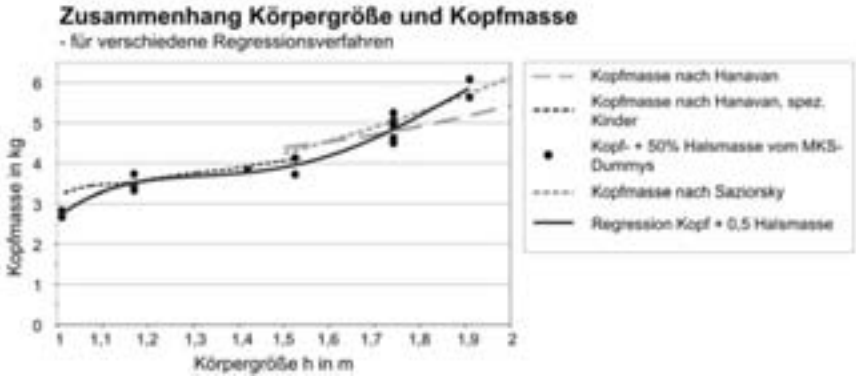


Abb. 4.7 Zusammenhang zwischen Körpergröße und Kopfmasse für verschiedene Regressionsverfahren. Zusätzlich sind Kopfmassen (inkl. 50 % der Halsmasse) aktueller TNO-Dummymodelle eingetragen (nach Fröming 2003).

Ein bisheriger Kritikpunkt am Prüfverfahren nach EEVC WG 17, Phase II, ist die Prüfung der Fronthaube mit zwei Kopfprüfkörpern unterschiedlicher Masse. Die Prüfkörpermasse von 2,5 kg repräsentiert nur einen kleinen Ausschnitt der verunfallten Kinder und dementsprechend nur einen kleinen Anprallbereich an der Fahrzeugfront. Der in der Phase I im Haubenbereich verwendete, 3,5 kg schwere Kopfprüfkörper repräsentiert die Kopfmassen der im Haubenbereich auftretenden Kopfanprallorte besser.

Wendet man den in Abb. 4.7 gezeigten Zusammenhang zwischen Fußgängergröße und Kopfmasse auf das In-Depth-Unfalldatenmaterial (s. Abschn. 1.3) an, so lassen sich aus den Körpergrößen der verunfallten Fußgänger ihre mittleren Kopfmassen bestimmen. Mit den in der derzeit gültigen Phase I der Fußgängerschutzgesetzgebung verwendeten Prüfkörpermassen von 3,5 kg im Haubenbereich und 4,8 kg im Scheibenbereich können bereits über 77 % der verunfallten Fußgänger durch adäquate Prüfkörpermassen abgedeckt werden[5]. Die Verwendung eines 4,5 kg schweren Erwachsenenkopfprüfkörpers anstelle des 3,5 kg schweren Prüfkörpers zeigt mit 81 % eine geringfügig verbesserte Abdeckung der im realen Unfallgeschehen auftretenden Kopfmassen. Unter der Annahme üblicher Aufwurfweiten konnte in Untersuchungen ein statistisch fundierter Einsatzbereich der 3,5 kg Prüfkörpers bis zu einer WAD von 1,77 m ermittelt werden. Die Prüfung des Haubenbereiches mit einem 3,5 kg Prüfkör-

[5] Hierbei wird ein Vertrauensbereich von ±0,5 kg angenommen, innerhalb dessen der Impaktor noch die theoretisch notwendige Prüfkörpermasse repräsentiert.

per ist somit für die meisten Fahrzeuge praktikable Annäherung an die Realität (Fröming 2003).

Fazit

Die in Tabelle 4.4 zusammengetragenen Haupteigenschaften der beiden grundlegenden Prüfphilosophien sind systemimmanent, und auch Weiterentwicklungen lassen nicht auf eine grundsätzliche Beseitigung der jeweiligen Nachteile hoffen.

Tabelle 4.4 Vergleich der beiden grundlegenden Prüfphilosophien (Kühn 2002).

	Full-Scale-Testverfahren	Komponententestverfahren
Kosten pro Versuch	hoch	niedrig
Zeitaufwand	hoch, viel Vor- und Nachbereitungszeit erforderlich	niedrig
Reproduzierbarkeit	mäßig, besonders bei Fußgängerdummys, starke Einschränkungen bei der Wahl der Prüforte	sehr gut, Prüforte z. B. für den Kopfanprall können vollkommen frei gewählt werden
Vorhersagbarkeit der Versuchsergebnisse durch numerische Simulation	mäßig, geringe Abweichungen in der Kinematik führen aufgrund lokaler Steifigkeitsunterschiede zu sehr unterschiedlichen Messungen	gut, da Prüfbedingungen genau festgelegt sind
Wissensbedarf über das zugrunde liegende Unfallgschehen	gering, Test liefert im Idealfall z. B. Kinematikwissen	hoch, für realistische Prüfbedingungen muss Kinematikwissen unabhängig ermittelt werden

Der Komponententest stellt heutzutage unter den aufgezeigten Randbedingungen die sinnvollste Prüfmöglichkeit für die Fahrzeugfront dar. Durch den Mangel an kurzfristig einsetzbaren, genügend biofidelen Fußgängerdummys ist der Full-Scale-Test zurzeit keine sinnvolle Alternative, was sich auch mittelfristig nicht ändern wird. Die Biofidelität der verwendeten Prüfkörper und die Realitätsnähe der Prüfbedingungen muss im Vorfeld der Einführung von Komponententestverfahren durch umfangreiche anthropologische, biomechanische und unfallstatistische Untersuchungen sichergestellt werden.

4.3 Gesetzgebung und Verbraucherschutz

Die Nachfrage des Marktes ist ein wirkungsvoller Anreiz für die Schaffung von Angeboten zur Verbesserung der Fahrzeugsicherheit. Beispiele hierfür sind die Einführung von ABS, ESP und anderen Fahrdynamiksystemen sowie die Erfolgsgeschichte des Airbags. Hinzu kommt der Einfluss von Zeitschriften und Verbraucherorganisationen. Trotzdem sind gesetzliche Regelungen weiterhin sehr wichtig. Sie dienen dazu, einen Mindeststandard für alle Fahrzeuge festzulegen, der später in der Praxis von vielen Produkten bei weitem übertroffen wird. Die Entwicklung solcher Regelungen auf europäischer Ebene erweist sich als sehr schwierig. Global gültige Regelungen sind erst in Einzelfällen zustande gekommen. In den letzten Jahren werden alternativ oder ergänzend industrielle Selbstverpflichtungen diskutiert, die schneller und flexibler zum Einsatz kommen können.

4.3.1 Gesetzgebung in Europa

Am 17.11.2003 haben das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union die Richtlinie 2003/102/EG zum Schutz von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern vor und bei Kollisionen mit Kraftfahrzeugen erlassen (Europäische Union 2003). Sie trat am 1. Januar 2004 in Kraft. Im Sinne dieser Richtlinie bedeutet „Fahrzeug“ jedes Kraftfahrzeug der Kategorie M_1[6] mit einem zulässigen Gesamtgewicht bis 2,5 Tonnen und N_1[7] abgeleitet von M_1 –Fahrzeugen mit einem zulässigen Gesamtgewicht bis 2,5 Tonnen. Neuzertifizierungen[8] müssen bereits seit Oktober 2005 die Anforderungen der Phase I erfüllen und ab September 2010 die Anforderungen der Phase II (s. Abb. 4.8). Ab Dezember 2012 ist in den Mitgliedstaaten dann die Zulassung, der Verkauf und die Inbetriebnahme von Neuwagen untersagt, wenn diese die Komponententests der Phase I nicht erfüllen. Schließlich müssen alle Neuwagen ab dem 1. September 2015 den Komponententest der Phase II erfüllen, um eine EU-Typzulassung oder eine nationale Typzulassung zu bekommen.

---

[6] Kategorie M-Fahrzeuge - Alle Fahrzeuge mit vier Rädern, die dem Zweck dienen Personen zu transportieren; M_1-Fahrzeuge: Fahrzeuge zum Personentransport mit max. acht Sitzen, ausgenommen dem Fahrersitz.

[7] Kategorie N-Fahrzeuge –Fahrzeuge mit mindestens vier Rädern, die dem Zweck dienen Güter zu transportieren; N_1-Fahrzeuge: Fahrzeuge die dem Zweck dienen Güter zu transportieren mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 3,5t.

[8] Neuzertifizierungen – Homologation eines neuen Fahrzeugmodells, Facelifts und abgeleitete Karosserievarianten gelten i. d. R. nicht als Neuzertifizierungen.

Die Richtlinie bezieht sich auf die Frontfläche von Fahrzeugen. Sie enthält einen zweistufigen Ansatz ähnlich der ACEA-Selbstverpflichtung (Europäische Union 2003). Die Prüfungen in der Richtlinie entsprechen in der ersten Phase den Vorschlägen nach ACEA. In der zweiten Phase entsprechen sie noch den Bedingungen der Arbeitsgruppe 17 der EEVC. Derzeit unterliegt die zweite Phase einer Überprüfung. Basierend auf einem Vorschlag der Kommission (Preliminary Draft Proposal 2005) der sich aus einer Befragung zur Machbarkeit der zweiten Phase der Richtlinie im Sommer 2004 ergab (TRL 2004), wird der Inhalt hinsichtlich der Ausrüstung aller Fahrzeuge mit Bremsassistenten und bezüglich spezieller Regelungen zu den Testbedingungen überprüft (Europäische Union 2005). Der erste Vorschlag der Kommission für die Ausgestaltung der Phase II wurde vom Parlament abgelehnt, so dass sich der Prozess bis voraussichtlich Ende 2006 verzögern wird.

Abb. 4.8 Zeitplan zur Einführung von Phase I sowie Phase II der europäischen Fußgängerschutzgesetzgebung (DaimlerChrysler 2006).

Phase I

Seit Oktober 2005 müssen alle neuen Fahrzeugtypen (Neuzertifizierungen) die Anforderungen der Komponententests der Phase I erfüllen, um eine EC-Typzulassung oder eine nationale Zulassung zu bekommen (s. Abb. 4.9 u. 4.10). Die Prüfung der Haubenvorderkante und des Windschutzscheibenbereiches erfolgt lediglich zur Beobachtung und ist nicht zulassungsrelevant.

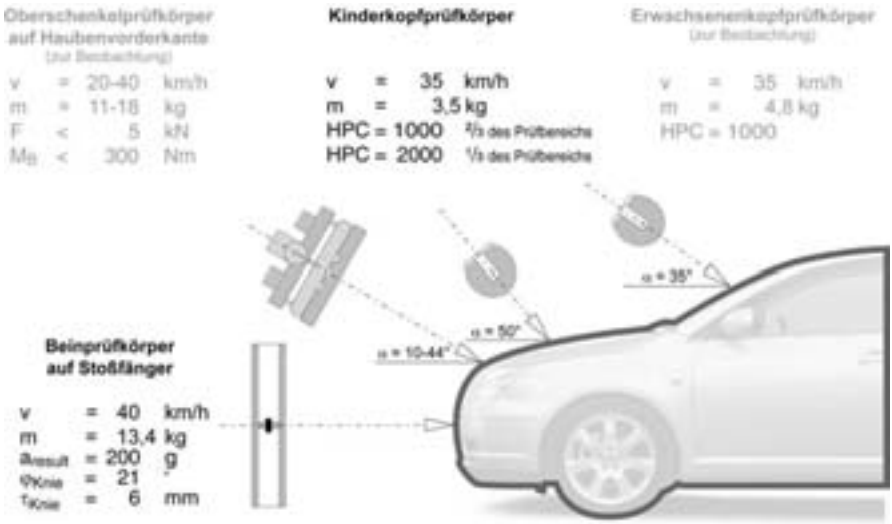


Abb. 4.9 Komponententest der Phase I. Die Kopf- und Beinprüfungen entsprechen dem ACEA-Vorschlag. Der Oberschenkel- und die Erwachsenenkopfprüfung im Scheibenbereich erfolgen nur zur Beobachtung und sind nicht zulassungsrelevant.

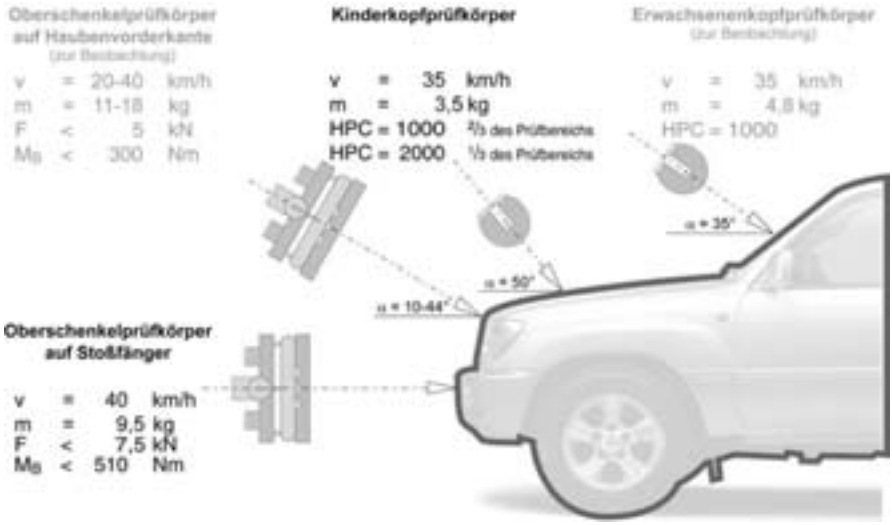


Abb. 4.10 Komponententest der Phase I für Fahrzeuge mit einer Stoßfängerunterkantenhöhe von mehr als 500 mm. In diesem Fall kann anstatt des Beinprüfkörpers der Oberschenkelprüfkörper gegen den Stoßfänger geschossen werden. Der Oberschenkel- und die Erwachsenenkopfprüfung im Scheibenbereich erfolgen auch hier nur zur Beobachtung und sind nicht zulassungsrelevant.

Phase II

Ab September 2010 müssen alle neuen Fahrzeugtypen (Neuzertifizierungen) die Komponententests der Phase II erfüllen, um eine EC-Typzulassung oder eine nationale Zulassung zu bekommen. Weiterhin legt die Richtlinie fest, dass die Kommission den industriellen Fortschritt auf dem Gebiet des Fußgängerschutzes überwachen wird. Bis zum 1. Juli 2004 wurde eine unabhängige Bewertung der Durchführbarkeit der Bestimmungen des von der EEVC WG 17 aufgestellten Komponententests der II. Phase und speziell alternativer Maßnahmen durchgeführt. Ein Ergebnis dieses Prozesses ist ein alternativer Vorschlag für bestimmte Parameter des Komponententests der Phase II der Europäischen Gesetzgebung (s. Abb. 4.11, Preliminary Draft Proposal 2005).

Die Prüfbedingungen für die Kopfanprallprüfung wurden gelockert und der Oberschenkeltest an der Haubenvorderkante dient weiterhin nur zur Beobachtung. Im Gegenzug sollte der Einsatz des Bremsassistenten in allen neuen Fahrzeugen ab 2008 vorgeschrieben werden. Dieser Vorschlag stellte einen Kompromiss dar, um die Durchführbarkeit des Tests zu gewährleisten (TRL 2004). Er wurde vom EU-Parlament allerdings nicht angenommen. Somit gilt bis auf weiteres die ursrpüngliche Fassung der Phase II der Richtlinie 2003/102/EG (s. Abb. 4.12 u. 4.13).

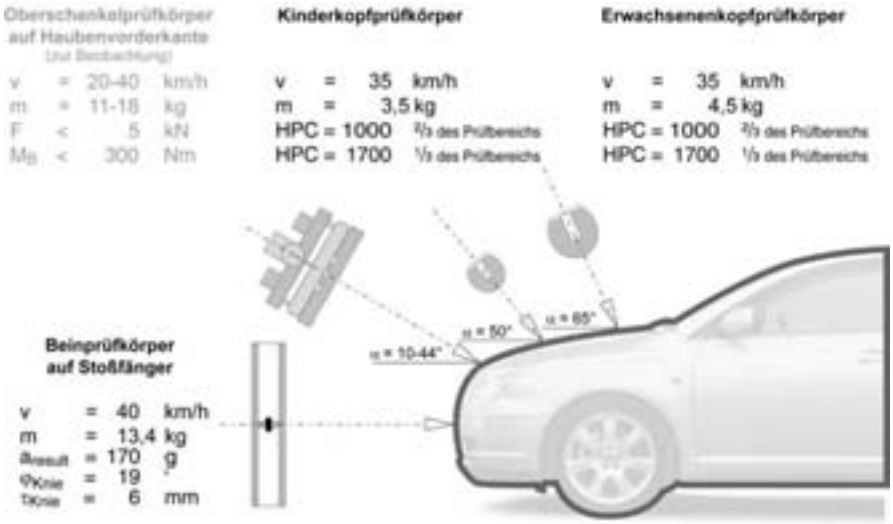


Abb. 4.11 Kompromissvorschlag für einen Komponententest der zweiten Phase. Die Oberschenkelprüfung ist nur zur Beobachtung und nicht zulassungsrelevant.

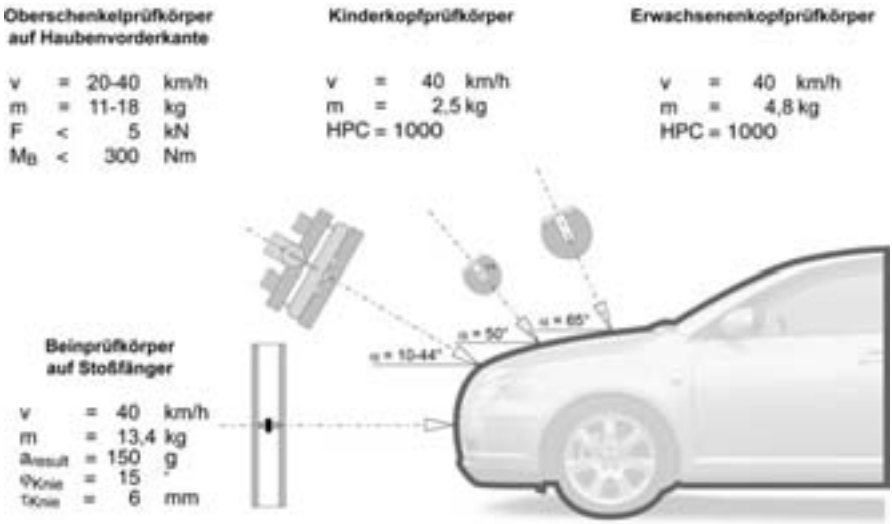


Abb. 4.12 Komponententest der Phase II, wie er in der Richtlinie 2003/102/EG beschrieben ist. Die Kopf-, Oberschenkel- und Beinprüfungen entsprechen dem EEVC WG17-Vorschlag. Alle vier Tests sind zulassungsrelevant.

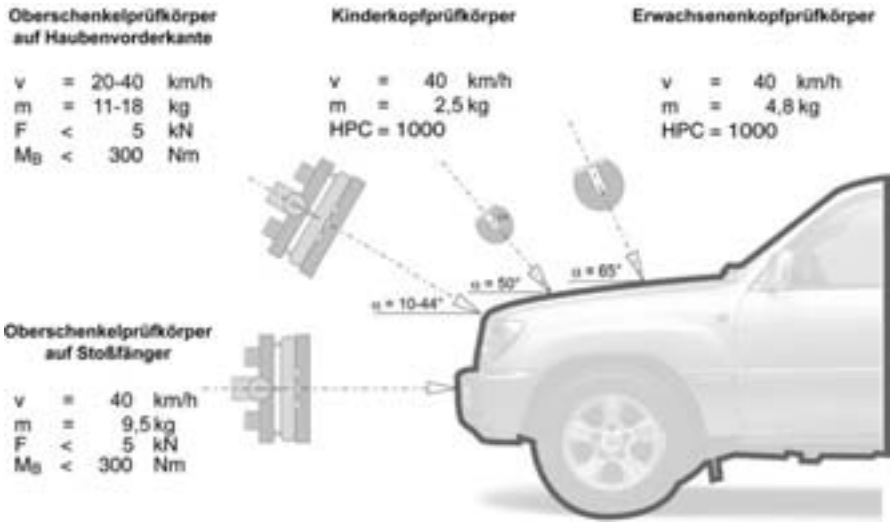


Abb. 4.13 Komponententest der Phase II für Fahrzeuge mit einer Stoßfängerunterkantenhöhe von mehr als 500 mm, wie er in der Richtlinie 2003/102/EG beschrieben ist. In diesem Fall kann anstatt des Beinprüfkörpers der Oberschenkelprüfkörper gegen den Stoßfänger geschossen werden. Alle vier Tests sind zulassungsrelevant.

Beschreibung der Komponententests gemäß der europäischen Richtlinie 2003/102/EG

Das in der Richtlinie beschriebene Prüfverfahren ist als Komponententest konzipiert. Hierbei werden Prüfkörper zur Beurteilung der Fahrzeugfront herangezogen, die den Kopf, den Oberschenkel und das Bein eines Menschen repräsentieren. Damit soll der typische Anprallvorgang eines Fußgängers mit dem Fahrzeugvorderwagen simuliert werden:

- Anprall des Beines eines Erwachsenen von der Seite an den Stoßfänger
- Anprall des Oberschenkels und der Hüfte eines Erwachsenen von der Seite an die Haubenvorderkante
- Anprall des Kopfes von Kindern und Erwachsenen auf die Haube

Die gewählten Prüfkörper und Prüfbereiche sollen dabei die häufigsten Verletzungen und deren fahrzeugseitige Ursachen erfassen. Insbesondere Oberschenkel- und Hüftverletzungen durch die Haubenvorderkante sind jedoch bei neueren Fahrzeugen kaum mehr anzutreffen, obgleich die Prüfung der Haubenvorderkante nach Vorschrift heutige Fahrzeuge vor große Probleme stellt.

Anprall des Beinprüfkörpers

Voraussetzung für eine realistische Prüfung ist die Abbildungsgüte des Prüfkörpers. Da besonders das Knie im realen Unfallgeschehen häufig verletzt wird, muss sich dieser Umstand auch in der Konstruktion des Prüfkörpers wieder finden. Die Relevanz dieses Komponententests kann im Hinblick auf den herausragenden Einfluss der vorderen Stoßstange als ersten Berührungspunkt des Fußgängers mit dem Fahrzeug, als hoch eingestuft werden. In der Fachwelt wird aktuell die Diskussion über die Biofidelität des Beinprüfkörpers vor dem Hintergrund der Entwicklung neuer, flexibler Beinimpaktoren in Japan geführt. Diese sind derzeit noch in der Erprobung und werden kontinuierlich weiterentwickelt.

Der Beinprüfkörper gemäß der europäischen Fußgängerschutzrichtlinie wurde vom französischen Forschungsinstitut INRETS[9] entwickelt. Er besteht aus zwei Segmenten (Tibia und Femur) mit einer Gesamtlänge von 926 mm. Beide Segmente sind durch zwei stählerne, deformierbare Knieligamente miteinander verbunden (s. Abb. 4.14). Der Prüfkörper ist mit einer Schaum- und Neoprenschicht umhüllt und wiegt 13,4 kg. Der Stoßkörper wird mit 40 km/h frei fliegend auf die Fahrzeugfront geschossen.

[9] INRETS - Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité

Gemessen werden der Biegewinkel und die Scherung im Knieelement sowie die Beschleunigung im unteren Segment (Tibiabeschleunigung).

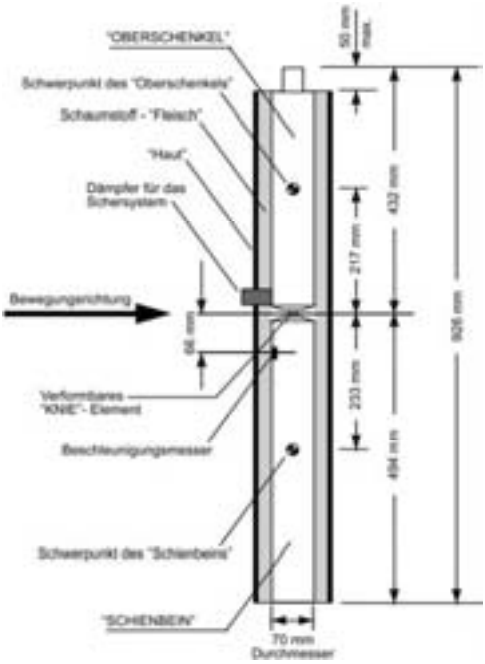


Abb. 4.14 Gemäß der Richtlinie zu verwendender Beinprüfkörper (Europäische Union 2003).

Die Prüfung mit dem Beinprüfkörper wird unabhängig von der Fahrzeugfrontgeometrie immer mit den gleichen Parametern durchgeführt. Es sind mindestens drei Tests je Fahrzeug vorgeschrieben. Die Festlegung des Prüfbereiches ist in der Richtlinie detailliert beschrieben. Der Stoßfängerprüfbereich wird in drei gleiche Teile geteilt, so dass je ein Test in jedem Drittel (mitte, rechts, links) durchzuführen ist. Die ausgewählten Testpunkte sollen verschiedene Strukturen im Stoßfängerbereich hinsichtlich ihrer Fußgängerkompatibilität bewerten. Die Prüfprozedur sieht u.a. vor, dass die Testpunkte mindestens 132 mm voneinander entfernt sind und sich in einem Abstand von mindestens 66 mm zu den vorher festgelegten Stoßfängerecken befinden.

Falls die untere Stoßfängerhöhe an der ausgewählten Stelle 500 mm überschreitet, kann der Test ausgelassen werden und es wird alternativ ein Oberschenkel-Stoßfängertest durchgeführt. Dies ist ein horizontaler Oberschenkeltest, der mit 40 km/h durchgeführt wird. Dazu wird der herkömm-

liche Oberschenkel-Prüfkörper mit einer Masse von 9,5 kg benutzt (s. Abb. 4.15 und 4.16).

Anprall des Oberschenkelprüfkörpers

Der Stoßkörper für den Oberschenkel wurde von TRL[10] entwickelt. Er wird oft auch als Hüftimpaktor bezeichnet. Er besteht aus einem 350 mm langen Rohr mit 50 mm Durchmesser. Das Rohr ist von einer 50 mm dicken Schaumschicht umgeben, die wiederum von einer Neoprenschicht umhüllt wird (s. Abb. 4.15). Ausgewertet wird die Kraft zwischen Rohr und Führungseinheit, also die Summe aus den an den beiden Rohrenden gemessenen Kräften. Weiterhin wird das Biegemoment im Rohr an drei verschiedenen Stellen gemessen. Dieser Test ist in Phase I nicht zulassungs-relevant. Die Tests werden zur Beobachtung durchgeführt, um ungünstige Entwicklungen in diesen Bereichen der Fahrzeugfront zu erkennen.

Es sind mindestens drei Tests je Fahrzeug vorgesehen (mitte, rechts, links). Es sollen die Prüfstellen gewählt werden, von denen nach Meinung des Prüfers die größte Gefahr ausgeht. Dabei wird u.a. in der Prüfvorschrift festgelegt, dass die Prüfstellen mindestens 150 mm auseinander liegen und sich mindestens 75 mm innerhalb der geometrisch festgelegten Grenzen befinden (Europäische Union 2003).

Der entscheidende Unterschied zu den anderen Prüfprozeduren ist hierbei, dass die Masse, die Geschwindigkeit und der Aufprallwinkel des geführten Stoßkörpers von der Fahrzeugfrontgeometrie abhängen. Diese Werte werden in Abhängigkeit der Höhe der Haubenvorderkante und des Haubenrückversatzes vorgegeben. (s. Abb. 4.15 und 4.16). Die unzureichend nachvollziehbare Entstehung der Nomogramme und die unzureichende Abbildung der Aufrutschkinematik des Fußgängers werden oft als Kritikpunkte des Oberschenkel-Prüfverfahrens genannt. Auch das mit den Oberschenkelprüfungen erzeugte Deformationsbild am Fahrzeug sowie die ermittelten Belastungsgrößen korrelieren nur unzureichend mit Beobachtungen im realen Unfallgeschehen.

[10] TRL – Transport Research Laboratory, Großbritannien.

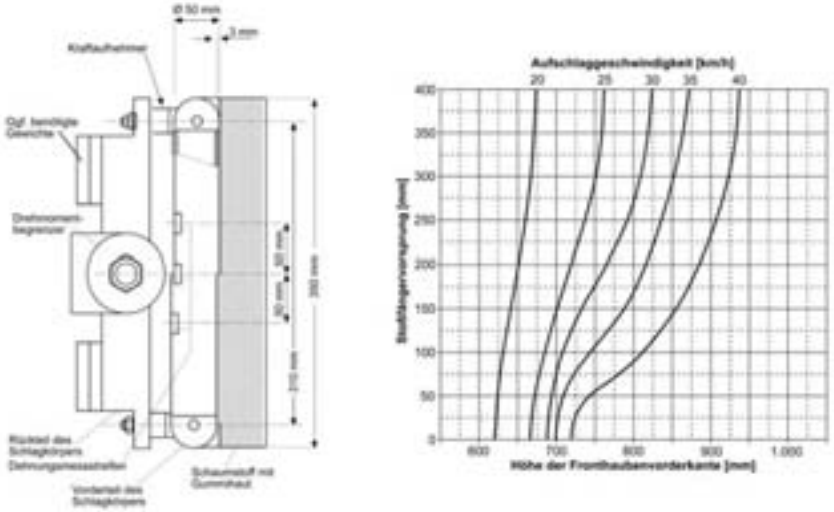


Abb. 4.15 Gemäß der Richtlinie zu verwendender Oberschenkelprüfkörper (links) und anzuwendende Prüfgeschwindigkeit (rechts) in Abhängigkeit der Fahrzeugform (Europäische Union 2003)

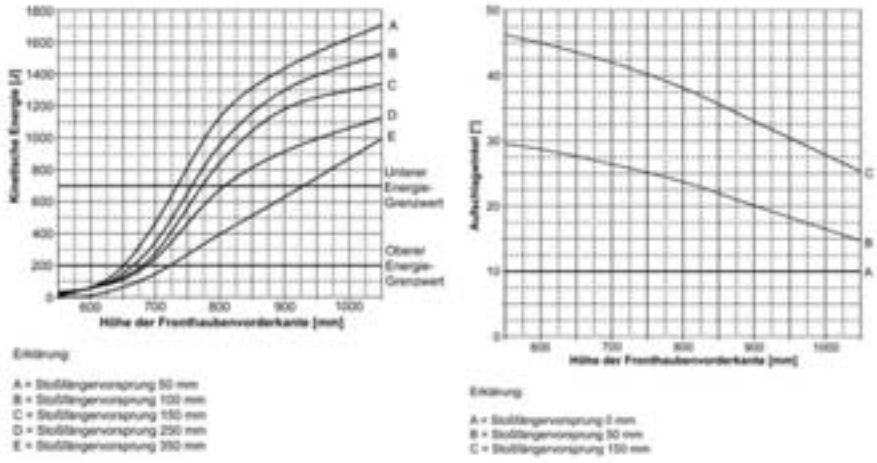


Abb. 4.16 Kinetische Energie (links) und Prüfwinkel (rechts) des Oberschenkelprüfkörpers beim Anprall in Abhängigkeit der Fahrzeugform. Aus der Prüfgeschwindigkeit und der kinetischen Energie wird die Masse des Prüfkörpers errechnet (Europäische Union 2003).

Anprall des Kopfprüfkörpers

Unfalldaten haben gezeigt, dass der Kopf die Region des Körpers ist, die am häufigsten lebensbedrohlich schwere Verletzungen erleidet. Dies gilt für Kinder und Erwachsene gleichermaßen. Die Köpfe realer Personen unterscheiden sich aber erheblich im Gewicht und stellen damit unterschiedliche Anforderungen an die Steifigkeit der Fahrzeugstrukturen. Aus diesem Grund werden für Kinder- und Erwachsenenkopf unterschiedliche Prüfkörper angewendet, die jeweils auf verschiedene Stellen der Motorhaube geschossen werden. Dabei werden in den beiden Phasen der Richtlinie nochmals unterschiedliche Prüfkörper für den Kinderkopf vorgeschrieben. In der ersten Phase wird für den zulassungsrelevanten Test der Motorhaube ein 3,5 kg schwerer Prüfkörper verwendet. Er hat einen Durchmesser von 165 mm (s. Abb. 4.17). Dieser Prüfkörper soll Kinder und kleine Erwachsene repräsentieren. Unabhängig von der Fahrzeugfrontgeometrie wird der Test mit einer Geschwindigkeit von 35 km/h unter einem Winkel von 35° durchgeführt.

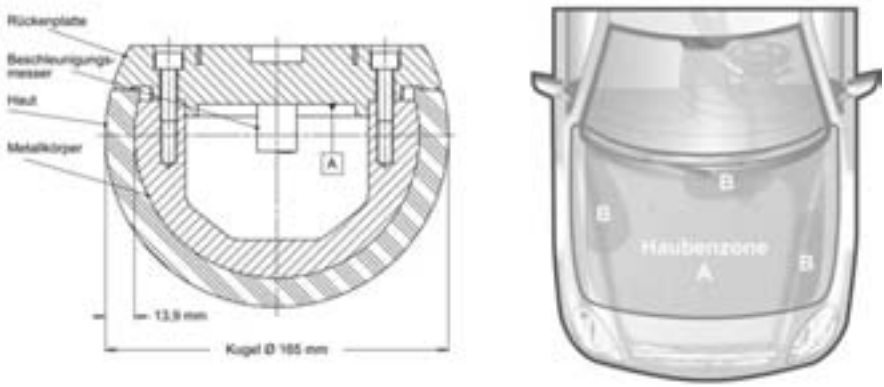


Abb. 4.17 In Phase I zu verwendender Prüfkörper mit einer Masse von 3,5 kg und einen Durchmesser von 165 mm (links) und beispielhafte Darstellung des Prüfbereiches der Haube (rechts) mit den Zonen A und B (Europäische Union 2003).

Die Haube wird vom Fahrzeughersteller in zwei Zonen A und B unterteilt, die 2/3 bzw. 1/3 der Fläche der Haube einnehmen. Im Bereich der Zone A ist ein Grenzwert von HIC = 1000 und in der Zone B ein Grenzwert von HIC = 2000 einzuhalten. Unter den 18 durchzuführenden Tests sollen 12 in der Zone A und 6 in der Zone B liegen. Die Prüfvorschrift sieht u.a. vor, dass die Prüfpunkte mindestens 165 mm auseinander liegen und sich mindestens 82,5 mm innerhalb der seitlichen Prüfbereichsbegren-

zung sowie 82,5 mm vor der Haubenhinterkante befinden. Außerdem sind die Prüfpunkte so zu wählen, dass sie 165 mm hinter der Haubenvorderkante liegen.

Nicht zulassungsrelevant ist ein weiterer durchzuführender Test eines Kopfprüfkörpers gegen die Frontscheibe, er dient ebenfalls der Beobachtung. Dabei wird ein 4,8 kg schwerer Prüfkörper mit einem Durchmesser von 165 mm gegen den Prüfpunkt in einem definierten Bereich der Frontscheibe geschossen (s. Abb. 4.18). Die Testparameter sind fahrzeugfrontunabhängig auf einen Anprallwinkel von 80° und eine Prüfgeschwindigkeit von 35 km/h festgesetzt.

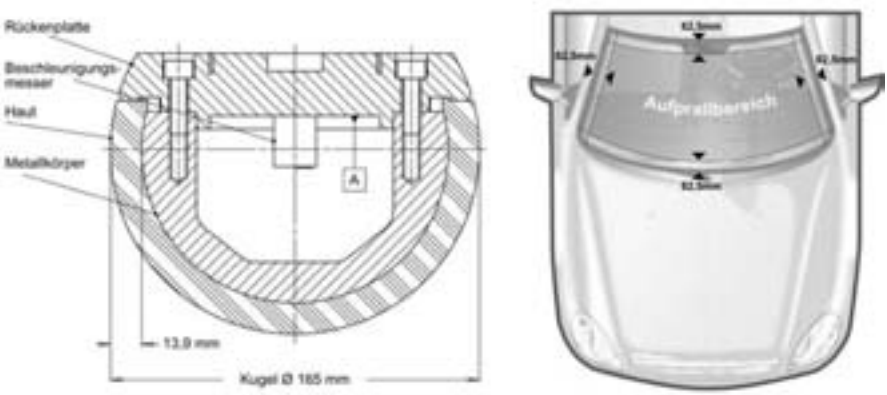


Abb. 4.18 In der Phase I zur Prüfung im Scheibenbereich zu verwendender Kopfprüfkörper mit einer Masse von 4,8 kg und einem Durchmesser von 165 mm (links) sowie sein Prüfbereich auf der Frontschutzscheibe (rechts) für den in der Phase I durchzuführenden, nicht zulassungsrelevanten Kopfprüfkörpertest (European Union 2003).

Europäische Richtlinie über die Verwendung von Frontschutzsystemen an Fahrzeugen

Untersuchungen haben gezeigt, dass ungeschützte Verkehrsteilnehmer bei Unfällen mit Geländefahrzeugen, die mit Frontschutzbügeln ausgestattet sind, deutlich stärker gefährdet sind als bei Kollisionen mit herkömmlichen Fahrzeugen (s. Abb. 4.19). Eine Studie der Bundesanstalt für Straßenwesen konnte nachweisen, dass bei solchen Fahrzeugen eine deutlich erhöhte Gefährdung für den Kopf von Kindern und für die Oberschenkel und das Becken von Erwachsenen besteht (Zellmer u. Schmid 1995).

Abb. 4.19 Darstellung der Größenverhältnisse an einer Pkw- und Geländewagenfront für ein Kind und einen Erwachsenen (nach Zellmer u. Schmid 1993).

Demnach ist für den Kopfanprall bei einer Anprallgeschwindigkeit von 20 km/h an Fahrzeuge mit Frontschutzsystemen mit gleichen Belastungen zu rechnen, wie bei einem Kopfanprall an ein Geländefahrzeug mit einer Anprallgeschwindigkeit von 30 km/h bzw. an einen normalen Pkw bei einer Anprallgeschwindigkeit von 40 km/h. Vergleichbare Belastungen ergeben sich für den Anprall des Oberschenkels bzw. des Beckens eines Erwachsenen bei Anprallgeschwindigkeiten von 25 km/h an ein Fahrzeug mit Frontschutzbügel und bei 40 km/h an einem Geländefahrzeug oder einem normalen Pkw. Diese Ergebnisse unterstreichen die Beobachtungen bei Realunfällen, dass bei Kollisionen ungeschützter Verkehrsteilnehmer mit Geländefahrzeugen, die mit Frontschutzsystemen ausgestattet sind, bereits bei niedrigeren Kollisionsgeschwindigkeiten schwere Verletzungen auftreten können (Zellmer u. Schmid 1993).

Um die Sicherheit von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern bei Kollisionen mit solchen Fahrzeugen zu erhöhen, wurde auf europäischer Ebene eine Richtlinie erlassen (Richtlinie zu Frontschutzsystemen 2005). Die Anforderungen dieser Richtlinie sind im Zusammenhang mit der europäischen Richtlinie 2003/102/EG zum Schutz

von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern vor und bei Kollisionen bei Kraftfahrzeugen zu sehen (s. S. 185 ff.).

Die Richtlinie über die Verwendung von Frontschutzsystemen an Fahrzeugen bezieht sich dabei auf Systeme, die als Originalteile an Fahrzeugen angebracht sind oder als selbstständige technische Einheiten in den Handel kommen. Sie gilt für Fahrzeuge der Klasse M_1 und jedes Kraftfahrzeug der Klasse N_1. Als selbstständige technische Einheit werden Frontschutzsysteme bezeichnet, die zum Einbau und zur Verwendung in einem oder mehreren Fahrzeugtypen bestimmt sind (Zubehörteile). Ab November 2006 müssen Neufahrzeuge, die mit Frontschutzsystemen ausgestattet sind, diese Richtlinie erfüllen. Gleiches gilt für Frontschutzsysteme die als selbstständige technische Einheit in den Handel kommen.

Die Richtlinie unterscheidet zwischen Vorschriften für Konstruktion und Anbau sowie Prüfvorschriften. Für die Konstruktion und den Anbau wird die Einhaltung der folgenden Vorschriften gefordert (Richtlinie zu Frontschutzsystemen 2005):

- Die Bauteile des Frontschutzsystems müssen so beschaffen sein, dass alle starren Oberflächen, die von einer Kugel mit 100 mm Durchmesser berührt werden können, einen Abrundungsradius von mindestens 5 mm aufweisen.
- Die Gesamtmasse des Frontschutzsystems einschließlich aller Träger und Halterungen darf nicht mehr als 1,2 % der Masse des Fahrzeugs, für das es konstruiert ist, höchstens jedoch 18 kg betragen.
- Ein an einem Fahrzeug angebrachtes Frontschutzsystem darf die Bezugslinie der Fronthaubenvorderkante an keinem Punkt um mehr als 50 mm in der Höhe überragen, gemessen an einer senkrechten Längsebene durch das Fahrzeug in diesem Punkt.
- Das Frontschutzsystem darf die Breite des Fahrzeugs, an das es angebaut ist, nicht vergrößern. Beträgt die Gesamtbreite des Frontschutzsystems mehr als 75 % der Fahrzeugbreite, müssen die Enden des Frontschutzsystems nach innen auf die Außenflächen zugebogen sein, um die Gefahr eines Hängebleibens auf ein Minimum zu beschränken.
- Der Zwischenraum zwischen den Bauteilen des Frontschutzsystems und der unter ihm liegenden Außenfläche darf höchstens 80 mm betragen. Etwaige Unterbrechungen der allgemeinen Kontur, der darunter liegenden Karosserie (wie z. B. Öffnung in den Gittern, Lufteinlässen usw.), bleiben unberücksichtigt.
- Um die Schutzwirkung des Fahrzeugstoßfängers zu erhalten, darf der Längsabstand zwischen dem Vorderteil des Stoßfängers und dem vor-

dersten Teil des Frontschutzsystems an keinem seitlichen Punkt des Fahrzeugs mehr als 50 mm betragen.

- Die Wirksamkeit des Stoßfängers darf durch das Frontschutzsystem nicht nennenswert vermindert werden. Diese Anforderung gilt als erfüllt, wenn nicht mehr als zwei vertikale und kein horizontales Bauteil den Stoßfänger überdeckt.
- Das Frontschutzsystem darf nicht vor die Senkrechte geneigt sein. Die oberen Teile des Frontschutzsystems dürfen von der Bezugslinie der Fronthaubenvorderkante aus nicht mehr als 50 mm nach oben oder nach hinten reichen.
- Die Einhaltung der Anforderungen der anderen Richtlinien für die Fahrzeugtypgenehmigung darf durch das Anbringen eines Frontschutzsystems nicht beeinträchtigt werden.
- Frontschutzsysteme als selbstständige technische Einheiten dürfen nur vertrieben, zum Verkauf angeboten oder verkauft werden, wenn eindeutige Montageanleitungen und eine Liste der Fahrzeugtypen beigefügt sind, für die sie typgenehmigt sind.

Außerdem fordert die Richtlinie das Einhalten von Prüfvorschriften, die sich an den Komponententests für die Typzulassung von Fahrzeugfronten (Richtlinie 2003/102/EG) orientieren. Dabei werden ein Beinprüfkörper, ein Hüftprüfkörper und ein Kopfprüfkörper auf das Frontschutzsystem geschossen (s. Abb. 4.20 und 4.21). Darüber hinaus bietet die Richtlinie Ausnahmen für Fahrzeuge an, die in diese Richtlinie fallen und mit Frontschutzsystemen ausgestattet werden, allerdings nicht nach der Richtlinie zur Prüfung der Fahrzeugfront hinsichtlich des Fußgängerschutzes (2003/102/EG) zugelassen werden müssen. Für diese Fahrzeuge gelten abgeschwächte Grenzwerte, da bestimmte Prüfanforderungen möglicherweise technisch nicht eingehalten werden können.

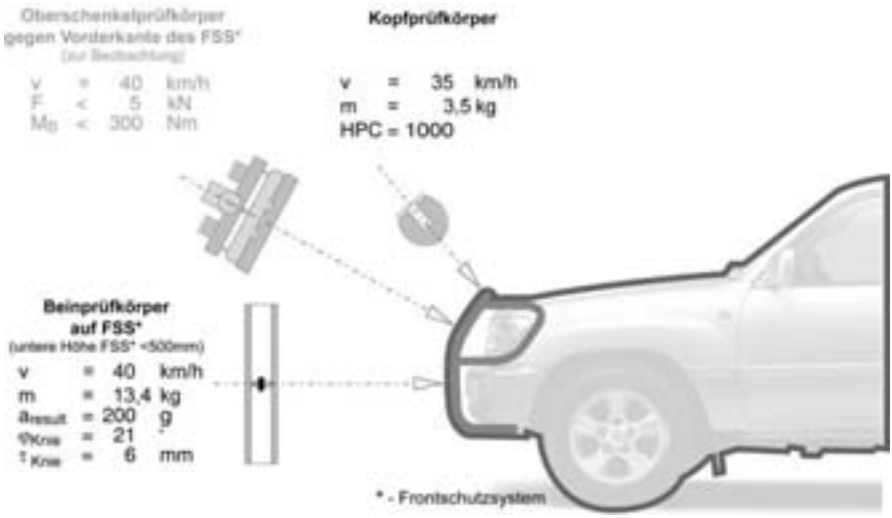


Abb. 4.20 Komponententest zur Prüfung von Fronschutzsystemen gemäß der Richtlinie 2005/66/EG.

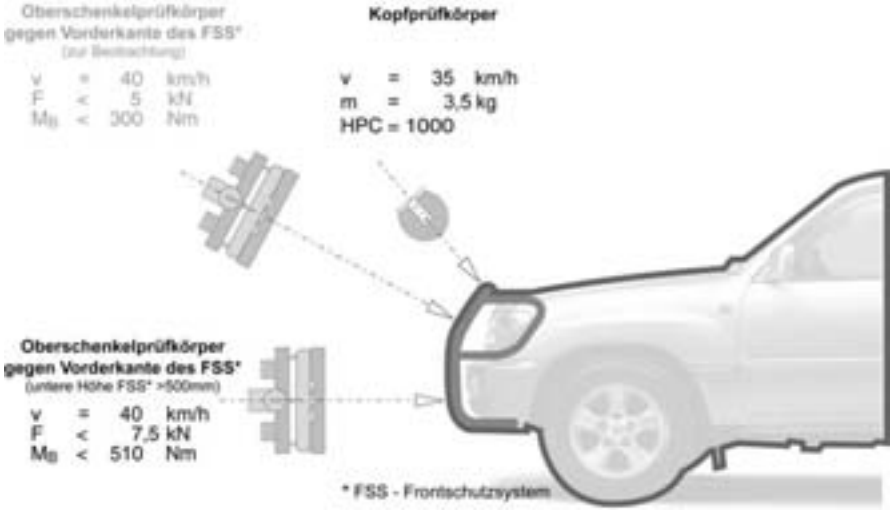


Abb. 4.21 Komponententest zur Prüfung von Fronschutzsystemen gemäß der Richtlinie 2005/66/EG für Fahrzeuge mit einer Stoßfängerunterkantenhöhe von mehr als 500 mm.

Die Kommission wird die Umsetzung dieser Richtlinie überwachen. Bis 2010 überprüft die Kommission bezüglich des technischen Fortschritts und der gewonnenen Erfahrungen die technischen Vorschriften dieser Richtlinie. Insbesondere werden die Bedingungen des Anpralls des Hüftprüfkör-

pers, die Aufnahme einer Prüfung mit einem Erwachsenenprüfkörper und die Spezifikation einer Prüfung mit dem Kinderkopfprüfkörper gegen das Frontschutzsystem überprüft.

Diese Richtlinie ist Teil des europäischen Aktionsprogramms für die Straßenverkehrssicherheit und bildet gemeinsam mit der Richtlinie zur fußgängerverträglichen Gestaltung von Fahrzeugfronten ein Maßnahmenpaket, um die Sicherheit von ungeschützten Verkehrsteilnehmern auf europäischen Straßen zu erhöhen. Damit wurden zum ersten Mal zulassungsrelevante Prüfvorschriften an Fahrzeugen hinsichtlich des Schutzes von ungeschützten Verkehrsteilnehmern erlassen. Allerdings bestehen in Fachkreisen auch Zweifel, ob eine Komponententestprüfung die komplexen kinematischen Verhältnisse im realen Unfallgeschehen bei einer Kollision zwischen einem Fußgänger und einem Fahrzeug hinreichend realitätsnah abdecken kann. Es ist möglich, dass Konfigurationen entstehen, die zwar die Prüfungen erfüllen können, aber das reale Unfallgeschehen nicht nennenswert positiv beeinflussen. Darum ist es dringend notwendig, die Wirkung dieser Richtlinien durch die Analyse des realen Unfallgeschehens kritisch zu begleiten und ggf. Änderungsvorschläge zu unterbreiten.

4.3.2 Gesetzgebung in Japan

Seit September 2005 dürfen in Japan nur noch Fahrzeuge zugelassen werden, die eine Prüfung der Fahrzeugfront erfolgreich bestehen (s. Abb. 4.22). Damit war Japan das erste Land, das dem Fußgängerschutz zulassungsrelevante Bedeutung gab. Dies betrifft im ersten Schritt alle neu typgeprüften Pkw-Modelle. Ab 2010 müssen dann alle neu zugelassenen Pkw die Regelung erfüllen. Ab September 2007 gilt die Regelung dann auch für neue Sport Utility Fahrzeugmodelle (SUV) und neue Fahrzeugmodelle mit einer geringen Höhe (Sitzreferenzpunkt < 475 mm). Ab September 2012 gilt die Regelung für alle neu zugelassenen Fahrzeuge der eben genannten Kategorien.

Das Japan MLIT[11] hat in Zusammenarbeit mit der JAMA[12], dem JARI[13] und der Unterstützung der Arbeitsgruppe der IHRA[14] einen gesetzlichen Kopfaufpralltest entwickelt, der die Fahrzeugfronthaube bewertet. Das japanische Testverfahren verzichtet auf eine Prüfung mit dem Bein- und

[11] Japan MLIT – Japan Ministry of Land, Infrastructure and Transport
[12] JAMA – Japan Automobile Manufacturers Association, Inc.
[13] JARI – Japan Automobile Research Institute
[14] IHRA – International Harmonized Research Activities

Oberschenkelprüfkörper. Sowohl der 3,5 kg schwere Kinderkopfprüfkörper als auch der 4,5 kg schwere Erwachsenenkopfprüfkörper werden mit einer Geschwindigkeit von 32 km/h auf die Fahrzeugstruktur geschossen.

Der Aufprallwinkel ist von der Fahrzeugfrontgestaltung abhängig, die in drei Kategorien eingeteilt wird:

- Limousine
- SUV-Typ
- One-Box-Typ

Der Prüfbereich teilt sich in den des Kinderkopfes und den des Erwachsenenkopfes auf. Dabei erstreckt sich der Prüfbereich für den Kinderkopf auf eine Abwickellänge von 1000 mm bis 1700 mm Für den Erwachsenenkopf liegt der Prüfbereich bei einer Abwickellänge von 1700 mm bis 2100 mm. Das zu erfüllende Kopfschutzkriterium ist ein HIC < 1000 auf 2/3 der Prüffläche und ein HIC < 2000 auf 1/3 der Prüffläche.

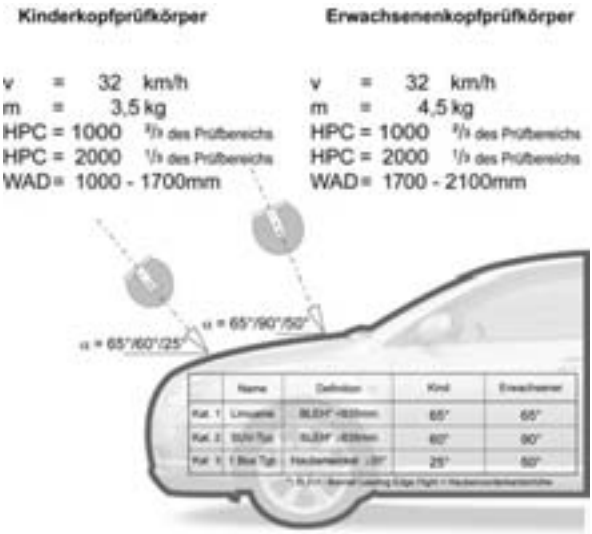


Abb. 4.22 Komponententest gemäß der Japanischen Gesetzgebung zum Fußgängerschutz (JAMA 2005)

4.3.3 Weltweite Technische Regelung

Die für die passive Sicherheit zuständige Abteilung der UNECE[15] wurde beauftragt, eine globale technische Vorschrift (Global Technical Regulation - GTR) aus den bereits existierenden Forschungsergebnissen anderer Organisationen zu erarbeiten (GRSP 2006). Der entwickelte Vorschlag für ein Testverfahren orientiert sich sehr stark an den der europäischen Richtlinie zu Grunde liegenden Erkenntnissen (s. Abb. 4.23 sowie 4.9).

Die Masse des derzeit innerhalb des Richtlinienentwurfs der GTR verwendeten Kinderkopfprüfkörpers beträgt 3,5 kg, die des Erwachsenenkopfprüfkörpers 4,5 kg. Die Aufprallwinkel sind unabhängig von der Fahrzeugfrontgeometrie. Im zu prüfenden Kinderkopfbereich der Motorhaube beträgt der Impaktoraufprallwinkel 50°. Für Erwachsene wird der zu prüfende Motorhaubenbereich unter einem Winkel von 65° beschossen. Bei der Kinderkopfprüfung muss bei der Hälfte des Prüfbereichs ein HIC < 1000 eingehalten werden. Bei 2/3 des gemeinsamen Kinder- und Erwachsenenkopfprüfbereichs darf der HIC den Wert von 1000 nicht überschreiten. Im restlichen Bereich des Kinder- und Erwachsenenprüfbereichs darf der HIC nicht höher als 1700 sein. Eine Prüfung der Windschutzscheibe wurde viel diskutiert, letztendlich aber nicht in den Richtlinienentwurf aufgenommen.

Die GTR sieht weiterhin eine Prüfung der Fahrzeugfront (Stoßfänger) mit dem von INRETS entwickelten Beinprüfkörper vor. Darüber hinaus erfolgt eine Prüfung des Stoßfängerbereichs mit dem Oberschenkelprüfkörper, der auch in der europäischen Richtlinie vorgeschrieben ist. Die Prüfung erfolgt, wenn die untere Stoßfängerhöhe 500 mm oder mehr von der Fahrbahnoberfläche entfernt ist. Bei einer unteren Stoßfängerhöhe zwischen 425 und 500 mm kann der Hersteller zwischen der Bein- oder der Oberschenkelprüfung wählen.

[15] UNECE – United Nations Economic Commission for Europe, www.unece.org

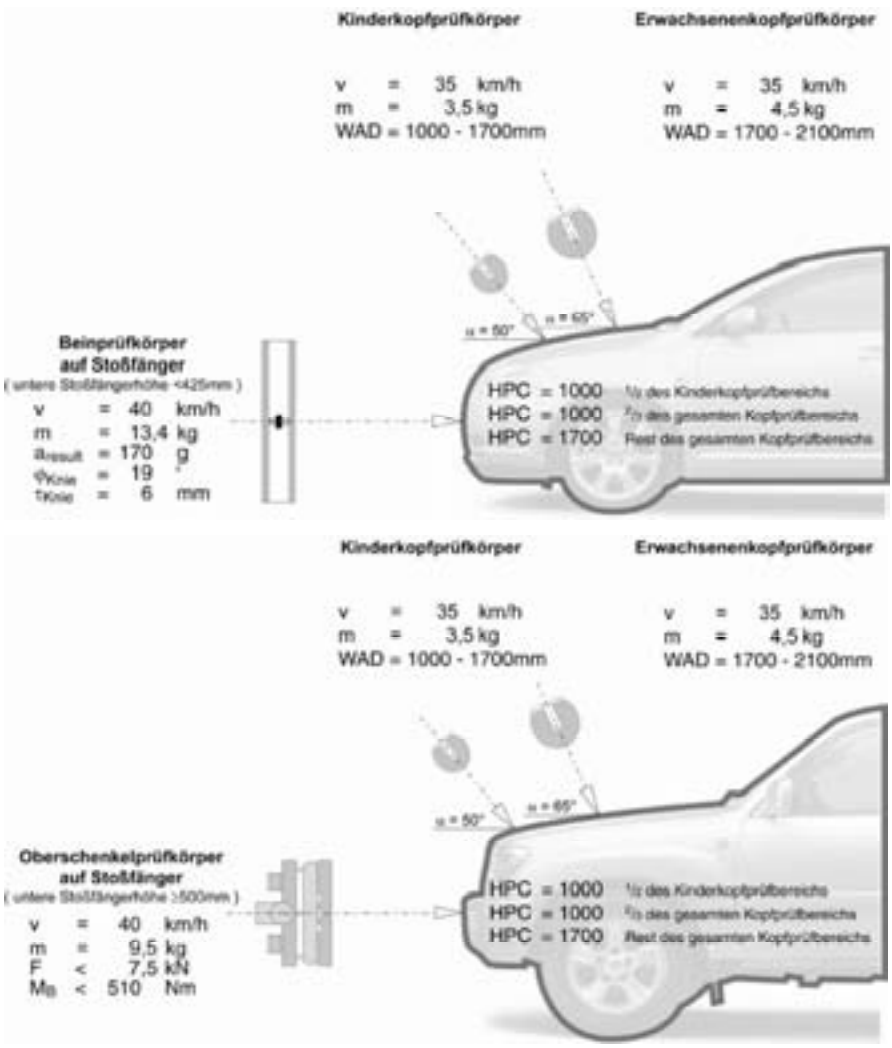


Abb. 4.23 Komponententest gemäß der GTR-Richtlinie zum Fußgängerschutz (oben) sowie für Fahrzeuge mit einer Stoßfängerhöhe über 500 mm (unten, GRSP 2006).

4.3.4 EuroNCAP

Bereits seit 1978 in den USA aktiv, werden seit Mitte der 90iger Jahre die Interessen der Verbraucher auf dem Gebiet der Sicherheitseigenschaften von Fahrzeugen durch das New Car Assessment Programme auch in Europa gestärkt. Mittlerweile sind die Euro NCAP-Anforderungen an die Sicherheit von Fahrzeugen nicht mehr aus den Lastenheften der Hersteller wegzudenken.

Alle neuen Fahrzeugmodelle müssen gesetzlich vorgeschriebene Sicherheitstests bestehen, bevor sie zugelassen werden. Daneben haben Tests eine große Bedeutung erlangt, die von Verbraucherorganisationen durchgeführt werden. Sie wurden im New Car Assessment Programme (NCAP) zusammengeführt und beträchtlich erweitert. Weitere Programme gibt es in Europa (EuroNCAP), in Japan (JNCAP) und in Australien (ANCAP). In Europa, Japan und Australien schreiben die NCAP-Protokolle auch Prüfungen zum Fußgängerschutz vor.

In NCAP-Tests geht es nicht – wie bei den gesetzlichen Vorschriften – um die Frage der Erfüllung von Grenzwerten. Es soll vielmehr eine Rangfolge unter den getesteten Fahrzeugen hergestellt werden. Die Prüfkriterien sind häufig deutlich anspruchsvoller als die gesetzlichen Tests und hinsichtlich ihrer Regularien deutlich flexibler an geänderte Rahmenbedingungen anpassbar. So gibt es z. B. starke Bestrebungen, den Beitrag von aktiven Sicherheitsmaßnahmen zur Insassen- und Fußgängersicherheit mit in die Bewertung einzubeziehen. Dafür müssen zusätzliche Bewertungsmaßstäbe entwickelt werden. Optimal wäre eine lineare Skala, die das Risiko von Verletzungen durch das Fahrzeug im realen Gebrauch beschreibt. Dieses Ziel wurde bisher nur näherungsweise erreicht.

Der Prüfung zum Fußgängerschutz im Rahmen des Euro NCAP-Testprotokolls über die passiven Sicherheitseigenschaften von Fahrzeugen liegt das Testverfahren der EEVC Arbeitsgruppe 17 zu Grunde (s. Abb. 4.12). Es werden alle Eigenschaften ähnlich der zweiten Phase der aktuellen Gesetzgebung untersucht und auf einer Punkteskala bewertet. Die Prüfung zum Fußgängerschutz im Rahmen von Euro NCAP ist bereits seit 1997 in der praktischen Anwendung (s. Abb. 4.24 und 4.25).

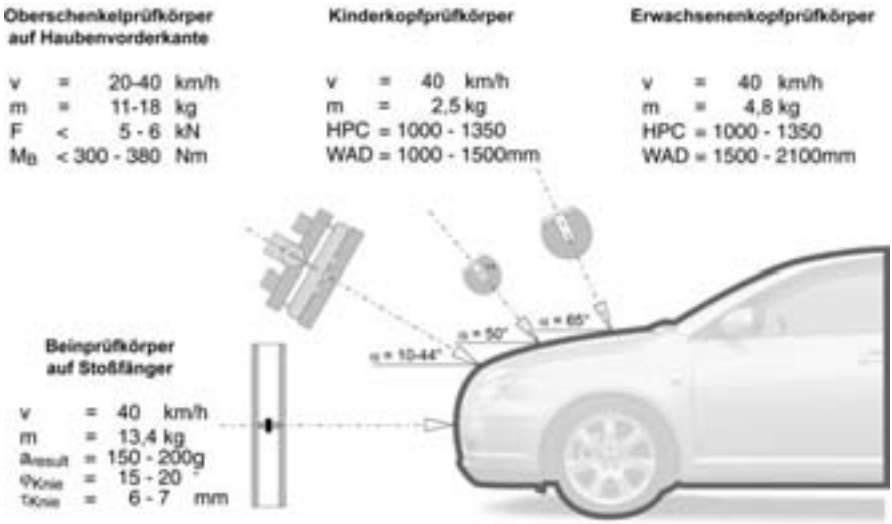


Abb. 4.24 Komponententest gemäß den Euro NCAP-Bedingungen. Gleiche Prüfbedingungen gelten auch für das australische NCAP (nach EuroNCAP 2004; ANCAP 2005)

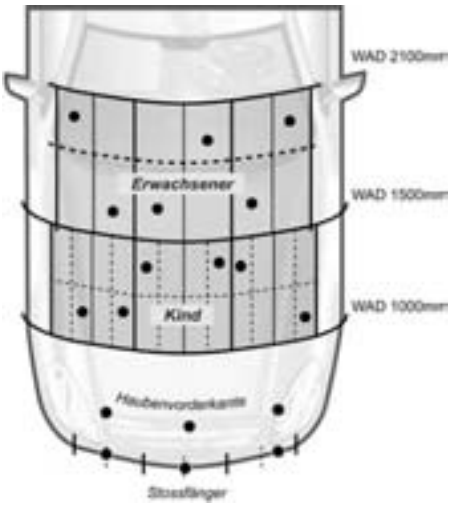


Abb. 4.25 Prüfbereiche des Komponententests gemäß der Euro NCAP-Bedingungen und beispielhaft ausgewählte Prüfpunkte (nach EuroNCAP 2004)

Das Testverfahren unterscheidet sich bei den einzuhaltenden Grenzwerten für die Bein- und Oberschenkelprüfungen und bei den Kopfprüfungen nur geringfügig von den Grenzwerten der EEVC Arbeitsgruppe 17. Die Testbedingungen der Kopfprüfungen weichen jedoch in der Anzahl der

durchzuführenden Prüfungen und in der Festlegung der einzelnen Prüfbereiche ab (s. Abb. 4.25).

Bei der Wahl der Prüfpunkte im Rahmen von Euro NCAP wird der Fahrzeughersteller beteiligt. Prüfpunkte, die ein besonders gutes Ergebnis versprechen, können vom Hersteller zusätzlich zu den vom Prüfinstitut gewählten Prüforten nominiert werden. Bei der Wahl der Prüfbereiche liegt der bedeutendste Unterschied in der Einbeziehung des Windschutzscheibenbereiches und der A-Säule in die Kopfanprallprüfung.

Die Ergebnisse der Komponententests werden einer Gewichtung unterzogen: Für den Fußgängeranprall können für jeden der 18 Prüfpunkte (3 Bein, 3 Oberschenkel, 12 Kopf) maximal zwei Punkte vergeben werden. Insgesamt können also 36 Punkte erreicht werden. Dabei wird jedem Prüfbereich gemäß seiner erreichten Punktzahl die Farbe Grün, Gelb oder Rot zugeteilt (s. Tabelle 4.5).

Tabelle 4.5 Zusammenhang zwischen Farbzuordnung und Punktzahl je Prüfbereich (nach Zander 2006).

Testmethode	Kriterium	grün	gelb	rot
Beinprüfkörper	Beschleunigung [g]	$A < 150$	$150 \leq A < 200$	$A \geq 200$
	Scherung [mm]	$S < 6$	$6 \leq S < 7$	$S \geq 7$
	Biegung [°]	$B < 15$	$15 \leq B < 20$	$B \geq 20$
Oberschenkelprüfkörper	Biegung [Nm]	$B < 300$	$300 \leq B < 380$	$B \geq 380$
	Summenkraft [Nm]	$F < 5$	$5 \leq F < 6$	$F \geq 6$
Kinder-/Erwachsenenkopfprüfkörper	Head Performance Criterion	$HPC < 1000$	$1000 \leq HPC < 1350$	$HPC \geq 1350$

Sollte sich der Hersteller entscheiden weitere Tests durchführen zu lassen, so berechnet sich die Gesamtpunktzahl nach einer modifizierten Formel (EuroNCAP 2004). Diese Gesamtsumme der Punkte wird gerundet und in die Anzahl der zu vergebenden Sterne umgerechnet. Die Grenzen für die Sternbewertung sind in Tabelle 4.6 zusammengefasst.

Tabelle 4.6 Zusammenhang zwischen erreichten Testpunkten und Sternen gemäß Euro NCAP (EuroNCAP 2004a).

Punktzahl	Sterne
28-36 Punkte	★★★★
19-27 Punkte	★★★
10-18 Punkte	★★
1-9 Punkte	★
0 Punkte	0 Sterne

Leider stellt sich auch beim Euro NCAP-Verfahren – ähnlich wie bei den gesetzlichen Prüfungen – die Frage, ob der Test wirklich eine Aussage über das tatsächliche Verhalten im Unfall möglich macht.

Das australische New Car Assessment Programme stellt seit 1992 interessierten Verbrauchern die Ergebnisse von Untersuchungen zur Sicherheit ausgewählter Fahrzeugmodelle zur Verfügung. Seit Mitte 1999 hat das australische NCAP die Testbedingungen an das europäische NCAP angepasst (ANCAP 2005). Somit entsprechen auch die Tests zum Fußgängerschutz denen in Europa.

Der Verbraucher kann im Internet unter http://www.euroncap.com die getesteten Fahrzeuge und ihre Sicherheitseigenschaften abrufen und dies zur Grundlage seiner Kaufentscheidung machen. Dabei erhält er die Ergebnisse in Form einer Sternbewertung, die zusätzlich von den Testergebnissen und erläuternden Grafiken gestützt werden (s. Abb. 4.26).

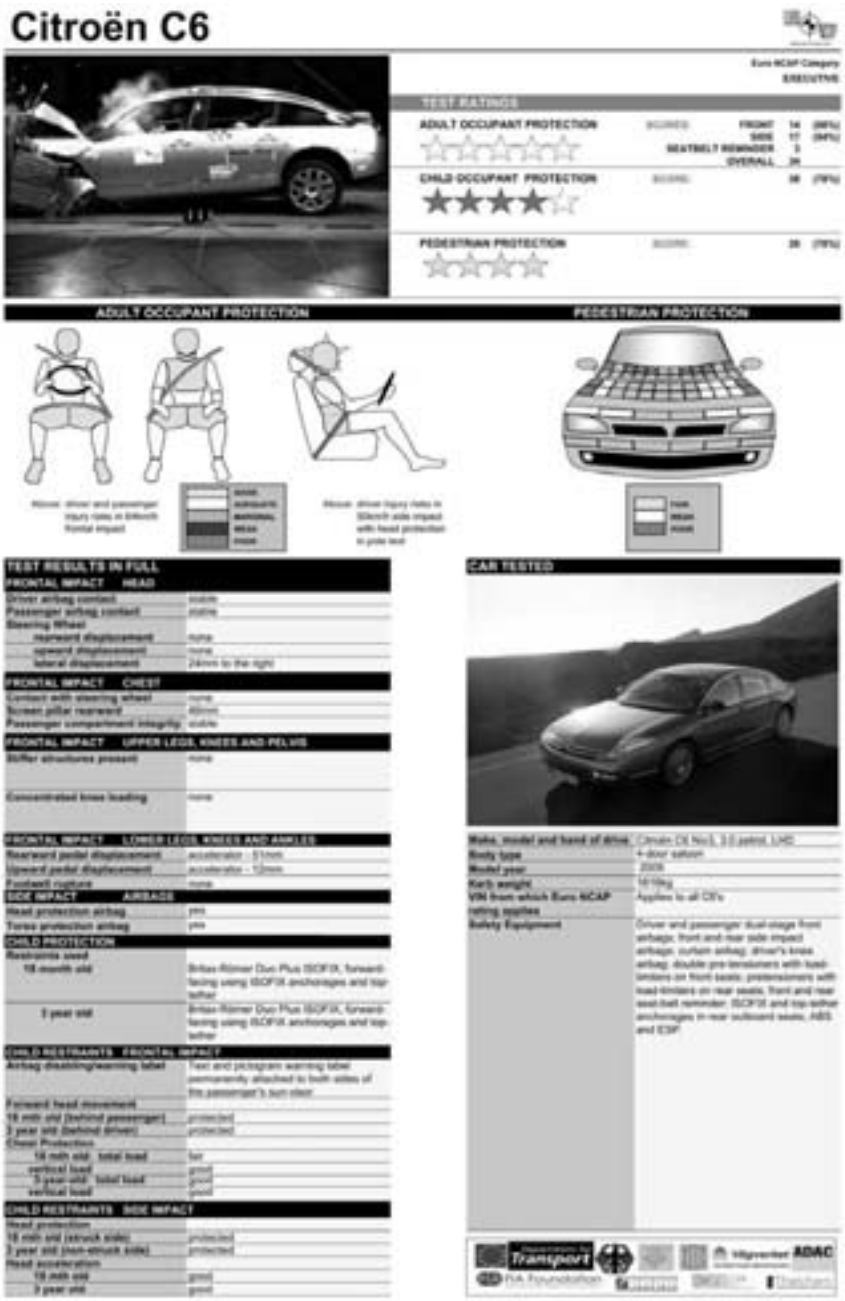


Abb. 4.26 Euro NCAP-Ergebnispräsentation für alle an einem Fahrzeug durchgeführten Tests – hier des Citroen C6 - auf einen Blick unter http://www.euroncap.com.

4.3.5 Japan NCAP

Die Prüfprozedur zum Fußgängerschutz des Japan NCAP orientiert sich stark an der japanischen Gesetzgebung und wurde 2003 in das Testprogramm des Japan NCAP aufgenommen. Der Komponententest beschränkt sich - wie auch die japanische Gesetzgebung - nur auf die Prüfung des Kopfes auf der Fahrzeugfront (s. Abb. 4.27). Allerdings wird der Scheibenbereich zusätzlich in die Prüfung einbezogen. Die Auftreffwinkel der Kopfprüfkörper sind fahrzeugkategorieabhängig. Dabei entsprechen die drei Fahrzeugkategorien denen der japanischen Gesetzgebung.

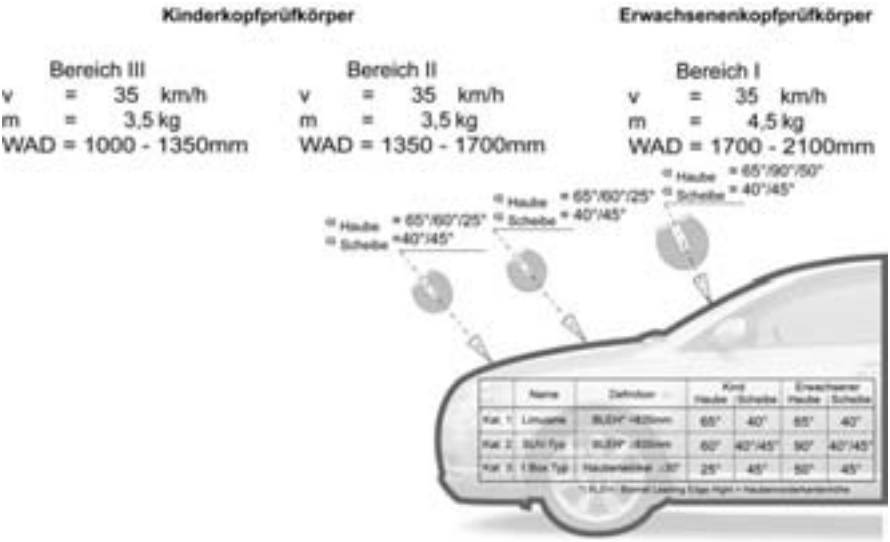


Abb. 4.27 Komponententest gemäß der Japan NCAP-Bedingungen (nach JNCAP 2005).

Die Einteilung der Prüfbereiche in 15 Teilflächen ist in der Abb. 4.28 dargestellt. Die ermittelten HIC-Werte werden mit Hilfe einer Gleitskala in Bewertungspunkte für jeden der Teilbereiche umgerechnet. Dabei entspricht ein HIC-Wert von 650 dem Höchstwert von vier Punkten und ein HIC-Wert von 2000 erhält keinen Punkt (s. Abb. 4.29). Es entsteht eine mittlere Bewertung für alle drei Prüfbereiche, die in eine Bewertung des gesamten Prüfbereiches mündet.

Die Punktbewertung des gesamten Prüfbereiches wird dann entsprechend der Gleitskala in Abb. 4.29 zurück in einen mittleren HIC-Wert konvertiert. Anhand dieses mittleren HIC-Wertes lässt sich durch einen linearisierten Zusammenhang eine Aussage über die Verletzungswahr-

scheinlichkeit für schwere Kopfverletzungen (AIS4+) in fünf Bewertungsstufen ableiten (s. Abb. 4.30).

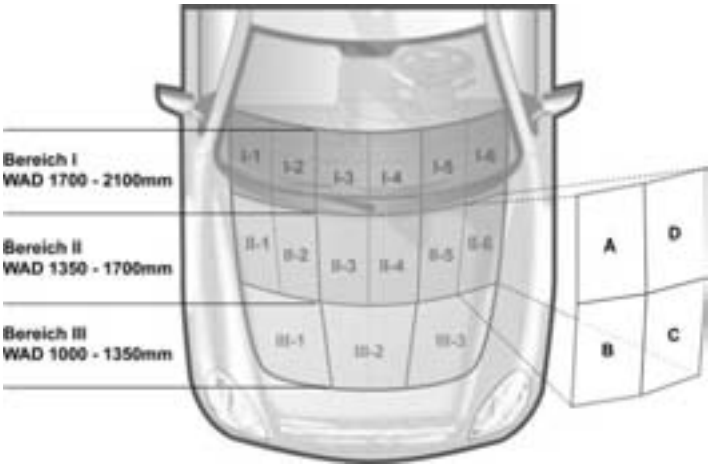


Abb. 4.28 Einteilung der Prüfbereiche entsprechend des Japan NCAP-Komponententests (nach JNCAP 2005).

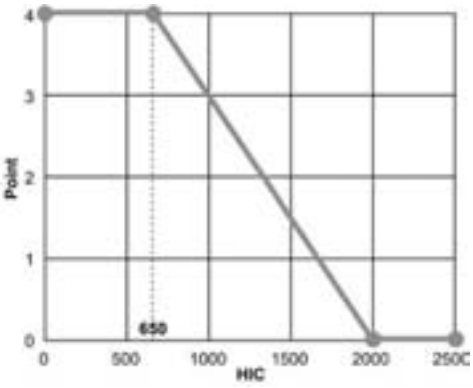


Abb. 4.29 Umrechung der HIC-Werte in Bewertungspunkte mittels einer Gleitskala (nach JNCAP 2005).

Dieser Ansatz der Überführung von Messwerten in Verletzungswahrscheinlichkeiten ist vergleichbar mit dem der Bewertungsfunktion des später vorgestellten VERPS-Index, enthält aber noch keine Wichtung der Prüfbereiche entsprechend der Relevanz im realen Unfallgeschehen (s. Abb. 4.30).

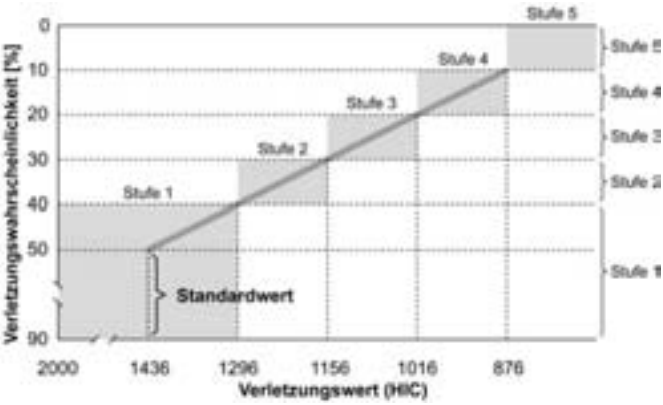


Abb. 4.30 Bewertung des mittleren HIC-Wertes hinsichtlich der Verletzungswahrscheinlichkeit für AIS4+ - Kopfverletzungen. (nach JNCAP 2005)

4.4 Bewertung aktiver und passiver Schutzmaßnahmen

Größe und Gewicht des Fußgängers, seine Stellung und Bewegung zum Fahrzeug, dessen Geschwindigkeit sowie die Form der Fahrzeugfront bestimmen im Wesentlichen die Anprallkinematik des Fußgängers bei einer Kollision mit einem Fahrzeug. Bisherige Prüfverfahren berücksichtigen den fahrzeugspezifischen Charakter dieser Zusammenhänge kaum. Dies reflektiert die bisherige Schwierigkeit, den Einfluss dieser Größen fahrzeugspezifisch mit angemessenem Aufwand zu ermitteln. Außerdem wird die Auslassung des Frontscheibenbereiches in vielen der bisherigen Prüfverfahren neueren Erkenntnissen der Unfallforschung nicht gerecht. Deswegen wird die Erweiterung des Prüfbereiches bereits seit geraumer Zeit diskutiert.

4.4.1 Die VERPS-Bewertungsmethodik

Der Kopfanprall führt zu den bei weitem schwersten Verletzungen bei einer Fußgänger-Fahrzeug-Kollision, dementsprechend bilden Kopfverletzungen auch die häufigste Todesursache. Diese Unfallcharakteristika werden als Basis für das im Folgenden dargestellte Bewertungsverfahren VERPS (Vehicle Related Pedestrian Safety) verwendet. Das Verfahren konzentriert sich darauf, das fahrzeugspezifische Risiko für schwere Kopfverletzungen bei einer Frontalkollision mit einem Fußgänger zu erfassen

und prognostizierbar zu machen. Die Grundidee besteht darin, die vier Module „Unfallanalyse“, „Kinematikanalyse“, „Komponententest“ und „Quantifizierung der Fußgängersicherheit“ miteinander zu koppeln (s. Abb. 4.31).

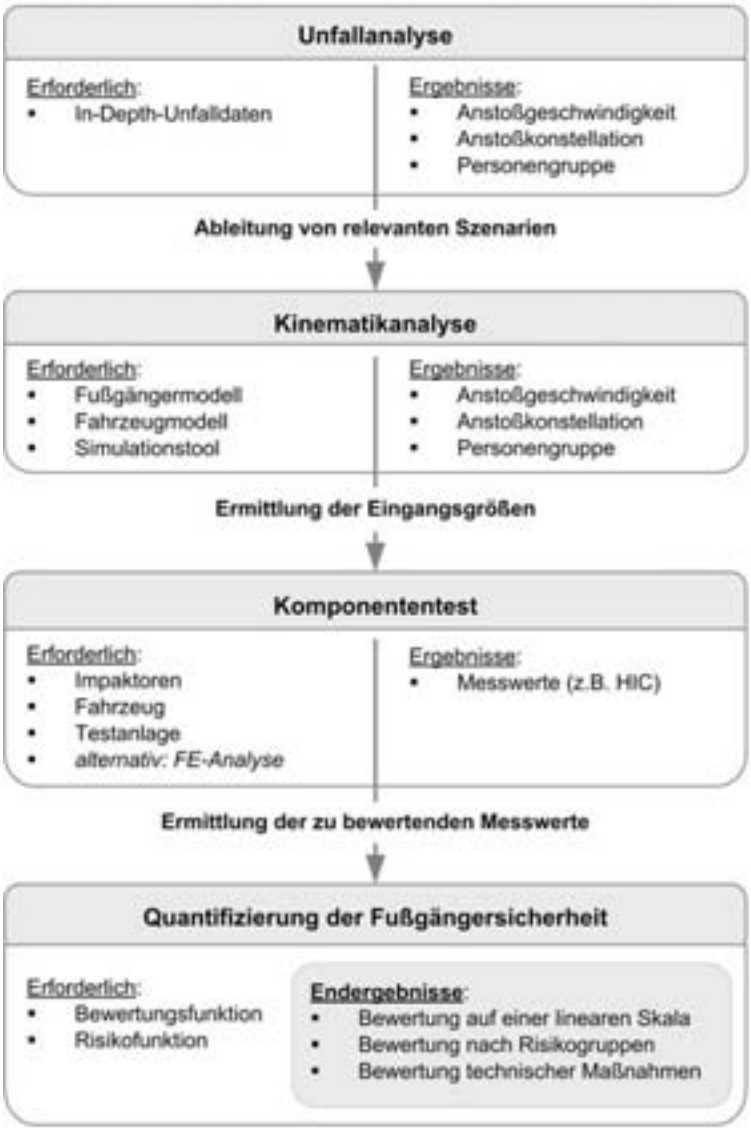


Abb. 4.31 Darstellung der Methodik zur Bewertung des fahrzeugseitigen Fußgängerschutzes.

Im Ergebnis entsteht der VERPS-Index, der auf einer linearen Skala und nahezu unabhängig von ad-hoc-Annahmen eine Aussage über den passiven fahrzeugseitigen Fußgängerschutz ermöglicht. Die Modularität des vorgestellten Bewertungsverfahrens ermöglicht die Integration neuer Erkenntnisse und Methoden aus der Biomechanik, Unfallanalyse und der numerischen Simulation.

Die Unfallanalyse

Die Analyse des realen Unfallgeschehens stellt sicher, dass die für die numerische Simulation der Kinematik des Fußgängers beim Fahrzeuganprall gesetzten Randbedingungen die Schwerpunkte des heutigen Fußgänger-Fahrzeug-Unfallgeschehens korrekt abbilden. Sie liefert die Ausgangsbasis für alle weiteren Ableitungen. Für die Bestimmung der Eingangsparameter für die rechnerische Simulation wurden die In-Depth-Unfalldaten herangezogen (s. Abschn. 1.3). Deren Analyse zeigt, dass sich ca. 90 % aller Unfälle bis zu einer Kollisionsgeschwindigkeit von 45 km/h ereignen. In ca. 71 % der Fälle kollidiert der Fußgänger mit der Fahrzeugfront. Die Fußgänger werden dabei in 92 % der Fälle seitlich von rechts oder von links vom Fahrzeug erfasst und sind in 94 % der Fälle vor der Kollision in Bewegung.

Die Kinematikanalyse

Für die rechnerische Simulation wurde ein Prozess unter Verwendung des Mehrkörper-Simulationssystems MADYMO entwickelt. Für die Abbildung des Fußgängers wird das Full Body Pedestrian Model der Firma TNO (s. Abschn. 4.2.1) verwendet. Die Fahrzeuge werden mittels FE-Schalenelementen modelliert und besitzen nur globale Steifigkeiten (z. B. für Stoßfänger, Frontklappe, Frontscheibe, Scheibenrahmen und A-Säule). Trotz dieser Vereinfachungen ist eine Abbilddung der Anprallkinematik des Fußgängers während des Primäranpralls sehr gut möglich, wie der Vergleich mit gut rekonstruierten Realunfällen gezeigt hat (Kühn 2004, Strzeletz et al. 2004, s. auch van Hoof et al. 2003). Eine Vorhersage von Verletzungsmustern ist in diesem Schritt nicht beabsichtigt und wegen der Modellierung mit globalen Steifigkeiten und der Begrenzungen des Pedestrian Models auch nicht möglich.

Aus der Kombination aller Eingangsparameter (s. Tabelle 4.7) ergeben sich 32 relevante Anstoßkonstellationen, die für das jeweils zu bewertende Fahrzeugmodell analysiert werden müssen (Kühn 2004). Die Kollisionsge-

schwindigkeit wurde auf 45 km/h festgelegt und deckt damit 90 % aller Unfälle hinsichtlich der Kollisionsgeschwindigkeit ab. Die vier verwendeten Fußgängergrößen repräsentieren den Größenbereich der verunfallten Fußgänger zu ca. 76 %, wenn man einen Gültigkeitsbereich von ±10 cm um die jeweilige Modellgröße annimmt. Die Berücksichtigung des 75°-Anstoßwinkels des Fußgängers erlaubt einerseits die Abbildung repräsentativer Unfallkonstellationen, andererseits wird in dieser Anstoßkonstellation ein Abstützen der Schulter des Pedestrian Models auf der Motorhaube vermieden.

Tabelle 4.7 Die in der Kinematikanalyse untersuchten Unfallkonstellationen ergeben in der Summe 32 Kombinationen.

Eingangsgröße	Wertebereich
Größe des Fußgängers	1,16 m (6-jähriges Kind), 1,52 m (5%-Frau), 1,74 m (50%-Mann), 1,91 m (95%-Mann)
Anstoßposition des Fußgängers	Fahrzeugmitte und 40 cm seitlich davon
Geschwindigkeit des Fußgängers	1,5 m/s (gehend) und 3,1 m/s (rennend)
Winkel zwischen Fußgänger und Fahrzeug	75° und 90°

Die für eine Reihe von sehr unterschiedlichen Fahrzeugen mit Hilfe des Simulationsmodells abgeleiteten Prüfbedingungen für den Komponententest zum Kopfanprall innerhalb von VERPS zeigen, dass die Anprallbedingungen tatsächlich erheblich variieren. Sie reflektieren die Geometrie des untersuchten Fahrzeugs und unterscheiden sich zum Teil beträchtlich von denen der gültigen europäischen Gesetzgebung (s. Kap. 4.3.1 sowie Kühn 2004).

Der Komponententest

Für die Bewertung des Kopfanpralls werden - wie im Verfahren nach EEVC WG 17 und ACEA - Ergebnisse von Versuchen mit freifliegenden Kopfprüfkörpern verwendet. Im Unterschied zu den eben genannten Prüfverfahren wird hier das jeweils zu prüfende Fahrzeug mit einem in der Kinematikanalyse individuell berechneten Satz an Prüfbedingungen getestet. Die Masse des verwendeten Prüfkörpers muss dem für die jeweilige Aufschlagstelle repräsentativen Durchschnitt an möglichen Fußgängern entsprechen. Tabelle 4.8 zeigt die anhand biomechanischer Modelle abgeleiteten Werte (s. auch Abb. 4.7). Sie unterscheiden sich zum Teil deutlich von den heute verwendeten Prüfkörpern.

Tabelle 4.8 Anhand anthropometrischer Analysen ermittelte, theoretische Prüfkörpermassen und Zuordnung existierender Prüfkörper für die Kopfanprallprüfung innerhalb des VERPS-Bewertungsverfahrens (Fröming 2003).

	h [m]	Errechnete, wirksame Kopfmasse m_E [kg]	zugeordnete Prüfkörpermasse m_P [kg]
6-jähriges Kind	1,16	3,5	3,5 (ACEA)
5 %-Frau	1,53	4,0	3,5 (ACEA)
50 %-Mann	1,74	4,8	4,8 (EEVC WG 17)
95 %-Mann	1,92	5,9	4,8 (EEVC WG 17)

Jeder Komponententest ergibt einen HIC-Wert für eine bestimmte Kopfmasse an einer bestimmten Stelle auf der Fahrzeugfront. Die Fronten heutiger Fahrzeuge sind durch ein typisches Muster potentiell gefährlicher Regionen gekennzeichnet, die prinzipiell bei allen nicht optimierten Fahrzeugen zu finden sind:

- der Frontscheibenrahmen (Unter- und Oberkante, A-Säulen),
- die Haubenhinterkante und die Spritzwand,
- der Übergang Haube – Kotflügel,
- einige Strukturen im Frontklappenbereich.

Der Gefährdungsgrad durch diese Regionen kann je nach Fahrzeug durch unterschiedliche Geometrie und Steifigkeitsverteilung stärker oder schwächer ausgeprägt sein. Die verschiedenen Bereiche der Fahrzeugfront werden beim Kopfanprall mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit getroffen. Deshalb ist eine Wichtung der Prüfergebnisse an einer Fahrzeugfront anhand ihrer Relevanz im realen Unfallgeschehen erforderlich.

Der VERPS-Index

Im Folgenden wird ein Index entwickelt, der zunächst den fahrzeugseitigen Schutz des Kopfes für den frontal angestoßenen Fußgänger bewertet. Er macht Unterschiede zwischen einzelnen Fahrzeugen quantitativ bewertbar und erlaubt den Vergleich technischer Lösungen zum Fußgängerschutz an Fahrzeugfronten. Dieser Fußgängerschutzindex für den Kopfanprall stellt das bewertende Modul „Quantifizierung der Fußgängersicherheit“ in der vorgeschlagenen Methodik dar (s. Abb. 4.31). Entsprechend seiner Funktion als linearer Bewertungsmaßstab fahrzeugseitiger Fußgängerschutzmaßnahmen wird dieser mit VERPS-Index (Vehicle related Pedestrian Safety Index) bezeichnet. Der VERPS-Index wird in drei Schritten aus den ermittelten Messwerten M_{ij} des Komponententests abgeleitet:

Tabelle 4.9 Herleitung des VERPS-Index.

1.	Abbildung des Messwertes M_{ij} auf den Erfüllungsgrad E_{ij} mittels einer Bewertungsfunktion B (M_{ij}).	$E_{ij} = B\left(M_{ij}\right)$
2.	Wichtung des Erfüllungsgrades Eij anhand seiner Relevanz für das reale Unfallgeschehen mittels $R_{i,\,WAD}$ und $R_{j,\,Front}$	$R_{i,WAD} \cdot R_{j,Front} \cdot E_{ij}$
3.	Summierung der mit Relevanzfaktoren versehenen Erfüllungsgrade über alle Teilbereiche der Fahrzeugfront zum VERPS-Index	$VERPS = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} R_{i,WAD} \cdot R_{j,Front} \cdot E_{ij}$

Die Fahrzeugfront wird in Teilbereiche zerlegt, denen dann individuelle HIC-Werte zugeordnet werden (s. Abb. 4.34). Im Idealfall stammen möglichst viele dieser HIC-Werte aus direkten Messungen, im Standardfall werden aber eine Vielzahl aus Ähnlichkeitsbetrachtungen angrenzender Strukturen geschätzt. Der Teilindex i charakterisiert die Fahrzeuglängsrichtung und der Teilindex j die Fahrzeugquerrichtung. Die Größe der Teilbereiche orientiert sich an den Abmessungen der Prüfkörper und beträgt in Fahrzeuglängsrichtung 165 mm. In Fahrzeugquerrichtung werden in der Praxis durch die Erzeugung von neun Teilbereichen Breiten von 170 mm - 200 mm je nach Fahrzeugbreite erreicht. Bei der Untersuchung von besonders schmalen Fahrzeugen wie z. B. Einspurfahrzeugen oder besonders breiten Fahrzeugen (z. B. Busse und Lkw) kann die Zahl der Teilbereiche in Fahrzeugquerrichtung auch abweichen.

Die Bewertungsfunktion B stellt einen funktionalen Zusammenhang zwischen einem Messwert M (HIC-Wert) und einem Erfüllungsgrad E her. Der Erfüllungsgrad beschreibt dabei das Risiko für das Auftreten von schweren Kopfverletzungen AIS3+. Der Zusammenhang ist stark nichtlinear und wurde anhand empirischer Untersuchungen mittels eines S-förmigen Funktionsverlaufes approximiert (s. Abb. 4.32 und ISO 13232).

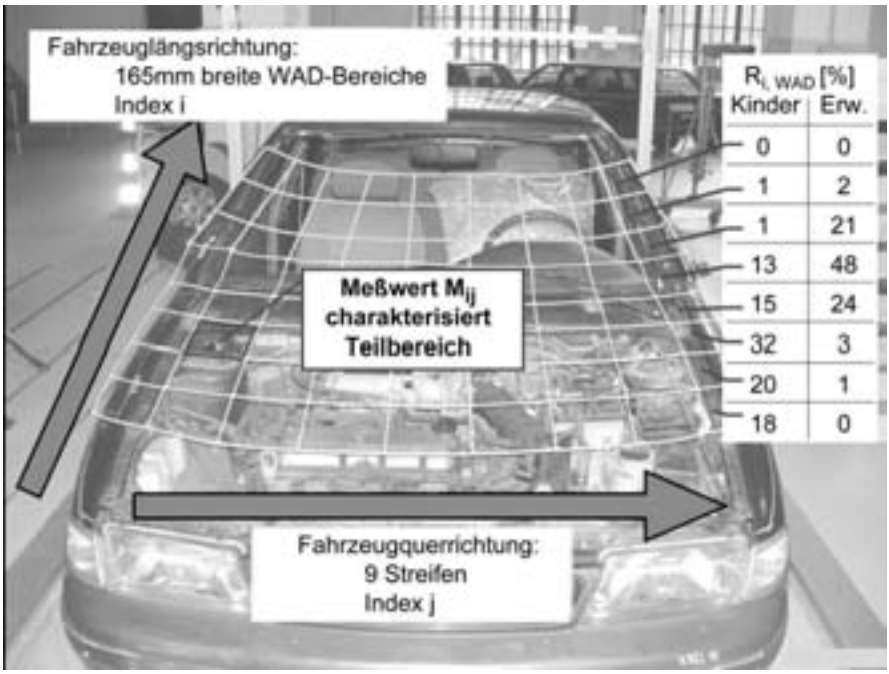
Abb. 4.32 Empirischer Zusammenhang zwischen gemessenem HIC-Wert und der Wahrscheinlichkeit des Eintretens von AIS3+-Kopfverletzungen (ISP - Injury Severity Probability) (ISO 13232). Zum Vergleich sind die Bewertungsskalen des EuroNCAP und JNCAP eingetragen.

Abb. 4.33 Mittels der Kinematikanalyse durchgeführte Transformation der Fußgängergrößenverteilung in eine errechnete fahrzeugspezifische Verteilung der Aufwurfweiten (WAD) für Kinder über 12 Jahre sowie Erwachsene für die Beispielfahrzeuge F, G und H.

Die Wichtung der Erfüllungsgrade E_{ij} für die Prüforte erfolgt anhand ihrer Relevanz im realen Unfallgeschehen. Entsprechend der Größenverteilung der Fußgänger ergeben sich in Fahrzeuglängsrichtung fahrzeugspezi-

fisch unterschiedliche Anprallbereiche an der Fahrzeugfront. Dies wird durch die Einführung des Relevanzfaktors $R_{i,WAD}$ berücksichtigt (s. Abb. 4.33). Die WAD-Verteilung ergibt sich dabei aus der Abbildung der Verteilung der Körpergrößen auf die fahrzeugspezifische Geometrie und die anschließende Klassierung entsprechend der WAD-Bereiche in 165 mm Schritten (Kühn 2004). In Fahrzeugquerrichtung wird eine durch Unfalldaten bestätigte Gleichverteilung der Anprallorte frontal erfasster Fußgänger angenommen ($R_{j,Front} = 1/9$).

Abbildung 4.34 zeigt die Einteilung der Fahrzeugfront in Teilbereiche und die Relevanzgewichtung der Abschnitte der Fahrzeugfront für das Beispielfahrzeug F. Man erkennt, dass basierend auf der Größenverteilung der verunfallten Kinder bis zwölf Jahre die Bereiche der Haube deutlich relevanter sind als die der Scheibe. Diese Wichtung kehrt sich - bezogen auf das untersuchte Beispielfahrzeug - für Kinder über zwölf Jahre und Erwachsene nahezu um (s. auch Abb. 4.33).



$R_{i,WAD}$ [%] Kinder	Erw.
0	0
1	2
1	21
13	48
15	24
32	3
20	1
18	0

Abb. 4.34 Einteilung der Fahrzeugfront in Teilbereiche und beispielhafte Darstellung des Relevanzfaktors in Fahrzeuglängsrichtung ($R_{i,WAD}$) für das Beispielfahrzeug F.

Der VERPS-Index wird hier getrennt für Kinder unter zwölf Jahre sowie für Erwachsene und Kinder über zwölf Jahre berechnet. Dies berücksichtigt die unterschiedlichen Anforderungen an Fußgängerschutzsysteme für Kinder und Erwachsene, die sich aus den unterschiedlichen Körpergrößen ergeben. Natürlich sind auch andere Abgrenzungen von speziellen Personengruppen möglich. Durch das Einsetzen der Bewertungsfunktion $B(M_{ij})$ (s. Abb. 4.32) und der Festlegung des Relevanzfaktors in Fahrzeugquerrichtung v ($R_{j,\,Front} = 1/9$) ergibt sich der Index zu:

$$VERPS = \sum_{i=1}^{m} R_{i,WAD} \left(\sum_{j=1}^{9} 1 - e^{-\left(\frac{HIC_{ij}+500}{1990}\right)^{4,5}} \right) / 9 \tag{4.1}$$

Gleichung 4.1 Berechnungsformel für den VERPS-Index mit eingesetzter Bewertungsfunktion $B(HIC_{ij})$ und ausgeklammertem Relevanzfaktor $R_{j,Front}=1/9$.

Der VERPS-Index kann Werte zwischen Null und Eins annehmen. Der Wert VERPS=0 bedeutet, dass kein Risiko für AIS3+-Kopfverletzungen während des Primäranpralls besteht. VERPS=1 steht für ein maximales Risiko für AIS3+-Kopfverletzungen für alle Fußgängergruppen, d.h. bei der untersuchten Kollisionsgeschwindigkeit von 45 km/h führt jeder Kopfanprall zu AIS3+-Verletzungen am Kopf. Ein Fahrzeug, das in allen Teilbereichen einen nach heutigen Erkenntnissen tolerablen HIC-Wert von 1000 aufweist, wird mit VERPS = 0,24 bewertet. In diesem Fall würden bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von 45 km/h in 24 % aller Fälle AIS3+-Kopfverletzungen auftreten. Das Verfahren ermöglicht somit eine Bewertung von Fahrzeugfronten auf einer linearen Skala – innerhalb der Grenzen der Genauigkeit der Annahmen.

4.4.2 Anwendung von VERPS zur Bewertung von Maßnahmen der passiven Sicherheit

Der für drei Beispielfahrzeuge F (mittlere Klasse[16]), G (kleine Klasse) und H (mittlere Klasse) berechnete VERPS-Index zeigt, dass der fahrzeugseitige Fußgängerschutz für Kinder und Erwachsene getrennt bewertet werden sollte. Aufgrund der unterschiedlichen Bereiche, die von Kindern und Erwachsenen beim Kopfanprall getroffen werden, können sich einzelne Maßnahmen auf die Personengruppen ganz unterschiedlich auswirken.

Beispielhaft wird der Serienzustand der beiden oben genannten Fahrzeuge mit zwei Varianten von aktiven Haubenaufstellungen verglichen. In

[16] Fahrzeugklassen entsprechend der Einteilung in Abb. 2.13

der ersten Variante wird die Haube im hinteren Bereich aufgestellt. In der zweiten Variante deckt ein Airbag zusätzlich die kritischen Bereiche der A-Säule und des unteren Scheibenrahmens ab.

Tabelle 4.10 Bewertung technischer Maßnahmen zum Fußgängerschutz mit Hilfe des VERPS – Index.

	Fahrzeug F (mittlere Klasse)		Fahrzeug G (kleine Klasse)		Fahrzeug H (mittlere Klasse)	
	Kinder	Erw.	Kinder	Erw.	Kinder	Erw.
Serienzustand	0,54	0,63	0,63	0,24	0,57	0,35
aufstellende Haube	0,22	0,60	0,43	0,24	0,22	0,35
aufstellende Haube mit Airbag	0,08	0,25	0,11	0,17	0,09	0,14

Bei allen Fahrzeugen kann das Risiko für AIS3+-Kopfverletzungen durch technische Maßnahmen am Fahrzeug stark gesenkt werden. Für Fahrzeug F ergab sich für die Gruppe der Erwachsenen eine Verbesserung des VERPS-Index von 0,63 auf 0,25, für Kinder sogar von 0,54 auf 0,08 (s. Tabelle 4.10). Das Fahrzeug G erreicht schon im Serienzustand einen vergleichsweise guten Wert von 0,24 für Erwachsene. Dies ist darauf zurückzuführen, dass alle für den Kopfanprall relevanten Teilbereiche auf der Windschutzscheibe liegen. Sie werden als unkritisch hinsichtlich der HIC-Werte beurteilt, sofern nicht der Scheibenrandbereich oder die A-Säule berührt wird (Fröming 2003). Aufgrund der Fahrzeugfrontgeometrie kann bei diesem Fahrzeug eine aufstellende Haube allein nur einen sehr geringen Teil der erwachsenen Fußgänger schützen.

Ein zusätzlicher Airbag am unteren Scheibenrahmen ermöglicht zwar zusätzlichen Schutz für kleinere Personen, aber die relevanteren WAD-Bereiche im oberen Scheibenbereich werden auch dadurch nicht abgedeckt. Entsprechend gering ist auch die Absenkung des VERPS-Index für Erwachsene von 0,24 auf 0,17. Für Kinder schneidet das Fahrzeug G im Serienzustand mit VERPS=0,63 schlechter ab als für Erwachsene, da mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Kopfanprall im Bereich der hinteren Haubenkante und des unteren Scheibenrahmens erfolgt. Durch beide Modifikationen kann dieser Wert vermindert werden. So sinkt der VERPS-Index

von 0,63 für die einfache aufgestellte Haube auf 0,43 und für die aktive Haube mit zusätzlichem Airbagschutz auf 0,11.

Ergänzend zu den real durchgeführten Tests an den Fahrzeugen F und G wurden numerische Komponententests am Fahrzeug H durchgeführt. Die Frontgeometrie dieses Fahrzeugs konnte ebenfalls der mittleren Klasse zugeordnet werden, obwohl es eine kürzere Fronthaube als das Fahrzeug F besitzt. Aufgrund der flacheren Front und der kürzeren Haube befinden sich beim Fahrzeug H ähnlich wie beim Fahrzug G für Erwachsene relevante Kopfanprallbereiche in der Windschutzscheibenregion. Die Kopfanprallregionen für Kinder liegen auch hier vermehrt im Haubenbereich. Die Implemtierung einer aufstellenden Haube hat ähnlich wie beim Fahrzeug G nur für Kinder eine Schutzfunktion. Die harten Kopfanprallbereiche der Erwachsenen in den Scheibenrandbereichen können erst durch die Verwendung einer aufstellenden Haube mit Airbag addressiert werden.

Die starke Reduktion des VERPS-Index für Kinder zeigt das große Potenzial aktiver Schutzmaßnahmen bei entsprechender Auslegung auf die Fußgängergröße. Anprallbereiche, die vermehrt von Erwachsenen getroffen werden, konnten nur wirksam durch eine aufstellende Haube in Verbindung mit einem Airbag zur Abdeckung des unteren Scheibenrahmens und der A-Säule geschützt werden.

Nahezu alle Trendaussagen zum Schutzpotenzial aktiver Strukturmaßnahmen aufgrund der Anprallkinematik und der Fahrzeuggeometrie konnten bestätigt werden (s. Abschn. 3.5, Tabelle 3.4). Die mittels des VERPS-Index ermittelten Sicherheitsgewinne verifizieren somit allein anhand der Anprallkinematik des Fußgängers postulierte Nutzenbetrachtungen zur aufstellenden Haube. Auch dort konnte gezeigt werden, dass für den Großteil der Fahrzeugfrontgeometrien eine signifikante Schutzwirkung für den Kopfanprall von Erwachsenen erst durch den Einsatz von Airbags erreicht wird, die den Spalt zwischen augestellter Haube und dem unteren Scheibenrahmen abdecken sollten.

Jedoch konnten zuvor ohne den VERPS-Index keine Aussagen zur konkreten Gestaltung und Auslegung dieser Schutzmaßnahmen getroffen werden. Die Trendaussagen zum Sicherheitsgewinn aktiver Strukturmaßnahmen konnten somit mit Hilfe des VERPS-Index weiter quantifiziert und in konkrete Anforderungen an die Fahrzeugstruktur überführt werden.

4.4.3 Bewertung von Maßnahmen der aktiven Sicherheit

Die bisherige Bewertung von Fahrzeugeigenschaften betrachtete nur Systeme der passiven Sicherheit. Systeme der aktiven Sicherheit wie z. B. ESP beeinflussen aber nachweislich das Unfallgeschehen ebenfalls positiv (Lie et al. 2005, Kreiss et al. 2005). Auch für den Bremsassistenten wird ein deutliches Schutzpotenzial vorhergesagt. Die wesentlichen Eigenschaften von Maßnahmen der aktiven Sicherheit sind die Unfallvermeidung und die Senkung der Kollisionsgeschwindigkeit. Der konkrete Sicherheitsgewinn von Assistenzsystemen konnte aber bisher nur retrospektiv durch die Unfallanalyse nachgewiesen werden. Die retrospektive Abschätzung des Nutzenpotenzials bezieht sich aber immer auf Fahrzeugflotten, in die noch keine passiven Schutzmaßnahmen gemäß Phase I der Fußgängerschutzgesetzgebung integriert sind. Mit Einführung dieser Maßnahmen können aber bereits einige Schutzpotenziale für den Fußgänger erreicht werden, die dann den Zusatznutzen von Assistenzsystemen schmälern könnten. Daher war man bisher auf grobe Abschätzungen angewiesen, wenn zwischen der Einführung von aktiven Sicherheitsmaßnahmen oder dem Ausbau der passiven Schutzmaßnahmen entschieden werden sollte. Mit der auf VERPS aufsetzenden Bewertungsmethodik VERPS+ lassen sich prospektiv die Sicherheitsgewinne von Assistenzsystemen bewerten und mit Maßnahmen der passiven Sicherheit hinsichtlich ihrer Wirkung im realen Unfallgeschehen vergleichen.

Die Kollisionsgeschwindigkeit ist noch vor der konstruktiven Gestaltung der Fahrzeugfront die wichtigste Haupteinflussgröße auf das Verletzungsrisiko des Fußgängers. Die Analyse von Unfalldaten gibt Aufschluss über die Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeiten bei Fußgängerunfällen in Deutschland. Durch die Einführung von Fahrerassistenzsystemen zur Unfallvermeidung wird sich diese Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeiten sicher ändern. Zunächst soll daher der Einfluss der Kollisionsgeschwindigkeit auf die Verletzungsschwere des Fußgängers fahrzeugspezifisch ermittelt werden, bevor das Schutzpotenzial bestimmter Assistenzsysteme ermittelt wird. Hierzu wird die erweiterte Bewertungsmethodik VERPS+ genutzt.

Quantifizierung des Verletzungsrisikos für verschiedene Kollisionsgeschwindigkeiten

Der positive Effekt der Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit auf die Verletzungsschwere des Fußgängers wurde in einer Reihe von Untersu-

chungen im Umfeld der Diskussionen um die Gestaltung der zweiten Phase der Fußgängerschutzrichtlinie belegt (s. dazu Kap. 4.3.1, und auch Hannawald 2004).

Drei maßgebliche Effekte spielen dabei aufgrund der veränderten Anprallkinematik des Fußgängers eine Rolle:

- Mit sinkender Kollisionsgeschwindigkeit verringert sich das Risiko, dass überhaupt ein Kopfanprall an die Fahrzeugstruktur stattfindet (s. Abb. 4.36).
- Die Kopfanprallgeschwindigkeit sinkt degressiv mit der Kollisionsgeschwindigkeit.
- Die Aufwurfweiten der Fußgänger sinken mit der Kollisionsgeschwindigkeit (s. Abb. 4.35).

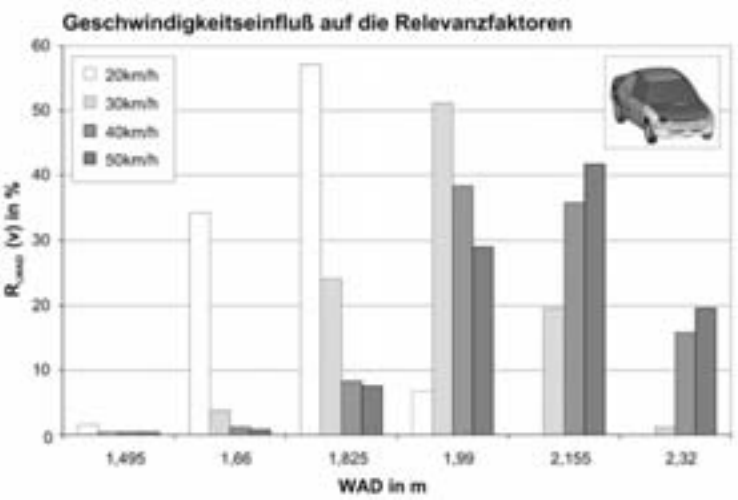


Abb. 4.35 Verschiebung der relevanten Kopfanprallbereiche für Erwachsene am Beispielfahrzeug H durch die Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit.

Durch die Auswertung von In-Depth-Unfallstatistiken kann der Einfluss der Kollisionsgeschwindigkeit auf das Risiko eines Anpralls des Kopfes an die Fahrzeugstruktur zahlenmäßig erfasst werden. Zur Ermittlung des Kopfanprallrisikos wurden wiederum die Unfalldaten aus Abschn. 1.3 und der Deutschen Versicherer ausgewertet, welche in Form eines geschwindigkeitsabhängigen Korrekturfaktors $P_{impact}(v)$ in die VERPS-Methodik einfließen (s. Gleichung 4.2). Dadurch wird der VERPS-Index zum VERPS+κ-Teilindex erweitert.

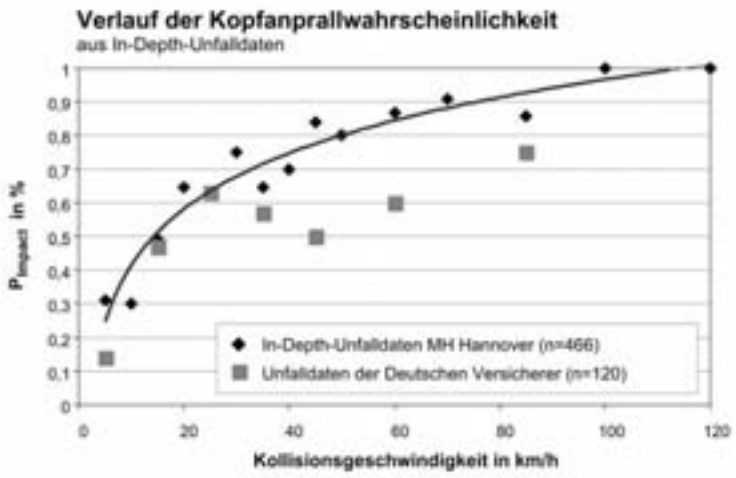


Abb. 4.36 Verlauf der aus Unfalldaten ermittelten Kopfanprallwahrscheinlichkeit P_{Impact}.

Die numerische Simulation des Komponententests mittels FE-Methoden ermöglicht die vollständig virtuelle Durchführung des VERPS-Bewertungsverfahrens (s. Abb. 4.31). Hierzu wurden an einem frei verfügbaren FE-Fahrzeugmodell (Beispielfahrzeug H, s. auch NCAC 2006) exemplarisch neun Prüfpunkte der Fahrzeugfront für verschiedene Kopfanprallgeschwindigkeiten und -winkel untersucht. Die Prüfeingangsbedingungen wurden hierbei durch die Kinematikanalyse für verschiedene Kollisionsgeschwindigkeiten ermittelt. Für vier Prüfpunkte wurden die ermittelten Beschleunigungsverläufe mit denen aus Realversuchen am Beispielfahrzeug F verglichen. Hierbei ließ sich eine allgemeine Übertragbarkeit und Verwertbarkeit der Rechenergebnisse feststellen. Exemplarisch sind die Beschleunigungsverläufe zweier Prüfpunkte in Abb. 4.37 und Abb. 4.38 dargestellt. Eine Verringerung der Kopfanprallgeschwindigkeit führt in Abhängigkeit von der getroffenen Fahrzeugstruktur zu einer Senkung der Kopfbeschleunigung.

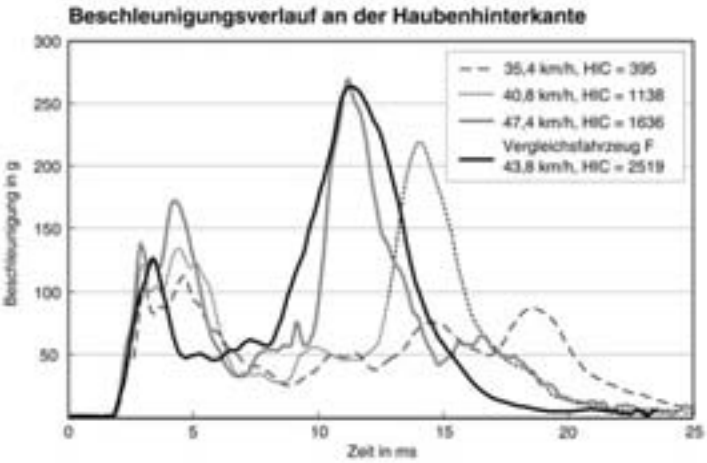


Abb. 4.37 Errechnete Beschleunigungsverläufe für unterschiedliche Kopfanprallgeschwindigkeiten beim numerisch durchgeführten Komponententest an der hinteren Haubenkante und der Vergleich mit einem Realversuch am Beispielfahrzeug F ($m_{Impaktor}$=3,5kg).

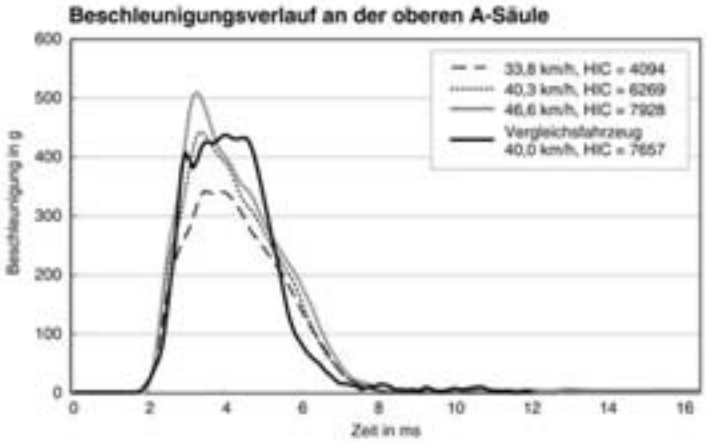


Abb. 4.38 Errechnete Beschleunigungsverläufe beim numerisch durchgeführten Komponententest an der A-Säule und der Vergleich mit einem Realversuch am Beispielfahrzeug F ($m_{Impaktor}$=4,8kg).

Hierbei lassen sich im Wesentlichen folgende Effekte beobachten:

- Bei sehr steifen Fahrzeugstrukturen (z. B. der A-Säule) sinken die Spitzenbeschleunigungen. Sie bleiben aber insgesamt weiterhin auf sehr kritischem Niveau (s. Abb. 4.38).

- „Kritische“ Strukturen wie z. B. der Übergang vom Kotflügel zur Haube erfahren Verbesserungen, die aber noch durch konstruktive Maßnahmen ergänzt werden müssen.
- Das „Durchschlagen“ auf steife Bereiche unterhalb der Motorhaube kann ab einer bestimmten Kopfanprallgeschwindigkeit ausbleiben und somit das Niveau der Beschleunigungen massiv senken (z. B. im Bereich der Spritzwand, Abb. 4.37).
- In „unkritischen“ Bereichen werden die auftretenden Beschleunigungen weiter abgesenkt.

Überführt man die errechneten HIC-Werte in Verletzungswahrscheinlichkeiten, so kann für die einzelnen Kollisionsgeschwindigkeiten unter Berücksichtigung der Kopfanprallwahrscheinlichkeit $P_{Impact}(v)$ der VERPS+κ-Index berechnet werden und somit der Geschwindigkeitseinfluss auf das Kopfverletzungsrisiko fahrzeugspezifisch ermittelt werden.

$$VERPS+_k = P_{Impact}(v) \cdot \sum_{i=1}^{m} R_{i,WAD}(v) \cdot \left(\sum_{j=1}^{9} 1 - e^{-\left(\frac{HIC_{ij}(v)+500}{1990}\right)^{4,5}} \right) / 9 \tag{4.2}$$

Gleichung 4.2 Erweiterung des VERPS-Index durch Einführung einer geschwindigkeitsabhängigen Kopfanprallwahrscheinlichkeit P_{Impact}. Der Subindex k bringt den Bezug zu einer konkreten Unfallkonstellation zum Ausdruck.

Die Anwendung des erweiterten Bewertungsverfahrens VERPS+κ auf das Beispielfahrzeug H ergibt als Teilergebnis eine quantifizierbare Reduktion des Kopfverletzungsrisikos in Abhängigkeit der Kollisionsgeschwindigkeit. In Abb. 4.39 sind zusätzlich passive Schutzmaßnahmen am Beispielfahrzeug H angesetzt und zum Vergleich mittels VERPS+ bewertet. Dabei sind die bewerteten Strukturmaßnahmen in der Tabelle 4.11 erläutert.

Für Kinder bis 12 Jahre wird ausgehend von einem Wert von ca. VERPS+κ = 0,5, der den Serienzustand des Fahrzeugs beschreibt, durch die Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit ein nahezu linear fallendes Verletzungsrisiko erreicht. Dies ist im Wesentlichen auf die Reduktion der Beschleunigungswerte beim Kopfanprall im Haubenbereich zurückzuführen. Im Gegensatz zu den Kindern ergibt sich bei den Erwachsenen keine durchgehende Reduktion des VERPS+-Index. Beginnend bei 50 km/h kann zunächst eine geringe Reduktion des Verletzungsrisikos erreicht werden, während bei kleiner werdenden Kollisionsgeschwindigkeiten das Verletzungsrisiko wieder ansteigt.

Tabelle 4.11 Beschreibung der numerisch untersuchten Strukturmaßnahmen. Alle HIC-Angaben beziehen sich auf eine Kollisionsgeschwindigkeit von v_K=35 km/h. Die Validität und Übertragbarkeit der Ergebnisse wurde durch Vergleich mit Realversuchen sichergestellt, s. auch Abb. 4.37 und 4.38

Name	Beschreibung
Serienzustand	Originalzustand des virtuellen Fahrzeugmodells
Phase I	– 2/3 der Haubenfläche: HIC < 1000 – 1/3 des Haubenbereiches: HIC < 2000 – keine Strukturmaßnahmen im Bereich der Frontscheibe
Phase II	– gesamter Haubenbereich: HIC < 1000 – keine Strukturmaßnahmen im Bereich der Frontscheibe
Phase II + unterer Scheibenrahmen HIC < 2000	– gesamter Haubenbereich: HIC < 1000 – unterer Scheibenrahmen durch passive Strukturmaßnahmen: HIC < 2000 – keine Strukturmaßnahmen im Bereich der A-Säule
Phase II + Airbag für unteren Scheibenrahmen	– gesamter Haubenbereich: HIC < 1000 – unterer Scheibenrahmen durch Airbag abgedeckt: HIC < 1000 – keine Strukturmaßnahmen im Bereich der A-Säule
Phase II + A-Säulenairbag	– gesamter Haubenbereich HIC < 1000 – unterer Scheibenrahmen sowie Teile der A-Säule durch einen Airbag abgedeckt: HIC < 1000

Die Erklärung hierfür lässt sich direkt aus der VERPS+-Verfahrenskette ableiten: Durch die verringerte Anstoßgeschwindigkeit des Fußgängers verringert sich dessen Aufwurfweite auf die Fahrzeugfront, so dass sich für viele Fußgängergrößen die Kopfanprallregion aus dem Scheibenbereich in den Bereich des unteren Scheibenrahmens und der Haubenhinterkante verlagert. In diesen Bereichen sind jedoch durchweg höhere Belastungswerte als im mittleren Scheibenbereich zu verzeichnen.

Es bleibt darauf hinzuweisen, dass dieser Effekt des Anstiegs des Verletzungsrisikos bei sehr niedrigen Kollisionsgeschwindigkeiten streng fahrzeugspezifisch ist und entscheidend von der Fahrzeugfrontgeometrie und der Lage der steifen Anprallbereiche (z. B. Haubenhinterkante, unterer Scheibenrahmen) abhängt. Bei Fahrzeugen mit längerer Haube ist ein Absinken des Verletzungsrisikos zu erwarten, da sich hier der Hauptanprallbereich des Kopfes aus der Region des unteren Scheiben-

rahmens/Haubenhinterkante in den Bereich der Fronthaube verschiebt. Bei Kleinwagen wird ebenfalls keine Verschiebung des Kopfanprallbereiches aus dem Scheibenbereich heraus erwartet, so dass auch hier kein Anstieg des Verletzungsrisikos bei geringen Kollisionsgeschwindigkeiten auftreten sollte.

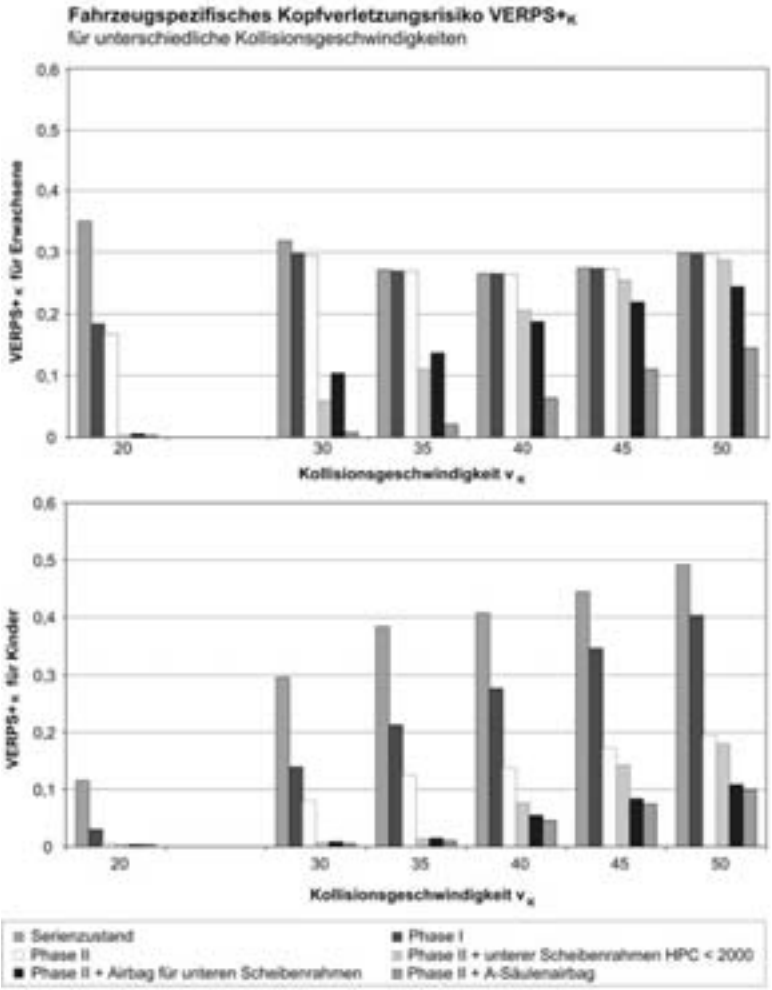


Abb. 4.39 Beeinflussung des VERPS+κ-Index durch Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit für das untersuchte Beispielfahrzeug H und Vergleich mit verschiedenen passiven Schutzmassnahmen.

Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit durch Fahrerassistenzsysteme

Ausgehend von der Annahme, dass Fahrerassistenzsysteme (FAS) nur unterstützend wirken und der Fahrer die Verantwortung über das Fahrzeug behält, sollen nun verschiedene Ausbaustufen von Bremsassistenten hinsichtlich ihrer Eigenschaft zur Geschwindigkeitsreduktion und der Auslösequote im Realunfallgeschehen klassifiziert werden. Hierzu wurden Einzelsimulationen aller vorhandenen In-Depth-Unfallkonstellationen vorgenommen und die Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit Δv_k und der Anteil der vermiedenen Unfälle für unterschiedliche Eingriffstrategien des Bremsassistenten errechnet (s. Abb. 4.40). Das Fahrzeug wird durch ein erweitertes Einspurmodell mit nichtlinearen Reifenkennfeldern modelliert. Der Simulationsprozess wurde anhand von Fahr- und Reaktionsversuchen (54 Probanden) mit einem Messfahrzeug validiert (s. auch Schulz 2006 u. Weyer 2006). Das Fahrermodell enthält Reaktionszeiten, Umsetzzeiten und Bremsdruckverläufe (s. Abb. 4.41). Der gesamte Simulationsprozess wurde automatisiert, sodass eine Vielzahl an Kombinationen von Unfallsituationen und Fahrerverhalten analysiert werden kann.

Abb. 4.40 Methodik zur automatischen fallbasierten Analyse von In-Depth-Unfalldaten zur Bewertung des Geschwindigkeitsreduktionspotenzials.

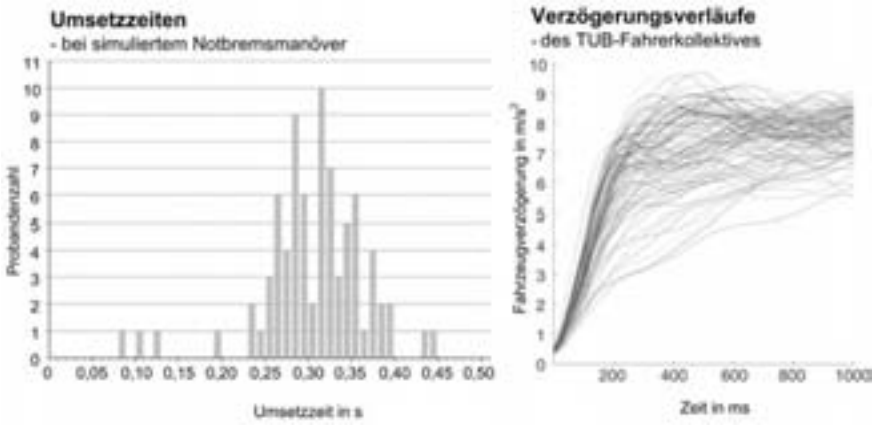


Abb. 4.41 Umsetzzeiten und Verzögerungsverläufen als Kenngrößen des untersuchten Fahrerkollektives der TU Berlin (Fröming 2006)

Da Bremsassistenten in ihrer Funktion und Wirkungsweise sehr unterschiedlich sein können, werden hier drei Ausbaustufen von Bremsassistenten untersucht (s. auch Tabelle 4.12):

- *sBAS*: Vollbremsung bei Überschreiten fester Schwellwerte für die Betätigungsgeschwindigkeit der Bremseinrichtung.
- *aBAS I*: Vollbremsung bei Loslassen des Gaspedals, wenn zusätzlich ein relevantes Hindernis detektiert wurde.
- *aBAS II*: Vollautonome Teilbremsung mit 0,5g bei TTC < 1 s zum relevanten Hindernis und Vollbremsung bei Loslassen des Gaspedals.

Tabelle 4.12 Bremsstrategien und zugehörige Zustandswahrscheinlichkeiten der analysierten Bremsassistenten (s. auch Abb. 4.43, nach Fröming 2006).

	Aktivierungswahrscheinlichkeit des BAS im Realunfall	**Zustandswahrscheinlichkeit**			
		Fahrer bremst		Fahrer bremst nicht	
		BAS aktiv	BAS inaktiv	BAS aktiv	BAS inaktiv
sBAS	47 % (Unselt 2004)	30 %	34 %	0 %	36 %
aBAS I	85 % (geschätzt)	54 %	10 %	0 %	36 %
aBAS II	85 % (geschätzt)	54 %	10 %	31 %	5 %

Intelligente Bremsassistenten mit Umfeldsensorik steigern die Auslösewahrscheinlichkeit und können durch ihr früheres Eingreifen die Kollisionsgeschwindigkeit stark herabsetzen. Dies steigert auf zwei unterschied-

liche Arten den Gesamtnutzen dieser Bremsassistenten im Unfallgeschehen.

Entsprechend der Eingriffsstrategie des Standardbremsassistenten sBAS wird in drei der vier möglichen Betriebszustände keine Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit erreicht. Mit der Ausbaustufe aBAS I wird eine Eingriffstrategie definiert, die die Fahrverantwortung jederzeit beim Fahrer belässt, aber bei einem erkannten Hindernis vor dem Fahrzeug ein schnelles Loslassen vom Gaspedal bereits als Notbremswunsch des Fahrers interpretiert und eine Vollbremsung einleitet. Auf diese Weise kann bereits während der Umsetzzeit und somit ca. 0,3 s früher gebremst werden. Per Definition erfolgt beim aBAS I eine Klassifizierung des Hindernisses ausschließlich durch den Fahrer. Das erlaubt es, eine gewisse Wahrscheinlichkeit für Fehlerkennungen des Sensorsystems zuzulassen und erhöht so die Möglichkeit einer Realisierung zu vertretbaren Kosten. Durch den Einsatz der aBAS I-Bremsassistenzstrategie kann die Kollisionsgeschwindigkeit gebremster Unfälle im Mittel um 11,6 km/h gesenkt werden und es können bis zu 26 % der Unfälle durch die frühzeitigere und bessere Bremsung verhindert werden (s. Tab. 4.13).

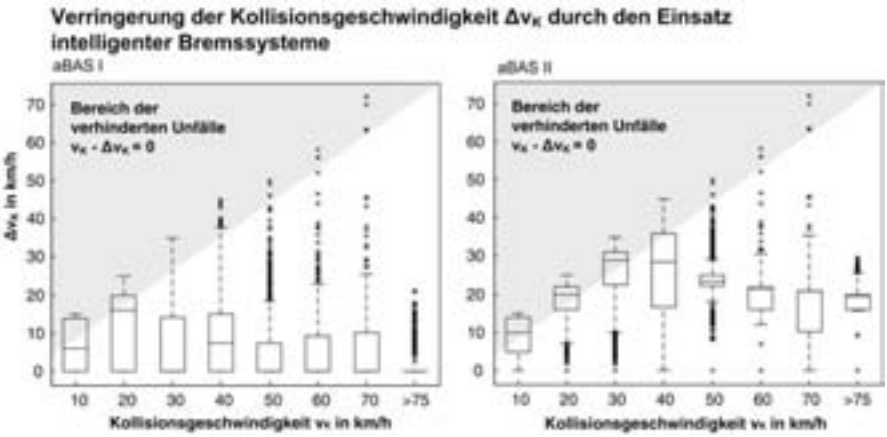


Abb. 4.42 Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeiten durch die Bremsassistenzsysteme aBAS I und aBAS II gegenüber den ursprünglichen Kollisionsgeschwindigkeiten ohne Bremsassistenz.

Erst in der Eingriffstrategie des aBAS II wird auch ohne Reaktion des Fahrers eine Teilbremsung von 0,5 g eingeleitet, wenn eine kritische Fahrsituation vorliegt. Hierbei wird angenommen, dass innerhalb der nächsten Sekunde ein Aufprall auf das Hindernis erfolgen würde. Somit kann durch die vollautonome Teilbremsung auch die Kollisionsgeschwindigkeit bei

ungebremsten Unfällen signifikant reduziert werden (s. Tabelle 4.13). Im analysierten Datenbestand waren ca. 36 % aller Fußgängerunfälle ungebremst. Insbesondere jene Unfallkonstellationen, die bisher Kollisionsgeschwindigkeiten von bis zu 40 km/h aufwiesen, profitieren besonders stark von der Einführung der aBAS II-Assistenzstrategie (s. Abb. 4.42). In diesen Unfällen erfolgt meist noch eine Bremsung durch den Fahrer. Sie wird durch den Bremsassistenten optimiert und durch die autonome Teilbremsung ergänzt. 58 % der Unfälle können sogar gänzlich verhindert werden. Das konkrete Ausmaß der verhinderten Unfälle hängt dabei stark von der Verzögerung der autonomen Teilbremsung ab. Unfälle, die bisher bei Kollisionsgeschwindigkeiten über 50 km/h stattfanden, finden überdurchschnittlich oft ungebremst statt. In diesen Situationen kann nur durch die autonome Teilbremsung die Kollisionsgeschwindigkeit reduziert werden.

Tabelle 4.13 Anhand der automatisierten Einzelfallanalyse ermittelte Zahl der durch das Bremsassistenzsystem verhinderten Unfälle sowie Medianwerte der reduzierten Kollisionsgeschwindigkeiten.

	Errechneter Anteil der vermiedenen Unfälle	median Δv_k bei gebremsten Unfällen	median Δv_k bei ungebremsten Unfällen
sBAS	6 %	2,6 km/h	0 km/h
aBAS I	26 %	11,6 km/h	0 km/h
aBAS II	58 %	20,1 km/h	autonome Bremsung! 17,6 km/h

Anwendung von VERPS+ zur Bewertung von Bremsassistenzsystemen

Basierend auf den Erkenntnissen der Unfallanalyse, den Veröffentlichungen zur Zustandswahrscheinlichkeit für Standard-Bremsassistenten und der errechneten Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit Δv_k kann nun das zu erzielende Schutzpotenzial fahrzeugspezifisch ermittelt werden. Dazu werden für die einzelnen Betriebszustände der Bremsassistenten die zugehörigen VERPS+$_K$-Teilindizes anhand ihrer Auftretenswahrscheinlichkeit im realen Unfallgeschehen zum Fußgängerschutzindex VERPS+ (s. Tabelle 4.12 und Abb. 4.43) statistisch gewichtet zusammengefasst.

Die alleinige Betrachtung der reduzierten Kollisionsgeschwindigkeiten ist hierfür nicht statthaft, da der Zusammenhang zwischen Kollisionsgeschwindigkeit und Verletzungsrisiko stark nichtlinear ist. Vielmehr muss für jede reduzierte Kollisionsgeschwindigkeit ein Verletzungsrisiko ange-

geben werden. Mit der entworfenen Methodik (s. Abb. 4.40) kann jeder analysierten Unfallkonstellation ein VERPS+κ-Teilindex zugewiesen werden. Die anschließende statistisch gewichtete Mittelung zum VERPS+-Index liefert so eine Aussage zum mittleren Verletzungsrisiko in allen analysierten Unfallkonstellationen.

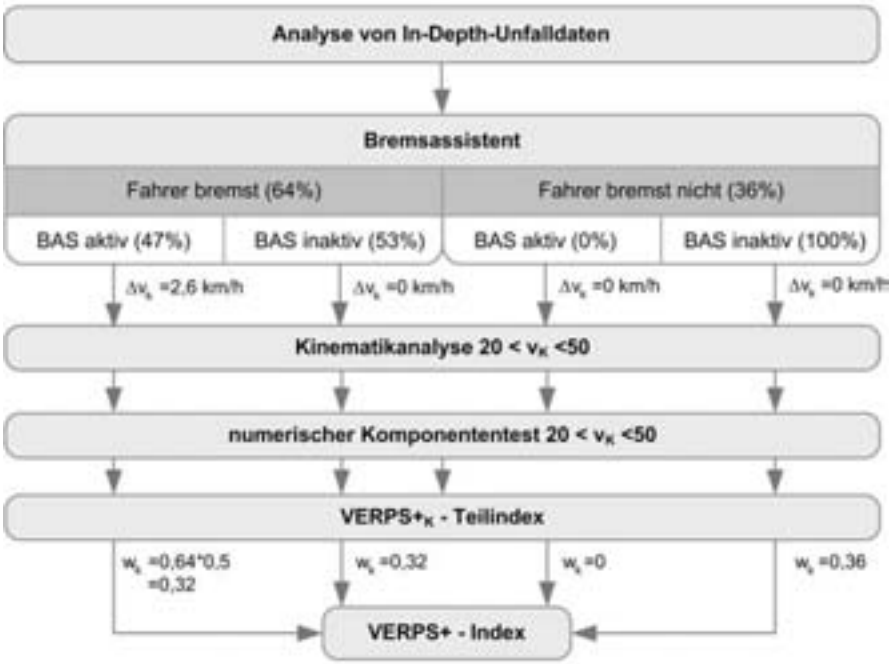


Abb. 4.43 Schematische Vorgehensweise zur Ermittlung eines durchschnittlichen Verletzungsrisikos über alle analysierten Kombinationen (n_{gesamt}=21762) aus Fahrern (n_{Fahrer}=54) und Unfallkonstellationen (n_{Unfall}=403). Für den sBAS sind die Wichtungsparameter für die Betriebszustände des Assistenzsystems beispielhaft angegeben (nach Fröming et al. 2005)

Insgesamt kann für das untersuchte Fahrzeug H durch den alleinigen Einsatz des sBAS nicht das Schutzpotenzial von Strukturmaßnahmen erreicht werden, wie es in Phase I der Gesetzgebung zum Fußgängerschutz gefordert ist (vgl. Serienzustand und sBAS sowie Phase I ohne BAS, s. Abb. 4.44 und 4.45). Insbesondere Kinder profitieren sehr stark von Strukturmaßnahmen im Haubenbereich, während Erwachsene erst durch fortgeschrittene Strukturmaßnahmen im Scheibenbereich wirksam geschützt werden können.

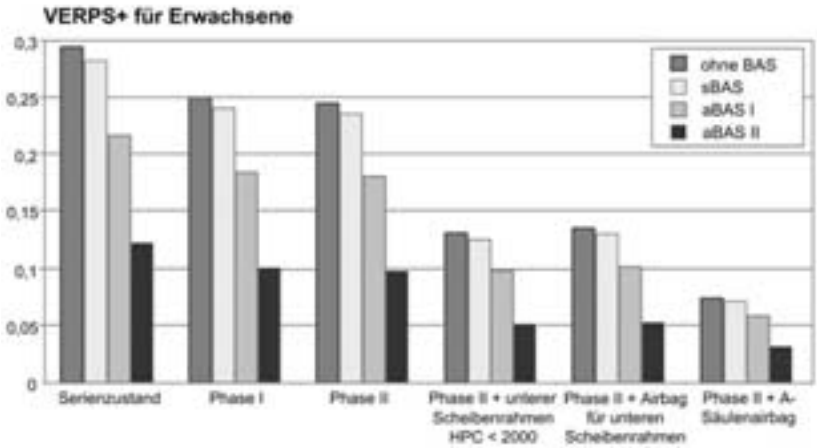


Abb. 4.44 Durchschnittliches Risiko für schwere Kopfverletzungen bei Erwachsenen abhängig von den implementierten strukturellen und aktiven Sicherheitsmaßnahmen für das Beispielfahrzeug H (TUB Fahrermodell und In-Depth-Unfalldaten, Beschreibung der technischen Maßnahmen am Fahrzeug s. Tab. 4.11 und 4.12).

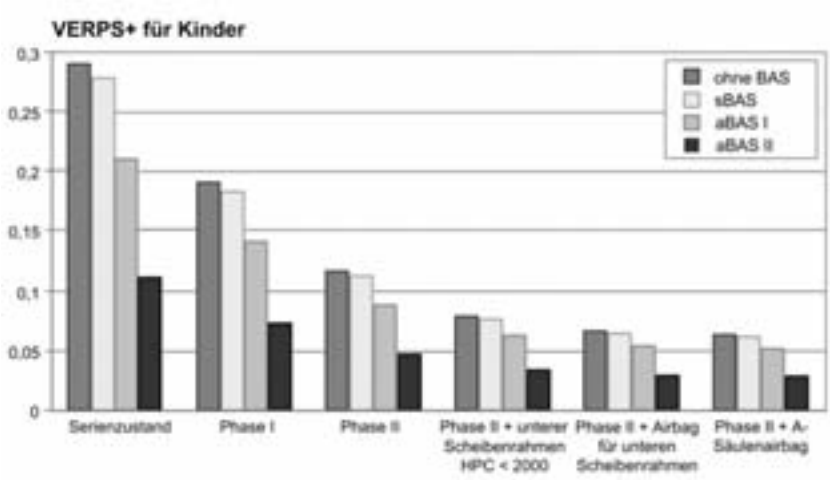


Abb. 4.45 Durchschnittliches Risiko für schwere Kopfverletzungen bei Kindern abhängig von den implementierten strukturellen und aktiven Sicherheitsmaßnahmen für das Beispielfahrzeug H (TUB Fahrermodell und In-Depth-Unfalldaten, Beschreibung der technischen Maßnahmen am Fahrzeug s. Tab. 4.11 und 4.12).

Mit Einführung von intelligenten Bremsassistenten, die sowohl Fahrerinformationen als auch Umgebungsinformationen verwerten, kann die Sicherheit von Fußgängern im Straßenverkehr beträchtlich gesteigert werden. Aufgrund erweiterter Eingriffsstrategien kann sowohl die mittlere Kollisionsgeschwindigkeit deutlich herabgesetzt als auch die Auslöserate von BAS-Systemen im Realunfall stark erhöht werden. Die Ergebnisse der Analysen zeigen, dass sowohl stark verbesserte Strukturmaßnahmen und fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme jeweils für sich allein ein vergleichbares Schutzpotenzial bieten (z. B. Serienzustand ohne BAS und Phase II mit Airbag für unteren Scheibenrahmen ohne BAS sowie Serienzustand mit aBAS II, s. Abb. 4.44 und 4.45).

Durch das hohe Unfallvermeidungspotenzial wird für Bremsassistenten mit Umfeldsensorik in jedem Fall ein Sicherheitsgewinn nachgewiesen. Wird die Senkung der Kollisionsgeschwindigkeit noch durch fahrzeugseitige Strukturmaßnahmen ergänzt, vergrößert sich der Sicherheitsgewinn sowohl für Kinder als auch für erwachsene Fußgänger. Eine Kombination von passiven Schutzmassnahmen und Fahrerassistenzsystemen zeigt somit theoretisch eine ideale Ergänzung (s. Phase II + A-Säulenairbag und aBASII in Abb. 4.44 und 4.45, s. auch Abb. 3.45). Die Möglichkeit zur Umsetzung wird u.a. durch Kostenaspekte beeinflusst.

Der Vergleich verschiedener Schutzmaßnahmen bietet die Möglichkeit, die für das untersuchte Fahrzeug effizientesten Fußgängerschutzmaßnahmen zu identifizieren und in sinnvollen Kombinationen den Nutzen vor dem Hintergrund des realen Unfallgeschehens zu maximieren.

Zusätzlich ist eine Bewertung des Verletzungsrisikos während des Sekundäranpralls des Fußgängers notwendig, um das volle Schutzpotenzial von Bremsassistenzsystemen zu erfassen und für zukünftige Fahrzeuggenerationen bewertbar zu machen. Es ist möglich, dass die Senkung der Kollisionsgeschwindigkeiten die Abwurfkinematik positiv beeinflusst.

4.4.3 Fazit und Ausblick

Zur Bewertung möglicher politischer Optionen bei der Gestaltung von Vorschriften zum Fußgängerschutz ist es sinnvoll, Kosten und Nutzen gegeneinander abzuwägen. Dabei ist es wichtig, das Bremsassistenzsysteme – abhängig von der Ausbaustufe – mit relativ geringem Mehraufwand realisiert werden können. Sie greifen in der Regel auf Komponenten zurück, die aus anderen Gründen bereits im Fahrzeug verbaut werden. Selbst die Sensorik scheint für Komfortfunktionen wie ACC bereits Eingang in den Markt zu finden. Optische Systeme zur Spurerkennung sind ebenfalls an-

gekündigt. Zudem schützen Bremsassistenten nicht nur Fußgänger sondern können auch viele andere Unfallsituationen positiv beeinflussen. Beim Bremsassistenten in der Anwendung auf den Fußgängerunfall handelt es sich also um eine relativ kostengünstige Technologie.

Eine entsprechende Bewertung für strukturelle Maßnahmen muss fallweise erfolgen. Möglicherweise sind Modifikationen am Vorderbau mit geringen Mehrkosten möglich (s. auch von Hübbenet 2003). Wenn zusätzliche Elemente erforderlich sind, wenn Folgekosten durch erhöhte Reparaturanfälligkeit oder zusätzlichen Wartungsaufwand zu befürchten sind, kann sich diese Einschätzung ändern.

Weiterentwicklungen des VERPS-Bewertungsverfahrens

Das VERPS-Bewertungsverfahren entstand mit dem Ziel, fahrzeugseitige Maßnahmen zum Fußgängerschutz möglichst objektiv und biomechanisch korrekt bewertbar zu machen. Die hierfür abgeleitete vierstufige Vorgehensweise wurde modular gestaltet, um neue Erkenntnisse und Methoden aus der Biomechanik oder der numerischen Simulation berücksichtigen zu können.

Mit den verbesserten numerischen Simulationsmöglichkeiten stehen dem VERPS-Bewertungsverfahren neue Möglichkeiten zur Bewertung der Fußgängerschutzeigenschaften zur Verfügung. Hierbei kann durch weiter entwickelte biomechanische Schutzkriterien die Prognose für Kopfverletzungen des Fußgängers deutlich verfeinert und das Schutzpotenzial der damit am Fahrzeug abgeleiteten technischen Maßnahmen optimiert werden.

Durch die Verwendung von FE-Fußgängermodellen kann künftig die Aufteilung in die numerische Simulation der Anprallkinematik und den virtuell oder experimentell durchgeführten Komponententest entfallen. An Stelle dessen träte vielmehr die Gesamtsimulation der menschlichen Biomechanik, die über den Kopfanprall hinaus die Optimierung einer Vielzahl weiterer Verletzungsschwerpunkte erlauben wird. Hier seien vor allem Hals, Thorax und Abdomen als weitere Verletzungsschwerpunkte im Haubenbereich genannt (s. Abb. 1.38 sowie Tab. 1.5).

Hinsichtlich einer möglichen Überführung des VERPS-Bewertungsverfahrens in ein im praktischen Versuchsalltag anwendbares Testverfahren muss die Komplexität des Verfahrensablaufs reduziert werden. Insbesondere die fahrzeugspezifische Generierung der Prüfbedingungen bedeutet einen Mehraufwand, der schon heute durch teilautomatisierte numerische Simulationen begrenzt wird. Zukünftig wäre auch die vorherige Bestimmung der Prüfbedingungen für die in diesem Buch vorgestellten

Fahrzeugkategorien denkbar (s. Abschn. 2.2.2, Abb. 2.13). Die kategoriespezifischen Prüfbedingungungen würden dann ähnlich wie beim Verfahren nach JapanNCAP aus entsprechenden Tabellen entnommen werden können.

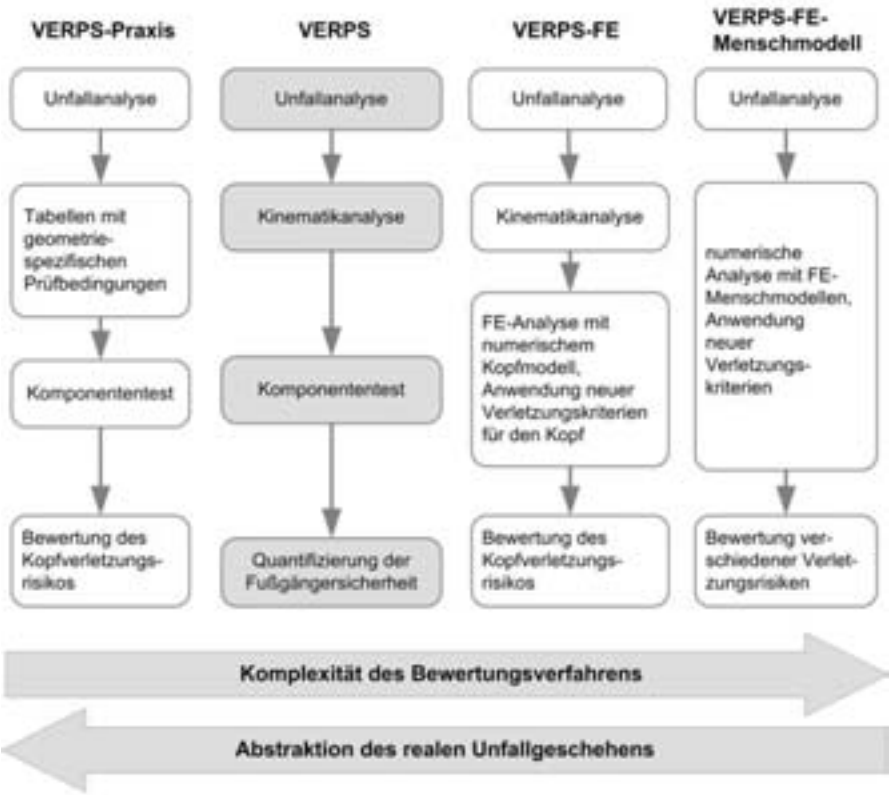


Abb. 4.46 Strategien zur Weiterentwicklung des VERPS-Bewertungsverfahrens.

Zukünftiges Fußgängerunfallgeschehen in Deutschland

Das dargestellte Verfahren zur Bestimmung des Sicherheitsgewinns nach VERPS+ basiert auf der Verletzungsskalierung nach AIS, die sich in der Unfallforschung durchgesetzt hat. Damit kann der Sicherheitsgewinn von passiven und aktiven Schutzmaßnahmen fahrzeugspezifisch quantifiziert werden.

Die Klassifikation in Verletzte und Getötete ermöglicht eine andere Beschreibung des erreichbaren Sicherheitsgewinns. Bisher wurden Aussagen

zum Nutzen von aktiven Sicherheitssystemen anhand von Risikofunktionen getroffen (Busch 2005). Hierfür müssen globale Aussagen zum Verletzungs- und Tötungsrisiko für verunglückte Fußgänger aus der Unfallstatistik abgeleitet werden. In Abb. 4.47 ist das Tötungsrisiko für frontal erfasste Fußgänger über der Kollisionsgeschwindigkeit abgeleitet aus In-Depth-Unfalldaten gezeigt. Ähnliche Risikofunktionen können für das Auftreten von Verletzungen aus den In-Depth-Unfalldaten abgeleitet werden. Diese basieren jedoch auf einer gemischten Fahrzeugflotte und lassen so keine Aussagen zum Sicherheitsgewinn durch die Kombination von Maßnahmen der aktiven Sicherheit und Strukturmaßnahmen an einem konkreten Fahrzeug zu. Bei diesen Risikofunktionen kann durch den Einsatz von Bremsassistenzsystemen das mit der geringeren Kollisionsgeschwindigkeit einhergehende sinkende Tötungs- und Verletzungsrisiko auf die Zahl der verletzten und getöteten Fußgänger in Deutschland bezogen werden und somit eine Prognose des Sicherheitsgewinns durch Assistenzsysteme getätigt werden (s. Tabelle 4.14).

Abb. 4.47 Tötungsrisiko für frontal erfasste Fußgänger (Weyer 2006)

Zur Prognose des zukünftigen Unfallgeschehens ist der VERPS+-Index indirekt ebenfalls geeignet. Mit den im VERPS+-Index ermittelten reduzierten Kollisionsgeschwindigkeiten und der Berücksichtigung der durch Bremsassistenz verhinderten Unfälle kann eine Prognose zur Anzahl der Getöteten in der Bundesrepublik Deutschland angegeben werden. Der Sicherheitsgewinn durch den kombinierten Einsatz von aktiven und passiven Sicherheitsmaßnahmen kann durch die Übertragung der relativen Reduktion des VERPS+-Index (s. Abb. 4.44 und 4.45) auf die Getöteten- und Verletztenzahlen zumindest grob abgeschätzt werden.

Tabelle 4.14 Prognose zur Anzahl der getöteten und verletzten Fußgänger in Deutschland bei Einsatz fortschrittlicher Strukturmaßnahmen und Assistenzsysteme (Ausstattungsquote 100%).

	VERPS+		In-Depth-Unfalldaten	
Maßnahmenkatalog	Getötete Fußgänger	Verletzte Fußgänger	Getötete Fußgänger	Verletzte Fußgänger
Stand 2004	838	34077		
sBAS	819	33258	803	31537
sBAS + Phase I	708	28478		
aBAS I	711	28614	700	28066
aBAS I + Phase II	583	23131		
aBAS II	556	21992	501	20995
aBAS II + Phase II + A-Säulenairbag	415	15940		

Das Ziel der Kommission der Europäischen Gemeinschaften, die Zahl der Unfallopfer im Straßenverkehr in der Europäischen Union bis 2010 zu halbieren (Kommission 2003), könnte im Bereich des Fußgängerschutzes in der Bundesrepublik Deutschland theoretisch durch den flächendeckenden Einsatz von sehr fortgeschrittenen Bremsassistenzsystemen und passiven Schutzmaßnahmen erreicht werden. Praktisch ist deren flächendeckender Einsatz bis 2010 unmöglich, daher müssen zur Erfüllung der Vorgabe weitere Maßnahmen wie infrastrukturelle Verbesserungen, Verkehrserziehung und auch Verkehrsüberwachung eingeführt bzw. ausgebaut werden.

Literatur

Akiyama A, Yoshida S, Matsuhashi T, Moss S, Salloum M, Ishikawa H, Konosu, A (1999a) Development of Human-Like Pedestrian Dummy. SAE paper No. 1999-01-0082, 1999.

Akiyama A, Yoshida S, Matsuhashi T, Moss S, Salloum M, Ishikawa H, Konosu, A (1999b) Development of Simulation Model and Pedestrian Dummy. JSAE Spring Convention, 1999.

ANCAP (2005) Australian New Car Assessment Programme, http://www.aaa.asn.au/ancap.htm.

BASt (1995) Gefährdung durch Frontschutzbügel an Geländefahrzeugen. Berichte der BASt, Fahrzeugtechnik, Heft F12; ISBN 3-89429-908-8.

Busch (2005) Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Prognose des Sicherheitsgewinns ausgewählter Fahrerassistenzsysteme. Fortschrittsberichte VDI Nr. 588, 2005, ISBN 3-18-358812-9.

DaimlerChrysler (2006) Pressematerial zum Thema Fußgängerschutz an der neuen S-Klasse, 2006.

EEVC WG 17 Report (1998) Improved Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection Afforded by Passenger Cars. Final Report, Dezember 1998.

Eggert E (1998) Experimentelle Untersuchungsmethoden zur passiven Sicherheit bei Fußgänger-Fahrzeug-Kollisionen. TU Berlin, Fachgebiet Kraftfahrzeuge, Studienarbeit, 1998.

Esas (2002) Empfehlungen für das Sicherheitsaudit von Straßen (ESAS). Ausgabe 2002, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Straßenentwurf, Köln 2002.

EuroNCAP (2004) European New Car Assessment Programme (EuroNCAP) – Pedestrian Testing Protocol.

Europäische Union (2003) Richtlinie 2003/102/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17.11.2003 zum Schutz von Fußgängern und anderen ungeschützten Verkehrsteilnehmern vor und bei Kollisionen mit Kraftfahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 70/156/EWG des Rates. Amtsblatt der Europäischen Union, Der Verlag der Europäischen Union, http://europa.eu.int/comm/enterprise/automotive/pagesbackground/pedestrian protection/index.htm, Zugriff 11. Juli 2006.

Europäische Union (2005) Stakeholder consultation on a preliminary draft proposal for a regulation on pedestrian protection. Summary of the results, http://europa.eu.int/comm/enterprise¬/¬auto¬motive/pagesbackground/pedestrianprotection/consultation_phase_II/summary.htm.

Fredrikson R, Haland Y, Yang J (2001) Evaluation of a New Pedestrian Head Injury Protection System with a Sensor in the Bumper and Lifting of the Bonnet's Rear Edge. 17. ESV-Konferenz, Amsterdam, 2001.

Fröming R. (2003) Experimentelle Umsetzung des Hybridtestverfahrens zum Fußgängerschutz und Ableitung eines Gefährdungsindex für Fahrzeugfronten. TU Berlin, Fachgebiet Kraftfahrzeuge, Diplomarbeit, 2003.

Fröming R, Schindler V, Kühn M (2005) Ein Verfahren zur objektiven Bewertung fahrzeugseitiger Maßnahmen zum Fußgängerschutz. VDI-Berichte 1911, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2005.

Fröming R, Kühn M, Schindler V (2006) Requirement Engineering for Active Safety Pedestrian Protection Systems based on Accident Research, Conference on Advanced Microsystems for Automotive Applications, Berlin 2006.

Glaeser KP (1984) Fußgängerunfall-Simulationsversuche mit verbesserten Fußgängerdummys. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach, 1984.

Glaeser KP (1995) Der Anprall des Kopfes auf die Fronthaube von Pkw beim Fußgängerunfall. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Fahrzeugtechnik, Heft 14, Bergisch Gladbach: Wirtschaftsverlag NW, 1995.

GRSP (2006) Proposal for a Global Technical Regulation on Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regard to their Construction in Order to Improve the Protection and Mitigate the Severity of Injuries to Pedestrians and Other Vulnerable Road Users in the Event of a Collision. Working Party on Passive Safety (GRSP), World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29). ECE/TRANS/WP.29/GRSP/2006/2.

Hahn W (2001) Fußgängerschutz - Von der Unfallanalyse zur Entwicklungsanforderung. VDA Technischer Kongress, Bad Homburg, 2001, S. 65-69.

Hahn W (2006) Fußgängerschutz: Entwicklungswerkzeuge – biomechanische Bewertung und Anwendung, Tagungsunterlagen zur Praxiskonferenz Fußgängerschutz, Bergisch Gladbach, 2006.

Hannawald L, Kauer F (2004) Equal Effectiveness Study on Pedestrian Protection, Technische Universität Dresden, 2004.

Heger A, Appel H (1980) Reconstruction of Pedestrian with Dummies and Cadavers. 8. ESV-Konferenz, Tagungsband, Wolfsburg, 1980.

Honda (2006): Pressematerial zum Thema Fußgängerschutz in Forschung und Anwendung, 2006.

van Hoof J, de Lange R, Wismans J (2003) Improving Pedestrian Safety Using Numerical Human Models. Stapp Car Crash Journal, Vol. 47, Oktober 2003.

von Hübbenet I (2003) Kosten-Nutzenanalyse von technischen Maßnahmen zum Fußgängerschutz am Kraftfahrzeug. TU Berlin, Fachgebiet Kraftfahrzeuge, Diplomarbeit, 2003.

ISO13232 ISO: Motorcycles - Test and analysis procedures for research evaluation of rider crash protective devices fitted to motorcycles.

JNCAP (2005) Japanese New Car Assessment Programme, http://www.nasva.go.jp/mamoru/english/index.html, Zugriff 11. Juli 2006.

JAMA (2005) Japan Automobile manufactures Association, http://www.jama.org/library/

Koch W (2002) Ganzheitlicher Ansatz zur Verbesserung der Fußgängersicherheit. Tagungsband: Schutz der Fußgänger bei Kollisionen mit Pkw, Haus der Technik e.V., München, 2002.

Kommission der Europäischen Gemeinschaft (2003) Europäisches Aktionsprogramm für die Straßenverkehrssicherheit. Mitteilung der Kommission, KOM(2003) 311, Juni 2003.

Kreiss J-P, Schüler L, Langwieder K (2005) The Effectiveness of primary Safety Features in Passenger Cars in Germany, 19. ESV-Konferenz, Tagungsband, Washington, 2005.

Kühn M, Fröming R, Schindler V (2002) Anforderungskatalog eines erweiterten Prüfverfahrens für die Pkw-Fußgänger-Kollision und dessen Umsetzung mit Hilfe der rechnerischen Simulation. Tagungsband zur Tagung „Schutz der Fußgänger bei Kollisionen mit Pkw“, Haus der Technik e.V., München, 20./21. November 2002.

Kühn (2004) Weiterentwicklung von Fußgänger-Komponententests. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 573, VDI Verlag, Düsseldorf 2004.

Lange R, Happee, R. (2001) Madymo v5.4 Multi Body Pedestrian Models – Draft Version. TNO, Januar 2001.

Lie A, Tingvall C, Krafft M, Kullgren A (2005) The Effectiveness of ESC (Electronic Stability Control) in reducing real life crashes and injuries, 19. ESV-Konferenz, Tagungsband, Washington, 2005.

Maeno T, Hasegawa J (2001) Development of a Finite Element Model of Total Human Model Safety (THUMS) and Application to Car-Pedestrian Impacts. 17. ESV-Konferenz, Tagungsband, Amsterdam, 2001.

Muser M (2006) Simulationen mit Human-FE und MBS-Modellen zur Analyse des Fußgängeranpralls. Tagungsunterlagen zur Praxiskonferenz Fußgängerschutz, Bergisch Gladbach, 2006.

NCAC (2006) National Crash Analysis Center, http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html.

Okamoto Y, Sgimoto, T., Enomoto, K., Kikuchi, J. (2000) Pedestrian Head Impact Conditions Depending on the Vehicle Shape and its Construction – Full Model Simulation. IRCOBI-Konferenz, Montpellier, Frankreich, 2000.

ORI (1998) Study of the efficiency of infrastructural measures for pedestrian protection – final report – global study of France and U.K. sites. Orientations, L'ingeniere des deplacements, Jan 1998.

Preliminary Draft Proposal (2005) Preliminary draft proposal for a regulation on the protection of pedestrains and other vulnerable road users before and in the event of a collision with a motor vehicle and amending Ccouncil Directive 70/156EEC.
http://europa.eu.int/comm/enterprise/automotive/pagesbackground/pedestrian protection/consultation_phase_II/preliminary_draft_proposal.pdf.

Richtlinie zu Frontschutzsystemen (2005) Europäische Richtlinie über die Verwendung von Frontschutzsystemen an Fahrzeugen (2005/66/EG).

SAS (2002) Sicherheitsaudit für Straßen (SAS) in Deutschland. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 98, Verlag für neue Wissenschaft GmbH Bremerhaven, Bergisch Gladbach, 2002.

Save-U D6 (2005) Dr. Marc-Michael Meinecke, Dr. Marian Andrzej, Obojski, Dr. Dariu Gavrila, Mr. Erwan Marc, Mr. Richard Morris,Mr. Matthias Töns, Dr.

Laurent Letellier, “SAVE-U - Deliverable D6: Strategies in Terms of Vulnerable Road User Protection” EU-Project SAVE-U, http://www.save-u.org.

Schulz A (2006) Untersuchung der Reaktionszeiten beim Fußgängerunfall unter Berücksichtigung verschiedener Reaktionstypen. Studienarbeit TU Berlin, Fachgebiet Kraftfahrzeuge, 2006.

Strzeletz R, Kühn M, Kampa A (2004) Vergleichende Betrachtung von Simulation und Experiment am Beispiel des Fußgänger-Fahrzeug-Unfalls. Tagungsunterlagen zur EVU Tagung, Budapest 2004.

Stürtz G (1984) Global- und Komponentenversuche zur Fußgängersicherheit. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) Schriftenreihe Nr. 22, Frankfurt/Main, 1984.

Sugimoto T (2002) Honda Pedestrian Research and Program. Tagungsband: Schutz der Fußgänger bei Kollisionen mit Pkw, Haus der Technik e.V., München, 2002.

Toyota Central R&D Labs (2006) Internetseite zum THUMS-Modell, http://www.tytlabs.co.jp/english/tech/thums/ethumsfamily3.html, letzter Zugriff 11.97.2006.

TRL (2004) A study of the feasibility of measures relating to the protection of pedestrians and other vulnerable road users. Final report, http://europa.eu.int¬/comm/enterprise/automotive/pagesbackground/pedestrianprotection/pedestrian_protection_study.pdf.

Unselt T, Breuer J, Eckstein L (2004) Fußgängerschutz durch Fahrerassistenz, Tagung „Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz“, 11. und 12. März 2004, München.

Weyer F (2006) Modellierung eines Einspurmodells zur Untersuchung des Einflusses von Bremsassistenzsystemen bei Notbremsungen. Studienarbeit, Technische Universität Berlin, 2006.

Willinger R, Baumgartner D (2003) Numerical and physical modelling of the human head under impact – Towards new injury criteria. Int. J Vehicle Design, Vol.31, N1/2, 2003, pp 94-115, 2003.

Winata W (1998) Entwicklung eines Fahrzeugschildes für den Fußgängerschutz an motorisierten Zweirädern und schmalen Dreiradfahrzeugen, Studienarbeit TU Berlin 1998.

Yang J (1997) Injury Biomechanics in Car-Pedestrian Collisions, Chalmers University of Technology, Dissertation, 1997.

Zander O (2006) Gegenüberstellung der Prüfverfahren zum Fußgängerschutz, Tagungsunterlagen zur Praxiskonferenz Fußgängerschutz, Bergisch Gladbach, 2006.

Zellmer H, Schmid M (1993) Gefährdung von Fußgängern und Radfahrern durch Frontschutzbügel an Geländefahrzeugen. BASt-Arbeitsprogramm-Nr. 92512, Bergisch Gladbach, 1993.

Zellmer H, Schmid M (1995) Gefährdung von Fußgängern und Radfahrern durch Frontschutzbügel an Geländefahrzeugen. BASt-Arbeitsprogramm-Nr. 92512, Bergisch Gladbach, Februar 1993.

http://www.springer.com/978-3-540-34302-8

Fußgängerschutz
Unfallgeschehen, Fahrzeuggestaltung, Testverfahren
Kühn, M.; Fröming, R.; Schindler, V.
2007, X, 249 S., Hardcover
ISBN: 978-3-540-34302-8