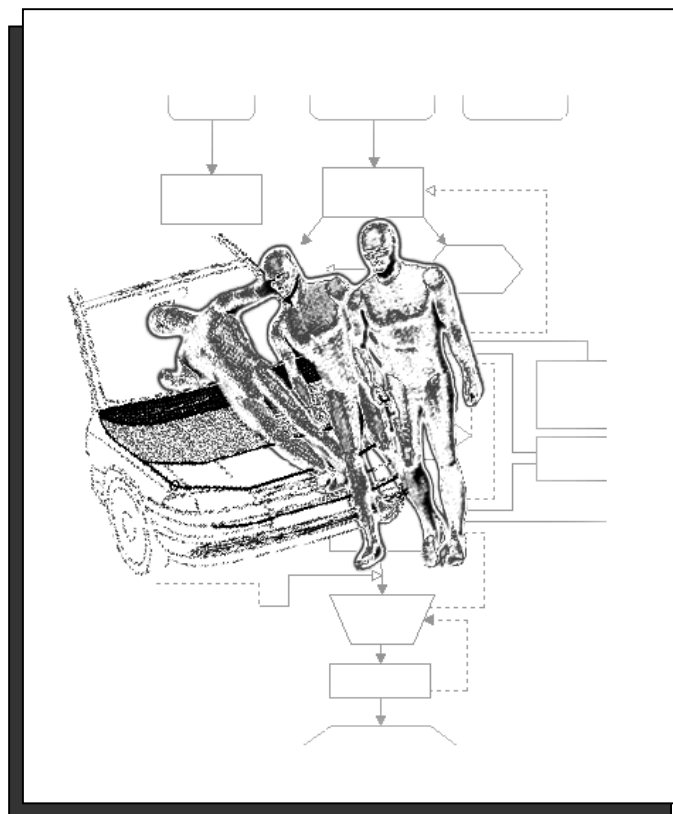


Vom Fachbereich für Maschinenwesen der Universität Essen  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs genehmigte Dissertation

---

## **Konstruktive und versuchstechnische Entwicklungswerkzeuge zur Gestaltung „fußgängerfreundlicher“ Pkw-Vorderwagen**



Vorgelegt von  
Diplom-Ingenieur Thilo Röth  
aus Amberg i.d. Oberpfalz

---

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Wissussek  
Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-J. Stracke

Tag der mündlichen Prüfung: 15. August 2001

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand im Zeitraum von Januar 1996 bis Mai 2001 während meiner Tätigkeit als Entwicklungsingenieur bei der Ford Werke AG in Köln als auch während meiner Tätigkeit als Geschäftsführer der Imperia GmbH in Aachen.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Wissussek, Universität Essen, Lehrstuhl für Konstruktions-technik und Kolbenmaschinen, danke ich sehr für seine Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit sowie für seine motivierenden Anregungen. Ebenso danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-J. Stracke, Universität Essen, Institut für Prozess- und Datenmanagement, für das Interesse an der Arbeit und die Bereitschaft zur Übernahme des Korreferates.

Mein besonderer Dank gilt des Weiteren Frau Bettina Veith und Herrn A. Stichweh von der Ford Werke AG sowie Herrn Alan Thomas von Jaguar GB für die häufigen fachlichen Beiträge und für ihre Unterstützung, die es mir erst ermöglicht hat, diese Arbeit neben meiner beruflichen Tätigkeit durchzuführen.

Die Anfertigung dieser Dissertationsschrift wäre ohne das Mitwirken von studentischen Mitarbeitern, Studien- und Diplomarbeitern kaum möglich gewesen. Ihnen und einer Vielzahl ehemaliger Arbeitskollegen der Ford Werke AG genauso wie meinen heutigen Arbeitskollegen der Imperia GmbH danke ich für ihre zahlreichen, fachlichen Anregungen und Diskussionen, welche die Entstehung dieser Arbeit gefördert haben.

Zudem möchte ich mich bei meiner Frau Kirsten und meiner Tochter Sophie auf das Herzlichste für ihre Geduld und Ausdauer bedanken, die diese nebenberuflich entstandene Arbeit von ihnen gefordert hat.

Aachen, August 2001

Thilo Röth

**Inhalt**

Vorwort

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Fußgängerunfall</b> .....	<b>3</b>
2.1	Analyse der Fußgängerunfallstatistik.....	3
2.2	Fußgängerkinematik beim Pkw-Aufprall.....	9
2.2.1	Primärstoß.....	10
2.2.2	Flugphase, Straßenstoß und Rutschphase.....	13
<b>3</b>	<b>Passiver Fußgängerschutz</b> .....	<b>15</b>
3.1	Bedeutung des Pkw-Vorderwagens für den Fußgängerschutz.....	15
3.1.1	Definition der kritischen Fahrzeugbereiche.....	15
3.1.2	Existierende Lösungsansätze zur Gestaltung „fußgängerfreundlicher“ Pkw-Vorderwagen.....	17
3.1.2.1	Aktive, variable Systeme.....	18
3.1.2.2	Passive, variable Systeme.....	20
3.1.2.3	Permanente, starre Systeme.....	21
3.2	Prüfvorschriften zum fahrzeugseitigen Fußgängerschutz.....	24
3.2.1	Amerikanische Aktivitäten.....	24
3.2.2	Europäische Aktivitäten.....	25
3.2.3	Weltweite Aktivitäten.....	27
<b>4</b>	<b>Passiver Fußgängerschutz in der Pkw-Entwicklung</b> .....	<b>29</b>
4.1	Passive Fußgängerschutzanforderungen im Zielkonflikt mit heutigen Fahrzeuganforderungen.....	29
4.2	Passiver Fußgängerschutz als Entwicklungsziel.....	34
4.3	Erweiterter Pkw-Entwicklungsablauf durch passiven Fußgängerschutz.....	33

---

<b>5</b>	<b>Bekannte Entwicklungswerkzeuge zur Gestaltung</b>	
	<b>„fußgängerfreundlicher“ Pkw-Vorderwagen</b> .....	<b>43</b>
5.1	Designrichtlinien.....	43
5.1.1	Detailimmanente Designvorgaben.....	43
5.1.2	Formimmanente Designvorgaben.....	45
5.1.2.1	Geometrische Stoßfänger- und Spoiler- parameter für den Beinaufprall.....	45
5.1.2.2	Geometrische Haubenvorderkanten- parameter für den Hüftaufprall.....	46
5.1.2.3	Konturfläche von Motorhaube und Kotflügel für den Kopfaufprall.....	47
5.1.3	Anwendung der Designrichtlinien an einem Pkw-Vorderwagen.....	47
5.2	Konstruktionsrichtlinien für den „passiven“ Fußgängerschutz.....	49
5.2.1	Konzeptionelle Konstruktionsrichtlinien.....	49
5.2.2	Detailorientierte Konstruktionsrichtlinien.....	52
5.3	Impaktormodelle und CAE-Methoden.....	53
5.3.1	Impaktormodelle.....	53
5.3.2	CAE-Methoden.....	55
<b>6</b>	<b>„Pedestrian Impaktor Location Utility (PILU)“ - Ein Prognosewerkzeug</b>	
	<b>für die Deformationsraum- und Packageauslegung</b> .....	<b>57</b>
6.1	Semi-empirische Deformationsbedingungen.....	58
6.1.1	Kopfaufprall.....	58
6.1.2	Hüftaufprall.....	61
6.1.3	Beinaufprall.....	64
6.1.4	Deformationsbedingungen für PILU.....	66
6.2	Datengenerierungsprozess durch PILU.....	67
6.3	Anwendung.....	69
6.4	Exemplarischer Einsatz von PILU zur geometrischen Dimensionierung eines „fußgängerfreundlichen“ Pkw-Vorderwagens.....	71

---

<b>7</b>	<b>„Ped Prot Testrig“ - Eine variable Komponententestvorrichtung.....</b>	<b>75</b>
7.1	Untersuchungen zur Ergebnisqualität.....	76
7.1.1	Untersuchungen der Teststreuung von Gesamtfahrzeugtests.....	76
7.1.2	Ergebnisqualität bei Verwendung einer starren Testvorrichtung.....	77
7.2	Funktionsweise und Aufbau.....	80
7.3	Validierung der Testvorrichtung.....	82
7.4	Anwendung und Anwendungspotential.....	85
<b>8</b>	<b>Ausblick - Zukunftsorientierter Entwicklungsprozess zur Gestaltung „fußgängerfreundlicher“ Pkw-Vorderwagen.....</b>	<b>87</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>90</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>93</b>
<b>11</b>	<b>Formelverzeichnis.....</b>	<b>106</b>
<b>12</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>108</b>
<b>13</b>	<b>Anhang</b>	
Anhang I:	Fußgängerunfallstatistik für Deutschland, Großbritannien, USA und Japan.....	111
Anhang II-A:	Referenzlinien und Aufprallbereiche für die einzelnen Impaktoren....	112
Anhang II-B:	Aufbau der Fußgängerimpaktoren.....	114
Anhang II-C:	Abhängigkeit des Hüftaufpralls von der Fahrzeuggeometrie.....	116
Anhang VI-A:	Ablaufdiagramm von PILU.....	117
Anhang VI-B:	Konfigurationsdatei von PILU.....	118
Anhang VII-A:	Verifizierungstests für den Beinimpakt.....	119
Anhang VII-B:	Verifizierungstests für den Hüftimpakt.....	120
Anhang VII-C:	Verifizierungstests für den Kopfimpakt.....	123
Anhang VII-D:	Wertetabelle der Verifizierungstests.....	124

## 1 Einleitung und Zielsetzung

Der Fußgängerkehrsunfall trägt weltweit seit vielen Jahrzehnten wesentlich zum gesamten Verkehrsunfallgeschehen bei. Allein in der europäischen Gemeinschaft wurden 1998 ca. 6.500 Fußgänger in Verkehrsunfällen getötet und ca. 160.000 Fußgänger verletzt.

Die hohe Bedeutung des Fußgängerkehrsunfalls sowie zunehmende Erkenntnisse im Bereich der Unfallforschung und -rekonstruktion haben eine Vielzahl von nationalen, europäischen sowie weltweiten Aktivitäten zum passiven Schutz des Fußgängers eingeleitet. Die seit Anfang der 80er Jahre andauernden Bestrebungen der EEVC (European Enhanced Vehicle-safety Committee) haben dabei zu einer detaillierten Prüfvorschrift geführt. Diese wurde erstmalig 1996 als Richtlinienentwurf III/5021/96EN sowie 1999 als überarbeitete Version in Form des Abschlussberichtes der EEVC Arbeitsgruppe 17 dem europäischen Parlament überreicht. In der Prüfvorschrift werden Testprozeduren für besonders schwer verletzte sowie häufig betroffene Körperteile vorgestellt. Um Pkw-Vorderwagen bezüglich ihrer Kompatibilität bei einem Fußgängeraufprall bis zu 40km/h zu bewerten, kommen daher Einzelimpaktortests für den Kopf-, Hüft- und Beinaufprall zum Einsatz. Der „passive Fußgängerschutz“ fordert in höchstem Maße, dass der Pkw-Vorderwagen die Aufgabe des Partnerschutzes übernimmt.

Es lassen sich im Verlauf der letzten zwei Jahrzehnte bereits einige Trends an Fahrzeugvorderwagen beobachten, welche die Fußgängeraufprallkompatibilität verbessern. Diese sind vor allem:

- => "weiche", abgerundete Konturformen
- => wegklappbare Außenspiegel
- => Kunststoffstoßfänger mit Schaumstoffelementen
- => Windschutzscheiben aus Verbundsicherheitsglas
- => Scheinwerferabdeckscheiben aus Kunststoff.

Darüber hinausgehende Fußgängerschutzsysteme - z.B. Motorhauben-Airbags oder deformationsoptimierte Motorhaubenstrukturen - haben bisher keinen Einzug in die Pkw-Vorderwagengestaltung von Produktionsfahrzeugen gehalten. Ursächlich hierfür sind im Wesentlichen:

- => hoher Zielkonflikt der meisten passiven Fußgängerschutzmaßnahmen mit sonstigen gesetzlichen und kundenorientierten Fahrzeuganforderungen
- => fehlendes Know-How zur Festlegung sinnvoller Umfänge von Fußgängerschutzmaßnahmen bei gleichzeitig umstrittenem Kosten/Nutzen-Verhältnis
- => mangelnde Erfahrung sowie fehlende Werkzeuge und Methoden zur Umsetzung von Fußgängerschutzmaßnahmen in der Serienentwicklung.

Sowohl die gesetzlichen Bestrebungen auf europäischer Ebene als auch privatwirtschaftliche Veröffentlichungen [EUN00] zur Beurteilung der „Fußgängerfreundlichkeit“ von neuen Serienfahrzeugen fordern eine verstärkte Auseinandersetzung der Fahrzeugindustrie mit der Implementierung von serientauglichen Fußgängerschutzmaßnahmen für den Kopf-, Bein- und Hüftaufprall.

Intention dieser Arbeit ist es, die Einbindung passiver Fußgängerschutzmaßnahmen bei der Serienentwicklung von Personenkraftwagen in einen kontinuierlichen sowie reproduzierbaren Ablauf zu bringen. Entwicklungsingenieure, welche in der Serienentwicklung mit dieser Thematik beschäftigt sind, sollen in jeder Entwicklungsphase entsprechende Werkzeuge zur Verfügung gestellt bekommen und diese aus einem gesamtheitlichen Zusammenhang heraus effizient benutzen können.

Im Anschluss an die Analyse des Fußgängerunfalls soll in dieser Arbeit der passive Fußgängerschutz aus heutiger Sicht dargestellt sowie die kritischen Zonen am Fahrzeug aufgezeigt werden. Für die einzelnen Aufprallbereiche bietet es sich an, bekannte Lösungsansätze zur verbesserten Aufprallkompatibilität in eine systematische Struktur zu bringen sowie die weltweiten Aktivitäten zur Beurteilung von Fußgängerschutzsystemen darzulegen. Ausgehend von einer Zielkonfliktanalyse bei der Einführung von Fußgängerschutzmaßnahmen soll der „passive Fußgängerschutz“ als Entwicklungsziel in der Pkw-Entwicklung konkretisiert, die Notwendigkeit und Existenz der dafür geforderten Entwicklungswerkzeuge und –methoden überprüft sowie Entwicklungsphasen identifiziert werden, welche derzeit ohne bzw. nur mit unzureichenden Entwicklungswerkzeugen ausgestattet sind. Im Anschluss daran erscheint es sinnvoll, bereits vorhandene Werkzeuge und Methoden zu recherchieren und vorzustellen. Mit zwei Entwicklungswerkzeugen können die Phasen der Package- und Deformationsauslegung sowie der CAE-Komponentenverifizierung ausgebaut werden.

Für das neuentwickelte CAE-Utility „PILU“ (Pedestrian Impactor Location Utility) sollen die Deformationsbedingungen zur Prognose von Eindringzonen der einzelnen Impaktzonen hergeleitet, der Aufbau und die Funktionsweise von PILU erklärt sowie exemplarisch für die Package- und Deformationsauslegung angewendet werden. Die variable Komponententestvorrichtung „Ped Prot Rig“ lässt sich im Aufbau, in der Funktionsweise sowie in der Anwendung erklären. Die konzeptionelle Verwendung einer einfachen, starren Ausführung der Testvorrichtung soll anhand praktischer Untersuchungen zur Ergebnisqualität nachgewiesen sowie in Verifizierungstests bestätigen werden. Das Einsatzpotential wird abgeschätzt. Den Ausblick liefert ein zukunftsorientierter Entwicklungsprozess zur Gestaltung „fußgängerfreundlicher“ Pkw-Vorderwagen unter besonderer Berücksichtigung von visionären Möglichkeiten für „PILU“.

## 2 Fußgängerunfall

### 2.1 Analyse der Fußgängerunfallstatistik

Im Jahre 1998 wurden in der Europäischen Union ca. 42.600 Menschen bei Verkehrsunfällen getötet [EUR00], ca. 6.500 davon waren Fußgänger. Die Anzahl der verletzten Fußgänger wird in der europäischen Union auf etwa 160.000 geschätzt.

In den einzelnen europäischen Ländern lag 1999 der prozentuale Anteil getöteter Fußgänger, bezogen auf die Gesamtzahl aller getöteten Verkehrsteilnehmer, zwischen 10,3% (Niederlande) und 48,5% (Rumänien), der Anteil an Verletzten zwischen 5,2% (Österreich) und 49,4% (Rumänien) [ECE00]. Die Schätzungen tödlich verunglückter Fußgänger in den Ländern der Dritten Welt liegt bei 50% - 70% aller in Verkehrsunfällen tödlich verunglückten Personen [DOW91], [GER91]. Bei der Betrachtung dieser Zahlen muss zugrunde gelegt werden, dass nicht alle Unfälle - insbesondere in den Dritte-Welt-Ländern - hinreichend statistisch erfasst werden.

Für eine Analyse der Fußgängerunfallzahlen ([Abb. 2.1a/b](#)) für die Jahre 1999, 1995 sowie 1980/88 werden die Länder Deutschland, Großbritannien, USA und Japan stellvertretend für die westlichen Industrieländer genauer betrachtet (vgl. auch [Anhang I](#)).

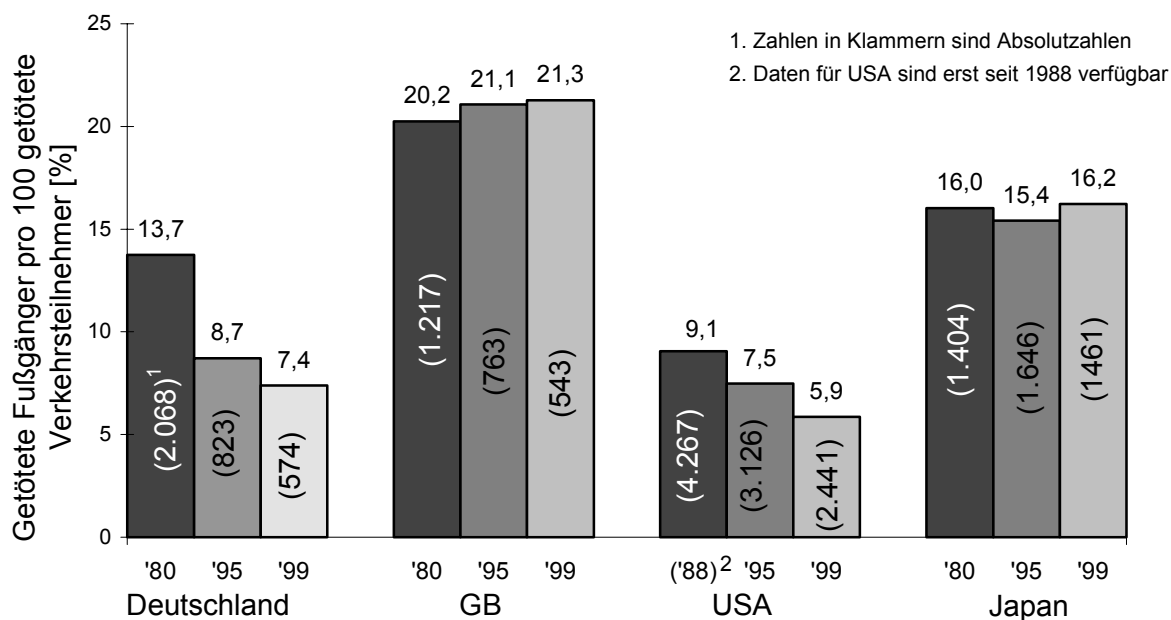


Abb. 2.1a: Durch Pkw getötete Fußgänger - Vergleich verschiedener Industrieländer für 1980/88<sup>2</sup>, 1995 und 1999 [SBU00], [HNS00], [NHT00], [NHS00], [ITA00]



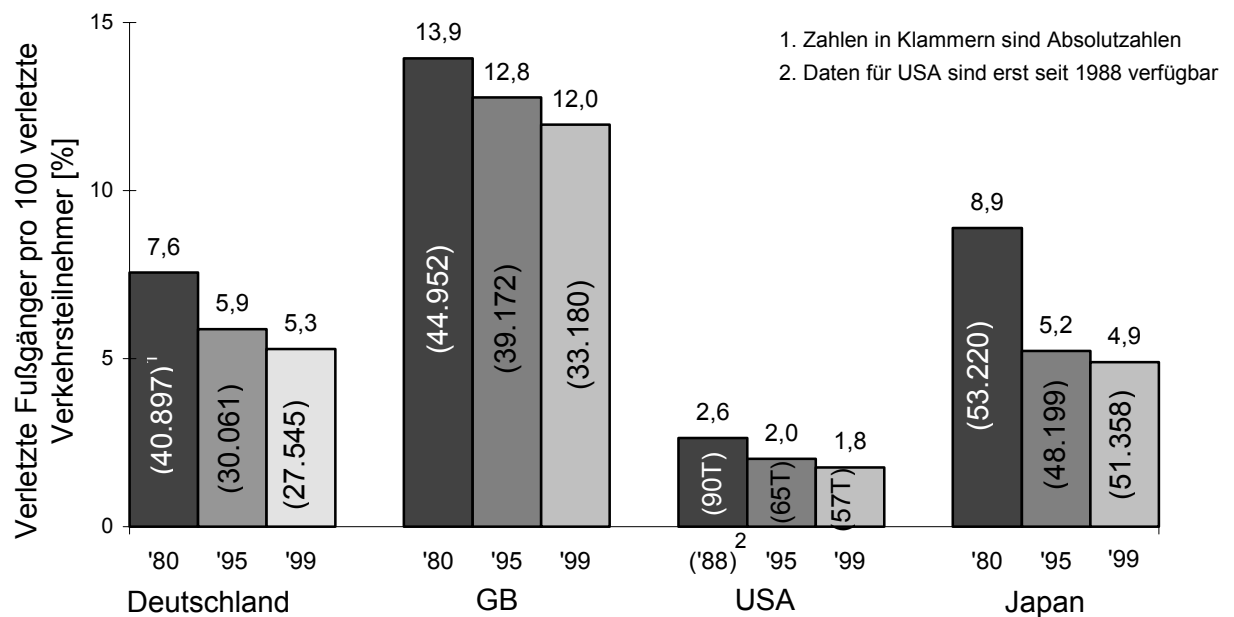


Abb. 2.1b: Durch Pkw verletzte Fußgänger - Vergleich verschiedener Industrieländer für 1980/88<sup>2</sup>, 1995 und 1999 [SBU00], [HNS00], [NHT00], [NHS00], [ITA00]

In Deutschland, England und den USA lässt sich in den absoluten Zahlen eine starke Abnahme von Fußgängerunfällen, besonders die mit tödlichen Folgen, erkennen. Lediglich in Japan kann man von einer Stagnation der absoluten Zahlen innerhalb der letzten 20 Jahre sprechen. Für Großbritannien hat die Anzahl der getöteten Fußgänger nicht so stark abgenommen wie die Zahl der sonst im Straßenverkehr getöteten Personen. Die in jeder Hinsicht am stärksten abnehmende Tendenz lässt sich für die Bundesrepublik Deutschland erkennen. Besonders auffallend ist der unterschiedliche prozentuale Stellenwert von Fußgängerunfällen für die einzelnen Länder. So hat in den USA der Fußgängerunfall – besonders der mit Verletzungsfolgen - nur einen untergeordneten Stellenwert. Diese Zahlen relativieren sich noch weiter, wenn die über die Jahre zunehmende Kilometerleistung, der steigende Fahrzeugbestand und die Bevölkerungsdichte berücksichtigt werden (Anhang I).

Von besonderer Bedeutung ist die Beurteilung verletzter und getöteter Fußgänger bezogen auf die Altersverteilung und den Ort des Unfallgeschehens (Abb. 2.2).

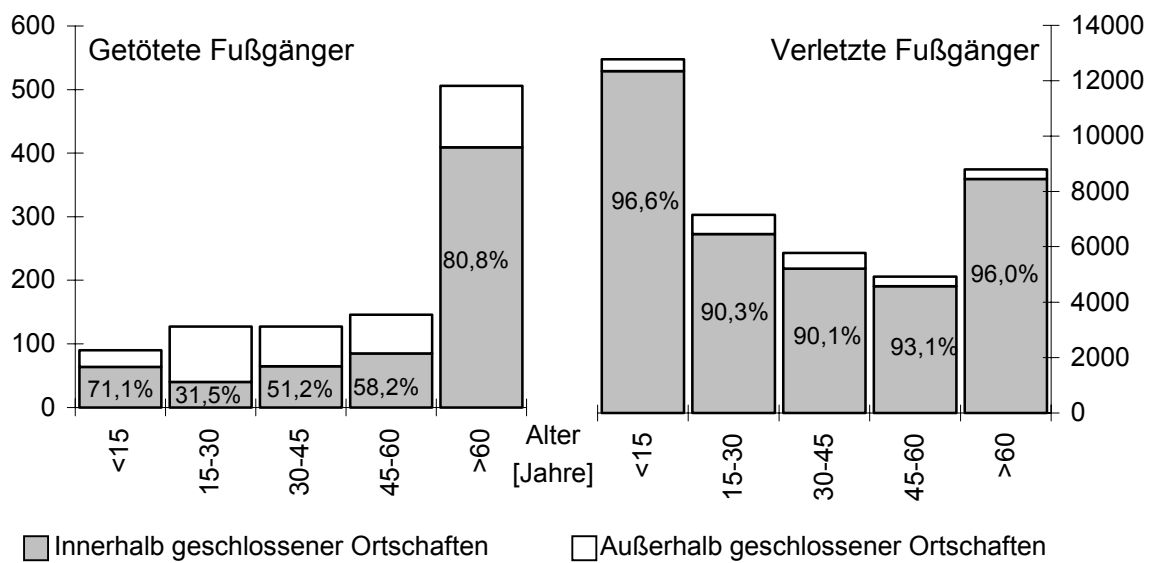


Abb. 2.2: Fußgängerunfall - Altersverteilung und Ort des Unfallgeschehens [SBU00]

Kinder unter 15 Jahren und ältere Menschen über 60 Jahre gehören zu dem besonders gefährdeten Personenkreis bei Fußgängerunfällen. Der Fußgängerunfall mit älteren Leuten nimmt dabei wesentlich häufiger einen tödlichen Ausgang (vgl. auch Abb. 2.5).

Fußgängerunfälle, die sich im außerörtlichen Straßenverkehr ereignen, enden aufgrund höherer Geschwindigkeiten häufig tödlich. Es erscheint daher sinnvoll, die Verletzungsschwere und die Unfallhäufigkeit auf die Aufprallgeschwindigkeit bezogen zu quantifizieren (Abb. 2.3).

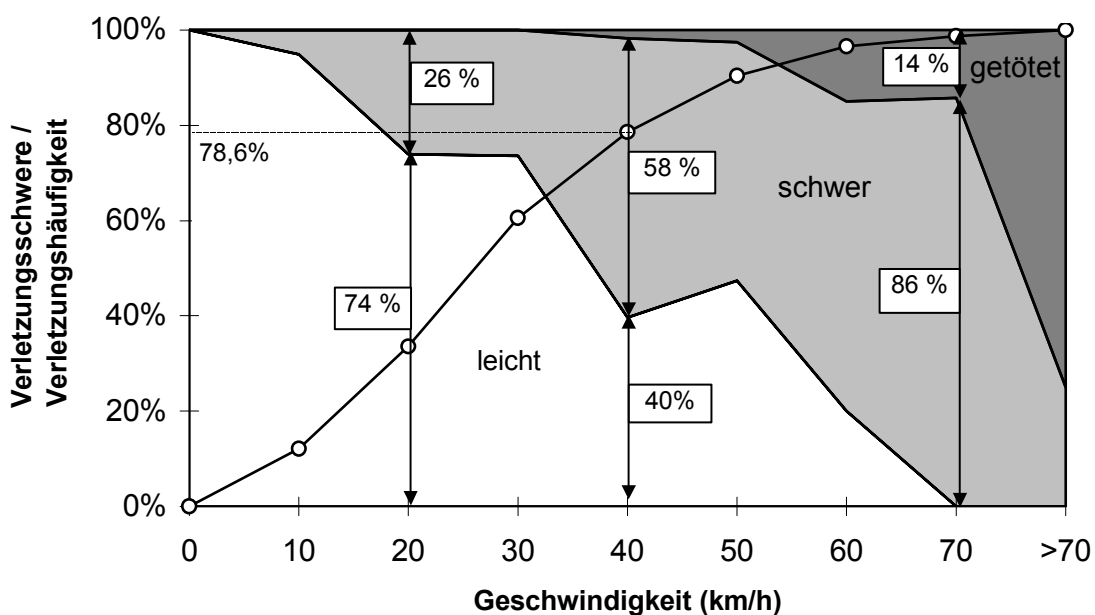


Abb. 2.3: Geschwindigkeitsabhängige Verletzungsschwere und Unfallhäufigkeit [BAM94]

Drei Viertel aller Fußgängerunfälle ereignen sich bei Geschwindigkeiten von bis zu 40 km/h. Schwere Verletzungen (MAIS 3<sup>1</sup> oder größer) werden überwiegend oberhalb dieser Geschwindigkeitsgrenze verursacht.

Die Aufteilung der Stoßpunktlagen beim Aufprall zwischen Fußgänger und Personenkraftwagen wird in Abb. 2.4 dargestellt. Bei den meisten Fußgängerunfällen wird der Fußgänger seitlich (87%) beim Überqueren der Straße vom Pkw-Vorderwagen (74%) erfasst. Der Aufprallkontakt des Fußgängers mit der rechten Hälfte des Vorderwagens ist dabei wesentlich häufiger als der mit der linken Seite [OTT96].

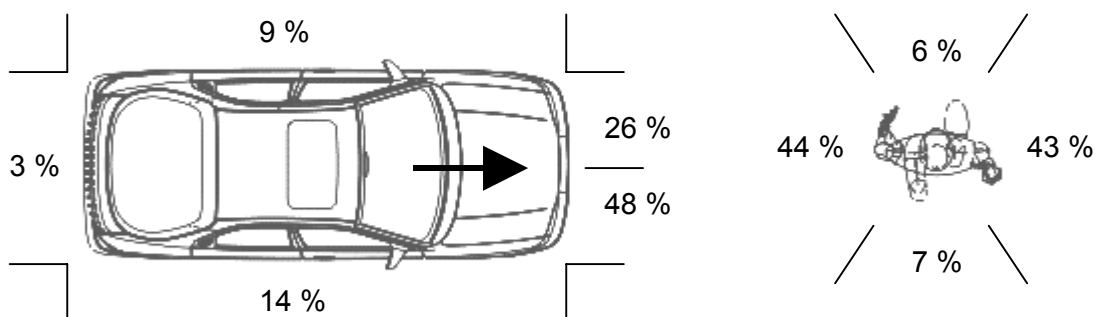


Abb. 2.4: Häufigkeitsverteilung der Stoßpunktlagen [OTT96], [DAN79], [BAS82], [STG76]  
(Die prozentuale Verteilung ist der gerundete Mittelwert aus der Literatur.)

Über den Bewegungszustand des Fahrzeugs während des Zusammenstoßes mit dem Fußgänger liegen unterschiedliche Angaben vor. Nach [ASH78], [ASH81], [GEA79] wird das Fahrzeug in 54-55% aller Fälle vor dem Aufprall, in 13,8 - 30% während des Aufpralls und in 15,7-18% erst nach dem Aufprall abgebremst.

Über den Bewegungszustand des Fußgängers wird in [SCH95] berichtet, dass der "gehende" Fußgänger mit 54% am häufigsten von einem Pkw erfasst wird. Der Zusammenstoß mit einem "rennenden" Fußgänger findet in 39% und der mit einem "stehenden" Fußgänger lediglich in 7% aller Fälle statt. Eine detaillierte Aufteilung der verletzten Körperregionen sowie der verletzungverursachenden Fahrzeugteile wird in Abb. 2.5 dargestellt.

<sup>1</sup> Als Gesamtverletzungsschwere eines polytraumatisierten Verletzten gilt nach der neuesten AIS-Revision (Abbreviated Injury Scale) der Grad der schwersten Einzelverletzung (MAIS) [AIS80].

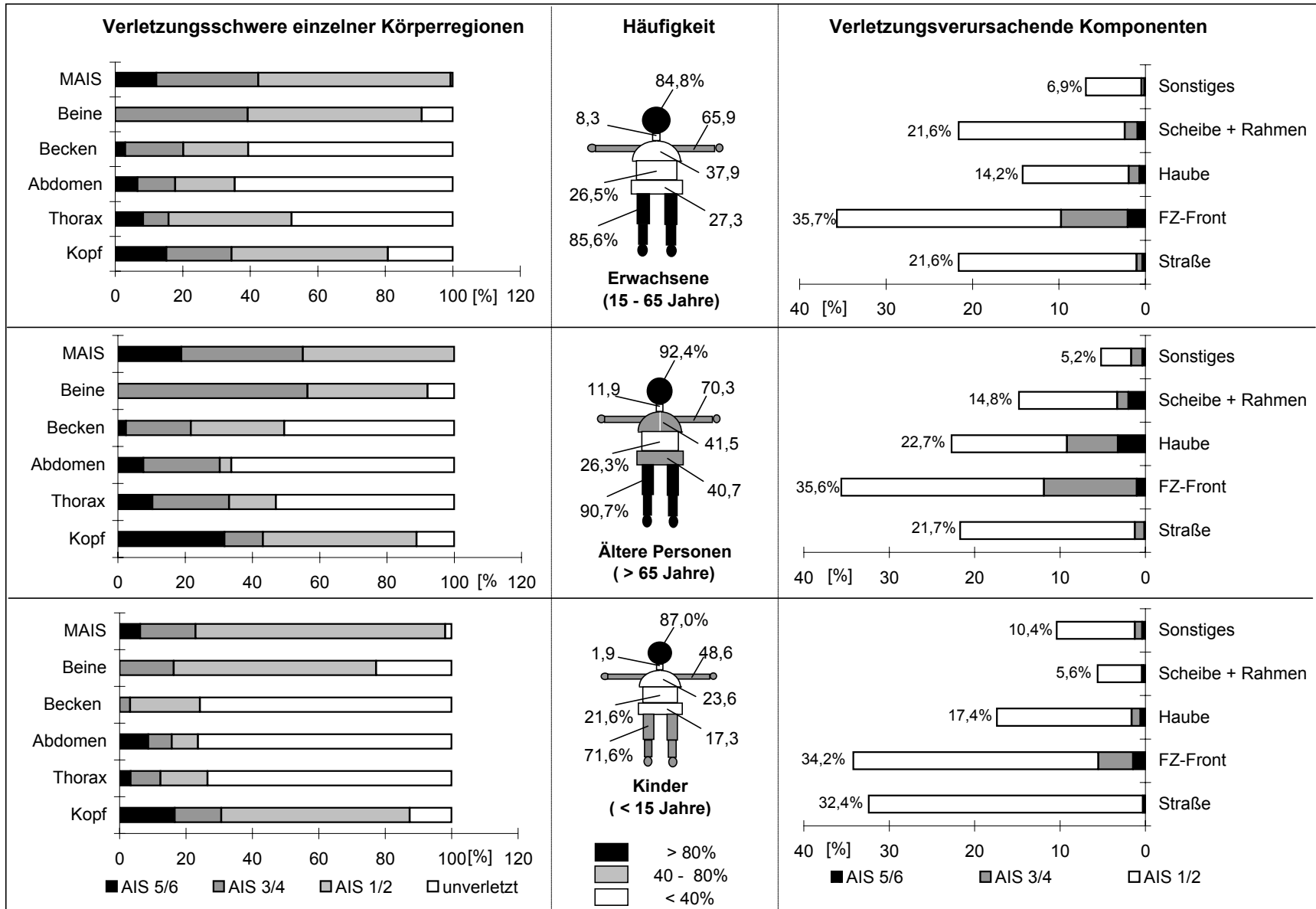


Abb 2.5: Verletzungshäufigkeit und -schwere verschiedener Altersgruppen sowie die korrespondierende Häufigkeitsverteilung verletzungsverursachender Fahrzeugteile [OTT96], [OTT84], [APP84]

Die Kopfverletzungen dominieren in allen Altersstufen hinsichtlich Verletzungsschwere und -häufigkeit. Ebenfalls werden bei den meisten Fußgängerunfällen Beinverletzungen beobachtet. Dabei lassen sich Verletzungsschweren bis maximal AIS 4 feststellen. Oberkörperverletzungen hingegen haben eine umgekehrte Bedeutung. Die Verletzungsschwere dominiert hier über die Verletzungshäufigkeit.

Bei den "verletzungsverursachenden Fahrzeugteilen" werden schwere Verletzungen bei Erwachsenen durch Motorhaube bzw. Scheibe/Scheibenrahmen und Fahrzeugfront hervorgerufen. Bei Kindern verursacht vor allem die Fahrzeugfront schwere Verletzungen an Kopf und Oberkörper.

Unter Berücksichtigung der Körpergrößen- und der Aufprallgeschwindigkeitsverteilung sowie der derzeitigen Fahrzeugpopulation wird in [GLA95] zwischen Aufprallbereichen auf die Haube und auf die Windschutzscheibe einschließlich deren eingrenzenden Rahmen (W+R) unterteilt. Hierbei ereignen sich 50,5% aller Aufprälle mit dem Kopf auf die Haube und 49,5% auf die Windschutzscheibe. Ein Kopfaufprall auf die W+R wird bei 20 km/h mit einer Häufigkeit von 2,4%, bei 40 km/h mit 33,3% und bei 70 km/h bereits mit 86,2% beobachtet [OTT90]. Für den innerstädtisch interessanten Geschwindigkeitsbereich von 30-50 km/h kommt es in 43,9% zu einem W+R-Kopfaufprall, wobei 70% der Fußgänger eine Körpergröße von 1,70 m oder größer haben. Nach [OTT95] erreicht der Kopfaufprall auf den Bereich der W+R in 12,1% aller Fälle einen Verletzungsschweregrad von AIS 3-6, wobei durch den Scheibenrahmen Verletzungsschweren von AIS 3 oder größer etwa doppelt so oft verursacht werden wie durch die Scheibe selbst. Die Verletzungsschwere des Kopfes nimmt zu, je weiter der Kopfaufschlag von der Scheibenmitte zum äußeren Scheibenbereich wandert.

Durch das sich in den letzten 10 Jahren veränderte Erscheinungsbild von Fahrzeugen haben sich Verletzungen der Hüfte sowie des Oberschenkels um ca. 50% reduziert [YM98] [YM99].

Nach dem eigentlichen Fahrzeugkontakt und der Flugphase prallt der Fußgänger auf die Straße auf. Der praktisch unumgängliche Kontakt mit der Fahrbahnoberfläche verursacht in der Regel Verletzungen leichteren Ausmaßes. Der Straßenstoß ist bis zu einem Geschwindigkeitsbereich von ca. 20 km/h primär verantwortlich für Verletzungen mit Verletzungsschweren meist kleiner AIS 2 [ASH79], [CES96], [KRA77]. In [OTT84] wird die schwerste Einzelverletzung durch den Straßenstoß in 24,8% mit AIS 1/2, in 0,6% mit AIS 3/4 und in 0,2% mit AIS 5/6 angegeben. In [BRU83] hingegen wird der Straßenaufprall in 28% aller Fälle für Verletzungen mit AIS 2/3 und in 16% mit AIS 4-6 identifiziert. In [FOR98] ist der Anteil schwerer Verletzungen (3<sup>+</sup>) durch den Straßenstoß mit ca. 12% angegeben.

Eine Verringerung der Verletzungsschwere durch die Gestaltung fußgängerfreundlicher Pkw-Vorderwagen ist daher durch den verletzungsverursachenden Einfluss des Fahrbahnkontakts nach unten hin begrenzt.

## 2.2 Fußgängerkinematik beim Pkw-Aufprall

Die uneingeschränkte Eigenbewegung des Fußgängers ist ursächlich für die Komplexität des Fußgänger-aufpralls auf einen Personenkraftwagen. Im Bereich der Insassensicherheit hingegen kann durch gezielte Maßnahmen (Sicherheitsgurte, Gurtstraffer, Airbags, usw.) die ohnehin schon eingeschränkte Kinematik weiter kontrolliert und die Verletzungsschwere wesentlich reduziert werden.

Während des Fußgänger-aufpralls erfolgt die Energieumwandlung in mehreren zeitlich aufeinanderfolgenden Phasen (Abb. 2.6). Der mögliche Kontakt mit einem Hindernis ist weitestgehend von den Unfallrandbedingungen abhängig. In der Regel bleibt der Tertiärstoß aus, da die kinetische Energie durch den Rutschvorgang absorbiert wird.

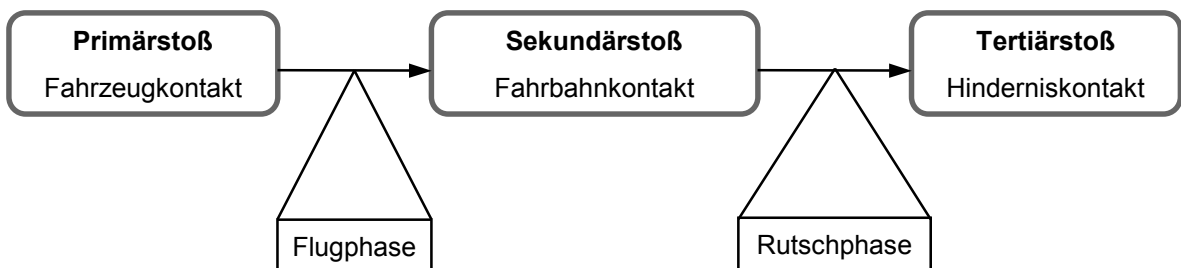


Abb. 2.6: Bewegungs- und Stoßphasen des Fußgängers bei einem Pkw-Aufprall

Die Komplexität des Fußgängerunfalls und die Verletzungsschwere hängen von fahrzeug- und fußgängerspezifischen Einflussfaktoren ab (Abb. 2.7). Erkenntnisse über die wichtigsten Einflussparameter waren Gegenstand einer Vielzahl von Untersuchungen, welche auf Daten aus der Unfallforschung, Leichen- und Dummyversuchen sowie auf 2- bzw. 3-dimensionaler Computersimulation basieren.



Abb. 2.7: Personen- und fahrzeugbezogene Einflussfaktoren beim Fußgängerunfall

### 2.2.1 Primärstoß

Während der für den Primäraufprall typischen drei bzw. vier Fußgänger-Fahrzeug-Kontaktphasen wird der Fußgänger etwa auf Fahrzeuggeschwindigkeit beschleunigt.

Abb. 2.8 zeigt den exemplarischen Fußgängeraufprall auf einen Personenkraftwagen, wie er sich üblicherweise bei ca. 40 km/h ereignet.



Abb. 2.8: Typische Kontaktphasen eines seitlich angefahrenen Fußgängers bei ca. 40 km/h

Beim Primärstoß lassen sich die Haupteinflussfaktoren auf die Kinematik und die Verletzungsschwere wie folgt zusammenfassen :

- ⇒ Abstand vordere Haubenkante zum Boden ( $HK_H$ )
- ⇒ Fahrzeuggeschwindigkeit
- ⇒ Fußgängerkörpergröße
- ⇒ Steifigkeit der Außenkontur des Pkw- Vorderwagens.

Die wichtigsten Parameter werden in Abb. 2.9 hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Fußgängeraufprall beschrieben.

Häufig kann erst anhand der Wechselwirkung einzelner Vorderwagenparameter der Einfluss auf die Kinematik und die Verletzungsschwere erklärt werden [HAR85], [MAE85], [ISH91], [HAR82]. Beispielsweise werden durch einen weit nach vorn montierten Stoßstangenspoiler in Verbindung mit der entsprechenden Wahl der Vorderwagenparameter die Beinbelastungen positiv beeinflusst.

Durch die entsprechende Wahl der fahrzeugseitigen Parameter lassen sich unterschiedliche Karosserieformen (Kasten-, Ponton-, Keilform) prinzipiell darstellen. Unterscheiden sich auch die Kinematik und die biomechanischen Belastungsprofile der einzelnen Körperregionen für die verschiedenen Karosserieformen, ist in der Bilanz für den Grad der Gesamtverletzungsschwere kaum ein Unterschied festzustellen [KRA77] und [PRI83].

Der Relativabstand zwischen Körperschwerpunkt und vorderer Haubenkante hat hierbei einen ausschlaggebenden Einfluss. So verursacht ein großer Abstand - typisch für Erwachsene - einen hohen Drehimpuls um den Fahrzeugbug mit daraus resultierenden hohen Kopfgeschwindigkeiten und langer Kontaktzeit. Bei geringem Relativabstand (z.B. bei Kleinkindern) ist der Abstand hingegen vernachlässigbar gering oder sogar negativ. Dies führt zu einem großflächigen Körper-Vorderwagenkontakt mit geringer Rotationsbewegung und entsprechend hohen Brust- und Oberkörperbeschleunigungen. Die Kopfaufprallgeschwindigkeit liegt typischerweise unterhalb der Fahrzeuggeschwindigkeit.

Neben dem Relativabstand zwischen Körperschwerpunkt und vorderer Haubenkante beeinflusst die Fahrzeuggeschwindigkeit das Kinematikverhalten erheblich.

Bei niedriger Geschwindigkeit wird eine Art "Ineinandersacken" des Fußgängerkörpers mit anschließendem Abgleiten vom Fahrzeugbug beobachtet. Hohe Geschwindigkeiten verstärken den Drehimpuls bei großem Haubenkanten-Schwerpunkt Abstand des Fußgängerkörpers und verringern die Kontaktzeit zwischen Fußgänger und Kraftfahrzeug. Der Kinderkörper wird dagegen translatorisch auf das hohe kinetische Energieniveau innerhalb der kurzen Kontaktzeit beschleunigt.

Bedingt durch die unterschiedliche Kinematik kann allgemein festgestellt werden, dass hohe Brust- und Oberkörperbelastungen beim Kind und hohe Kopfbelastungen beim Erwachsenen dominieren (vgl. auch Abb. 2.5).



Parameter	Pers.	Kinematischer Einfluss	Ursache	Biomechanische Auswirkungen
Abstand vordere Haubenkante / Boden nimmt ab	Erw.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zunehmende Körperrotation und verstärktes Anheben des Körperschwerpunkts</li> <li>- Wurfhöhe und Kopfaufprallgeschwindigkeit steigen, Kopfaufprallstelle wandert Richtung Windschutzscheibe (nach hinten)</li> <li>- Beckenstoß erfolgt später und schwächer</li> <li>- Rotationsmoment der Beine nimmt zu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Abstand Körperschwerpunkt / Haubenvorderkante nimmt zu</li> <li>- Hauptanteil der Energie wird durch den Stoßfänger in Rotationsenergie umgewandelt</li> <li>- Kontaktkraft auf Stoßfänger steigt</li> <li>- Zunehmende Kontaktzeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zunehmendes Biegemoment am Unterschenkel</li> <li>- Zunehmende Knieverdrehung</li> <li>- Abnehmende Brust-, Oberkörper- und Hüftbelastung</li> <li>- Hohe Kopfbelastung</li> </ul>
Abstand Haubenkante / Oberkörper auf gleicher Höhe	Kind	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Körperanprall über fast volle Länge</li> <li>- Hohe Brust- und niedrige Kopfverzögerung</li> <li>- Hohe horizontale Ablösegeschwindigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Keine Einleitung von Rotation</li> <li>- Kurze Kontaktzeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Niedrige Kopfbelastung, aber hohe Halsverdrehung</li> <li>- Sehr hohe Oberkörperbelastung</li> </ul>
Abstand Stoßfänger/ Boden nimmt ab	Erw.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kaum Einfluss auf Gesamtkinematik</li> <li>- Rotationsimpuls der unteren Extremitäten verringert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kontaktkraft auf Stoßfänger fällt</li> <li>- Kontaktkraft auf Haubenkante steigt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reduzierte Kniebelastung</li> <li>- Allgemeine Beinbelastung steigt</li> </ul>
	Kind	Keine Erkenntnisse	Keine Erkenntnisse	- Hüftbelastung nimmt ab
Horizontalabstand Stoßfänger/Haubenkante nimmt ab	Erw. Kind	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rotationsmoment um den Körperschwerpunkt nimmt ab / Kopfaufprallgeschwindigkeit fällt</li> <li>- Kopfaufprallstelle wandert nach vorn</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Energieaufnahme durch Vorderwagen steigt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hüft- und Oberschenkelbelastung steigt</li> <li>- Kopfbelastung fällt</li> </ul>
Erhöhung der Kontaktzonensteifigkeit am Fahrzeug	Erw. Kind	- Geringfügiger Einfluss auf Kinematik (Einfluss durch Fahrzeuggeometrie dominiert)	- Geringeres Eindringen des Fußgängers in das Fahrzeug	- Belastungswerte für die entsprechenden Körperregionen steigen
Fußgängergröße nimmt zu	Erw. Kind	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Analoges Effekt wie bei der Abnahme des Abstands vordere Haubenkante / Boden</li> <li>- Kopfaufschlagpunkt wandert nach hinten</li> </ul>		
Fahrzeuggeschwindigkeit steigt	Erw. Kind	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zunehmende Körperrotation</li> <li>- Körperschwerpunkt wird angehoben</li> <li>- Kopfaufprallstelle wandert nach hinten</li> <li>- Kopfaufprallhäufigkeit steigt</li> <li>- Ablösegeschwindigkeit nimmt zu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Steigender Drehimpuls</li> <li>- Kontaktzeit nimmt ab</li> <li>- Kontaktkräfte steigen</li> </ul>	- Biomechanische Belastungswerte steigen (vgl. auch <a href="#">Abb. 2.3</a> )
Fahrzeug wird abgebremst	Erw. Kind	Überlagerung der Effekte: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Abnahme der Haubenvorderkante- und der Stoßfängerkontakthöhe</li> <li>- Reduzierung der Fahrzeuggeschwindigkeit</li> </ul>		
Fußgängerkontakt von vorn statt von der Seite	Erw. Kind	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Starke Eigenrotation des Oberkörpers</li> <li>- Kopfaufprall selbst bei geringer Fahrzeuggeschwindigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hoher direkter Drehimpuls</li> <li>- Hohe Stoßfängerkontaktkraft</li> </ul>	- Höhere Kopf- und Beinbelastung als beim seitlichen Fußgängerkontakt

Abb 2.9: Ursachen sowie Auswirkungen verschiedener Einflussparameter beim Fußgängeraufprall [HAR85], [MAE85], [LUC81], [ISH91], [MAS85], [HAR82], [SAK94], [LAW87], [LAW89], [PRI83], [GRE89], [SCH95], [OTT95], [WOO88]

Die Komplexität der möglichen Kinematikszenarien wird ebenfalls durch die typischen Bereiche der Aufprallwinkel verschiedener Körperregionen, der anteiligen Körpermassen sowie der Kopfaufprallgeschwindigkeiten und -häufigkeiten verdeutlicht (Abb. 2.10).

<b>Einflussparameter</b>	<b>Körperteil</b>	<b>Bereich</b>
Aufprallwinkel auf den Pkw-Vorderwagen (gemessen zur Horizontalen)	Kinderkopf	45 - 60°
	Erwachsenenkopf	50 - 80°
	Kinderhüfte, -brust	20 - 40°
	Erwachsenenhüfte, -oberschenkel	20 - 40°
Auf die Körpermasse bezogene Teilmassen	Kinderkopf	6 - 7%
	Erwachsenenkopf	10 - 15%
	Kinderhüfte, -brust	30 - 35%
	Erwachsenenhüfte, -oberschenkel	20 - 30%
	Kinderunterschenkel	ca. 25%
	Erwachsenenunterschenkel	10 - 15%
Aufprallgeschwindigkeit (bezogen auf die Fahrzeuggeschwindigkeit)	Kinderkopf	40 - 80%
	Erwachsenenkopf	70 - 150%
Häufigkeit eines Kopfaufpralls auf den Personenkraftwagen	Kind / Erw. < 10 km/h	15 - 21%
	21 - 30 km/h	40 - 52%
	> 70 km/h	100%

Abb. 2.10: Typische Bereiche für Aufprallwinkel verschiedener Körperregionen, anteilige Körpermassen, Kopfaufprallgeschwindigkeiten und -häufigkeiten [OTT91], [HAR85], [ISH91], [BRO86], [HEG81], [LAW89], [PRI83]

Sobald das in der Regel bremsende Fahrzeug die erreichte Fußgängergeschwindigkeit unterschreitet, löst sich der Fußgänger von dem Fahrzeug und die Flugphase wird eingeleitet.

### 2.2.2 Flugphase, Straßenstoß und Rutschphase

Ab einer Fahrzeuggeschwindigkeit von etwa 10 m/s fliegt der Körper frei durch die Luft, landet bei einem bremsenden Fahrzeug stets vor dem Pkw, und die Rutschphase wird eingeleitet. Die Flugphase, der Straßenstoß sowie die Rutschphase stehen in einem interaktiven Zusammenhang (Abb. 2.11).

Während der Flug- und der Sekundäraufprallphase sind die fußgängerbezogenen Parameter wie Körperschwerpunkthöhe und -masse von ausschlaggebender Bedeutung [PRI83]. Die Flugphase des Fußgängerkörpers wird charakterisiert durch die Rotationsbewegung und die Flugbahn. Die Flugbahn, bezogen auf den Körperschwerpunkt, resultiert aus der Wurfhöhe und der effektiven Wurfweite. Die effektive Wurfweite ist als der horizontale Abstand zwischen Fahrzeugaufprallpunkt und Körperschwerpunktlage beim Straßenaufprall

definiert. Die Wurfhöhe und damit die senkrechte Aufprallgeschwindigkeit auf die Straße sind abhängig von den geometrischen Fahrzeugparametern und der Fahrzeuggeschwindigkeit. Die Wurfhöhe ist damit der Haupteinflussparameter auf die Heftigkeit des Straßenstoßes [KUE75], [HAR76], [KON71].

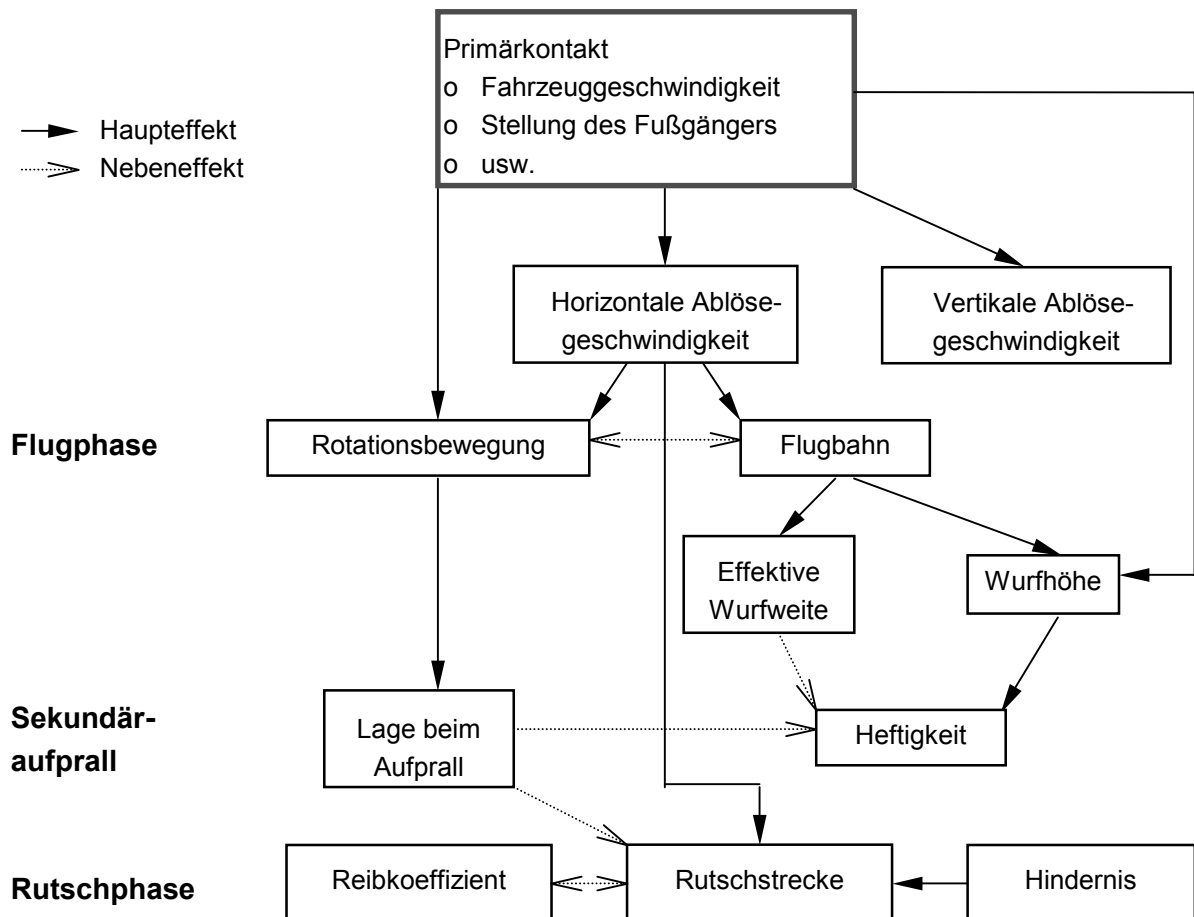


Abb. 2.11: Einflussfaktoren für die Post-Primärkontaktphasen

Die beim Fahrzeugaufprall eingeleitete Rotationsbewegung des Fußgängerkörpers kann bei höherer Geschwindigkeit - ab ca. 12 m/s - zu einem kompletten Überrollen über das Dach führen. Entsprechend der geschwindigkeitsabhängigen Drehbewegung wird daher beim Straßenstoß das Aufschlagmuster unterteilt in "Füße voran", "parallel", "Kopf voran", "Becken voran". Das Verletzungsrisiko wird in [KRA77] für den parallelen Aufschlag als am günstigsten beurteilt. Die gesamte Wurfweite setzt sich zusammen aus der effektiven Wurfweite und der Rutschstrecke. Sie zeigt eine nahezu lineare Abhängigkeit von der Anprallgeschwindigkeit [PRI83], [KRA77].

Die Analyse des Post-Primärkontaktablaufs dient heute vor allem der Rekonstruktion von Fußgängerunfällen bei rechtlichen Streitfragen.

### 3 Passiver Fußgängerschutz

#### 3.1 Bedeutung des Pkw-Vorderwagens für den Fußgängerschutz

Bisher bekannte Untersuchungen für den fahrzeugseitigen Fußgängerschutz haben sich praktisch ausschließlich auf den Vorderwagen beschränkt. Konzeptionelle, passive Fußgängerschutzmaßnahmen sind für verschiedene bei einem Fußgängeraufprall kritische Bereiche des Pkw-Vorderwagens bekannt geworden.

##### 3.1.1 Definition der kritischen Fahrzeugbereiche

Die kritischen Bereiche lassen sich in globale und lokale Bereiche unterteilen. Globale Bereiche sind die Flächenbereiche der Außenkontur, die mit einzelnen Körperteilen direkt in Kontakt kommen. Eine Einflussnahme auf die Schwere des Fußgängeraufpralls ist fast ausschließlich durch die Veränderung der fahrzeugseitigen, formgebenden Parameter möglich. Zielsetzung ist hier die Veränderung der Aufprallkinematik.

Lokale, kritische Bereiche setzen sich aus einzelnen Bauteilkomponenten der Karosserie oder des Motorraums zusammen (Abb. 3.1). Sie zeichnen sich entweder durch eine zu hohe Bauteilsteifigkeit, einen zu geringen Deformationsfreiraum oder eine Kombination von beidem aus. Die Unterscheidung der Einflussgrößen erfolgt nach Ein- bzw. Anbauteilen sowie nach Teilen der Karosseriestruktur. Die Karosseriestruktur lässt sich in die Oberstruktur (z.B. Motorhaube, Kotflügel) und in die Unterstruktur (z.B. oberer Längsträger, Wasserkastenvorderwand, Lampen-Modul-Träger) unterteilen. Durch die heute übliche Auslegung verschiedener Bauteilkomponenten werden einzelne Körperregionen eines Fußgängers beim Aufprall besonders hoch belastet.

Für den Aufprall der einzelnen Fußgängerimpaktoren kann allgemein festgestellt werden:

- |                       |   |
|-----------------------|---|
| Beinaufprall:         | - Steifigkeit der Stoßfänger zu hoch<br>- ungünstige Wahl der geometrischen Formparameter der Stoßfängerkontur.                                     |
| Hüft- / Kopfaufprall: | - zu geringer Freiraum zu einzelnen Bauteilen<br>- Steifigkeit der Oberstruktur zu hoch oder zu niedrig<br>- Steifigkeit der Unterstruktur zu hoch. |

Eine Vielzahl existierender Lösungsansätze zur Verbesserung des passiven Fußgängerschutzes setzt sich mit den lokalen als auch globalen, kritischen Bereichen auseinander.

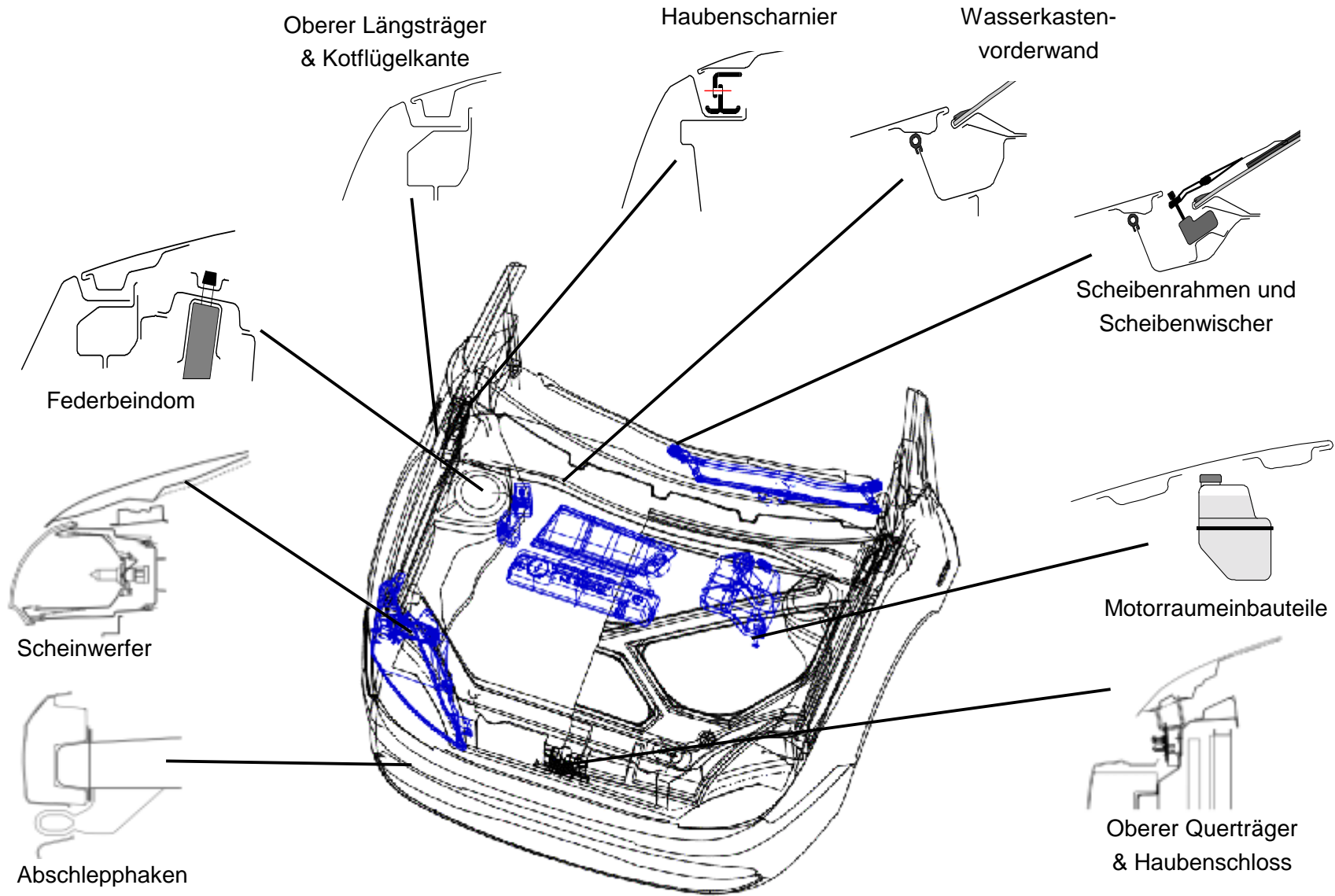


Abb. 3.1: Kritische lokale Vorderwagenbereiche für den Fußgängeraufprall

### 3.1.2 Existierende Lösungsansätze zur Gestaltung "fußgängerfreundlicher" Pkw-Vorderwagen

Bereits 1902 beschäftigte sich die erste Patentidee mit einem "fußgängerfreundlichen" Stoßfängerkonzept [DOR02]. Es zeichnet sich durch eine starke, keilförmige Ausformung in Fahrzeugquerrichtung aus. Durch diese Formgebung sollte ein aufprallender Fußgänger vom Fahrzeug seitlich "weggeschaufelt" und somit vor Überrollen geschützt werden.

Eine 1924 vorgestellte Fußgängerfangvorrichtung [SIN24] beschäftigt sich neben dem Schutz vor Überrollen bereits mit dem Primäraufprall (Abb. 3.2). Durch ein aufgespanntes Netz wird der Fußgänger aufprall abgefangen. Die durch den Aufprall ausgelöste Schwenkbewegung der "Netzschaukel" soll ein Abgleiten des Fußgängers auf die Straße verhindern.

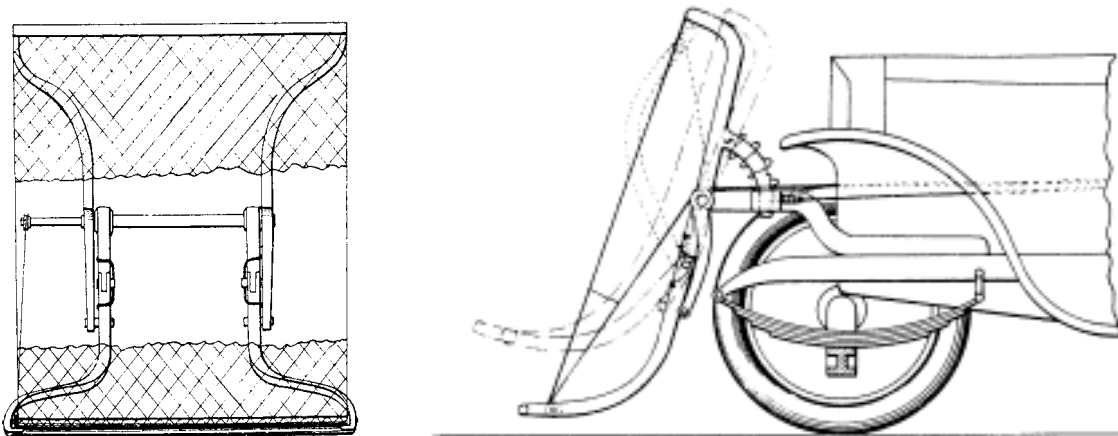


Abb. 3.2: "Fangvorrichtung an Kraftfahrzeugen" aus dem Jahre 1924 [SIN24]

Bis in die 70er Jahre konzentrierten sich die Lösungsvorschläge vor allem auf sogenannte Fußgängerfangvorrichtungen, deren Ziel es ist, den Fußgänger am Fahrzeug permanent oder kurzzeitig festzuhalten, um so den Sekundärkontakt zu vermeiden oder zu lindern. Mechanisch aufwendige Vorrichtungen, welche den Fußgänger bereits vor dem Fahrzeug abfangen, werden in [ZEL94] und [MAT76] vorgestellt. Auf ein anderes Konzept setzen Vorrichtungen, welche den Fußgänger unter Verwendung von Fangbügeln auf die Motorhaube "hochschaukeln" [POR75], [FIN74].

Bereits Ende der 70er Jahre wurde eine Fangvorrichtung vorgestellt, die den Fußgänger durch zwei seitlich aus dem Vorderwagen herausschnellende Fangarme an der Fahrzeugfront festhält und zudem über energieabsorbierende Elemente am Vorderwagen sowie über zwei Airbags verfügt [HAA76]. Nach ähnlichem Prinzip funktioniert eine in [HOE92] präsentierte Vorrichtung, welche mit zwei Fangarmen und mehreren Airbags ausgerüstet ist. Mit zunehmenden Erkenntnissen über die Verletzungsursachen und die Aufprallkinematik beim Fußgängerunfall verlagerten sich die Lösungsansätze auf energieabsorbierende Detail- oder Gesamtkonzepte am Pkw-Vorderwagen.

Es können im Wesentlichen drei Kategorien von Fußgängerschutzmaßnahmen unterschieden werden:

- => aktive, variable Systeme (AVS)
- => passive, variable Systeme (PVS)
- => permanente, starre Systeme (PSS).

Bei aktiven, variablen Systemen wird über einen Sensor entweder vor oder während der Anfangsphase des Fußgängeraufpralls ein Schutzsystem am Fahrzeug aktiviert. Beim passiven, variablen System hingegen wird das Schutzsystem erst durch den Anfangsimpuls des auftreffenden Fußgängers und nach Überschreiten eines definierten Kraftniveaus selbständig ausgelöst. Unter permanent starren Systemen versteht man jede Detaillösung, welche eine Reduzierung der Verletzungsschwere beim Fußgängeraufprall verspricht und permanent - d.h., ohne aktiviert zu werden - im Fahrzeug integriert ist.

### 3.1.2.1 Aktive, variable Systeme

Im Wesentlichen beschränken sich die bis dato vorgestellten aktiven, variablen Systeme auf die Verwendung von Airbags oder auf das Anheben der Motorhaube ("Pop-Up"-Hauben). Für die Verwendung von Fußgänger-Airbags ist eine Vielzahl von Konzeptvorschlägen bekannt geworden (Abb. 3.3), welche auf den Schutz der verschiedenen Körperteile abzielen.

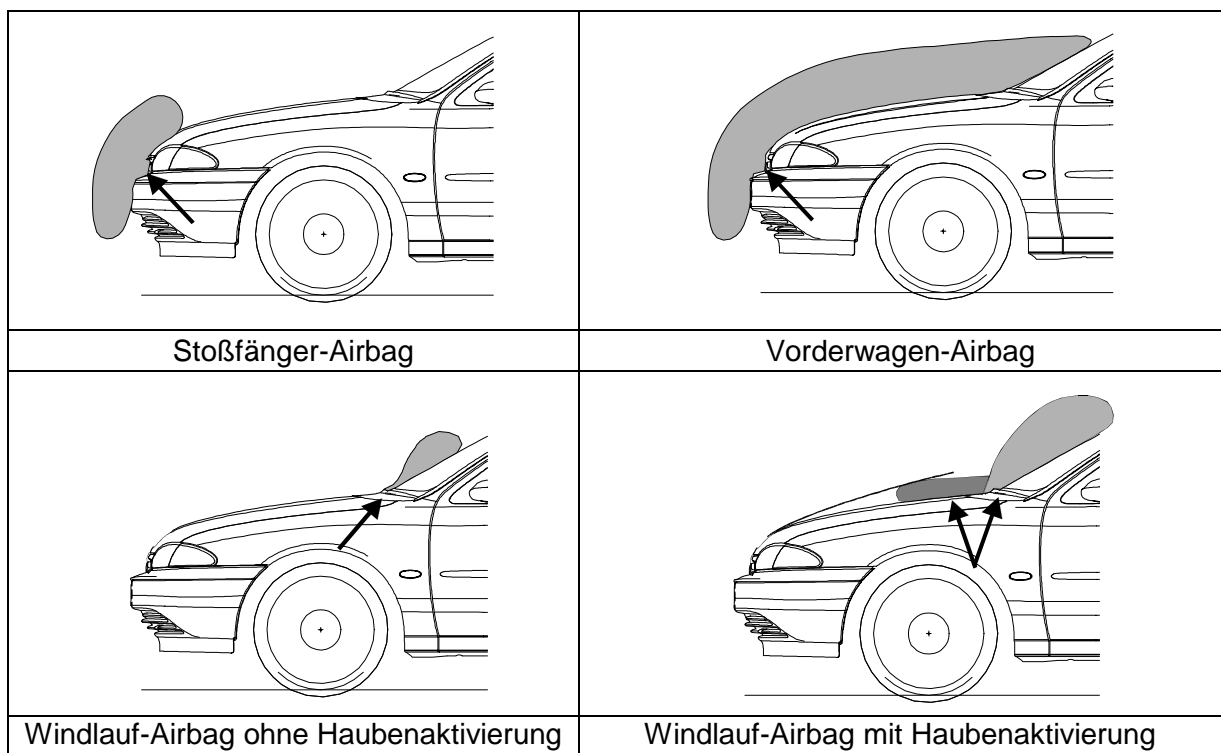


Abb. 3.3: Unterschiedliche Konzepte für Fußgänger-Airbags [APP78], [APH78], [MYU97], [GRI99], [OTA97]

Für den Bereich von Scheiben- und Dachrahmen sind ebenfalls verschiedene Arten von Airbags angedacht [SIN99], [SCH99].

Durch das aktive Anheben der Motorhaube bei sogenannten "Pop-Up"-Hauben wird zusätzlicher Deformationsraum bereitgestellt (Abb. 3.4). Es sind Konzepte bekannt geworden, welche sowohl den hinteren Bereich der Motorhaube für den Kopfaufprall als auch den vorderen Motorhaubenbereich für den Hüftaufprall aktivieren. Dabei wirken die Motorhauben weiterhin als energieabsorbierende Hauptkomponenten.

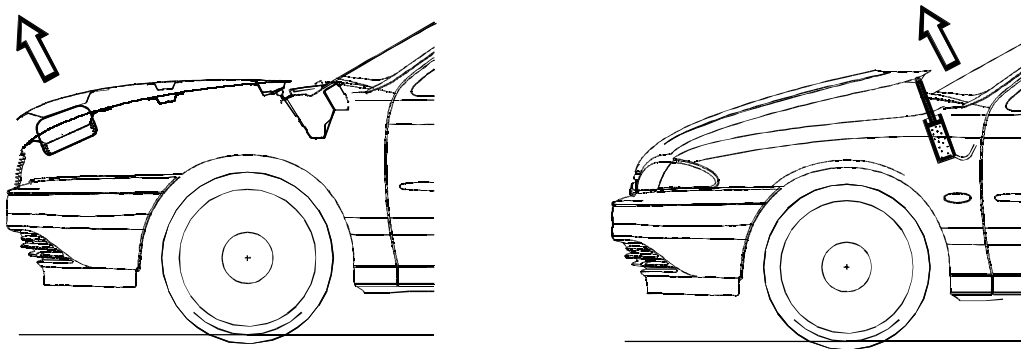


Abb. 3.4: Konzepte für "Pop-Up"-Hauben [SCH98], [PRO76], [GUM98], [FRI00]

Für den Beinaufprall sind Spoilerkonzepte vorgestellt, welche vor dem eigentlichen Fußgängerkontakt aktiviert werden (Abb. 3.5). Ein im Stoßfänger beweglich montierter Spoiler fährt – entweder direkt (A) oder angetrieben durch eine mit dem Front-End-Modul (B) gekoppelte Kinematik - in eine vorgezogene Stellung, um so die geometrischen Randbedingungen eines fußgängerfreundlichen Stoßfängers zu erfüllen (vgl. auch Kap. 5.1.2.1).

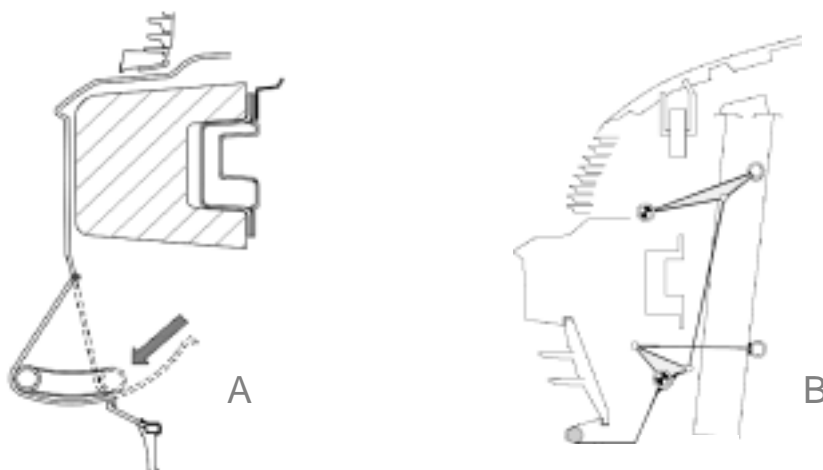


Abb. 3.5: AVS im Stoßfänger zur Minderung der Beinverletzungen [HEL90], [SCH00]

Bei den für aktive, variable Systeme notwendigen Erkennungssensoren für den Fußgäufprall lassen sich prinzipiell zwei Arten unterscheiden. Die sogenannten Früherkennungssensoren - z.B. Radar- oder Infrarotsensoren - identifizieren einen Fußgänger bereits vor dem Aufprall und lösen das AVS vor dem Aufprall aus. Kontakterkennungssensoren



soren hingegen aktivieren das AVS erst beim eigentlichen Fußgängeraufprall. Die Anordnung dieser Sensoren bzw. Sensorleisten befindet sich im Stoßfänger oder im Bereich der Haubenvorderkante [ROT97], [STR99].

Der wesentliche Vorteil der AVS liegt in der hohen Flexibilität zur gezielten Auslegung der Schutzsysteme auf den Fußgängeraufprall, ohne die Vielzahl der technischen Anforderungen an den Pkw-Vorderwagen und das Fahrzeugdesign einzuschränken. Nachteilig ist die Verwendung mehrerer zusätzlicher Baugruppen und die damit verbundene Kosten- und Gewichtserhöhung.

### 3.1.2.2 Passive, variable Systeme

Gegenüber AVS kann bei passiven, variablen Systemen auf die Verwendung von Sensoren verzichtet werden. Durch den Fußgängeraufprall selbst werden Fahrzeugaußenteile durch mechanische Vorrichtungen so bewegt, dass entweder zusätzlicher Deformationsfreiraum bereitgestellt wird oder Bereiche der Außenform des Fahrzeugs sich in eine für den Fußgängeraufprall vorteilhaftere Kontur verändern.

In [HOW96] und [HOW92] wird durch den Oberschenkel- bzw. Hüftaufprall des Fußgängers die verschiebbar gelagerte Motorhaube im Bereich der hinteren Haubenscharniere nach oben bewegt (Abb. 3.6). Durch die entsprechend deformationsweiche Auslegung der Motorhaubenbefestigung an der Fahrzeugstruktur wird dabei bereits ein Teil der Impaktenergie des Hüft- bzw. Oberschenkelaufralls absorbiert.

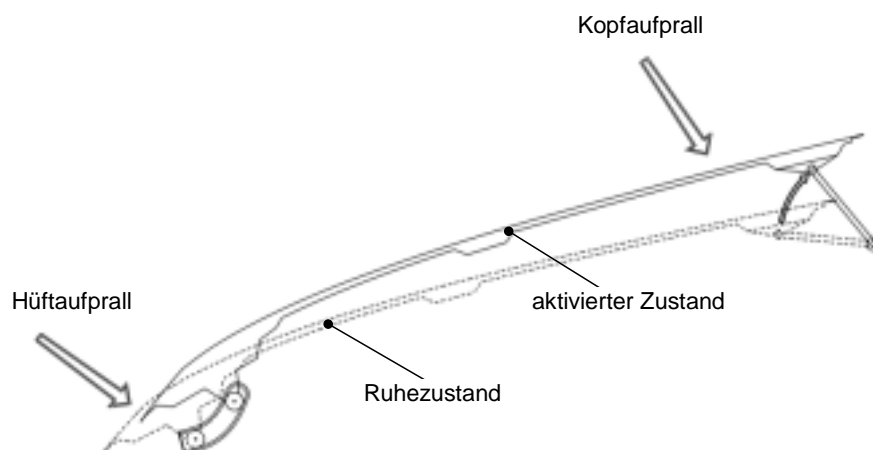


Abb. 3.6: Prinzip des passiven, variablen Systems für die Motorhaube zur Reduzierung der Hüft- und Kopfaufprallverletzungen

Die Vor- und Nachteile der PVS sind denen von AVS ähnlich. Der Vorteil gegenüber AVS liegt darin, dass auf Fußgängererkennungssensoren verzichtet werden kann. Dagegen sind die Gestaltungsvarianten von PVS sehr gering, da sie von der Fußgängeraufprallkinematik abhängen. Des Weiteren werden von PVS lediglich einzelne Körperregionen des Fußgängers beeinflusst, so dass eine Kombination mehrerer Systeme unumgänglich erscheint.

### 3.1.2.3 Permanente, starre Systeme

Als permanente, starre Systeme werden alle konstruktiven Fußgängerschutzmaßnahmen bezeichnet, die konkret auf die Fahrzeugkontur (konstant formwirksame Systeme) oder auf das Deformationsverhalten (konstant nachgiebigkeitswirksame Systeme) von fest montierten Bauteilen Einfluss nehmen. Die verschiedenen lokalen Lösungsansätze zielen auf eine Verbesserung des Kopf-, Hüft- und Beinaufpralls ab.

Als ein konstant nachgiebigkeitswirksames Fußgängerschutzsystem ist für den Beinaufprall die Verwendung von Schaumstoffkernen bzw. Schaumstofflagen (EA) hinter der Stoßfängerschale hinreichend bekannt und erprobt [KEL98], [KLI90], [PRI79], [ROD88], [RIC80]. Die verletzungszureduzierende Integration eines Stoßstangenspoilers nimmt dabei als PSS Einfluss auf die Fahrzeugkontur (Abb. 3.7). Ein im Spoiler eingebundenes Deformationselement wird gezielt auf ein bestimmtes Deformationsverhalten ausgelegt (vgl. auch Kap. 5.2.1). Der Strukturspoiler ist entweder als - von den Längsträgern bzw. dem Stoßfängerquerträger ausgehender - Rohrrahmen (D1), als Deformationselement (D2) mit dem Kühlträger verbunden oder direkt als Energieabsorptionseinleger (D3) ausgeführt.

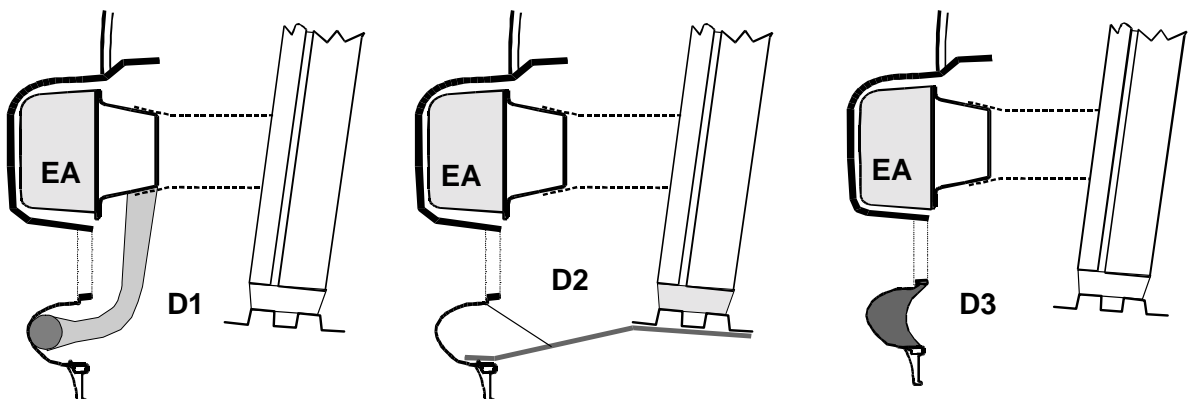


Abb. 3.7: Unterschiedliche Spoilerkonzepte gemäß [STA98], [BRO98], [HUL00]

Im Bereich der vorderen Haubenkante kann durch zusätzlich eingebrachte Deformationselemente, durch Ausbildung des Haubeninnenblechs in entsprechender Sickenform sowie durch verschiebbar gelagerte oder deformierbare Scheinwerfer das Belastungsniveau der Hüfte positiv verändert werden (Abb. 3.8).

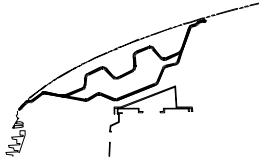
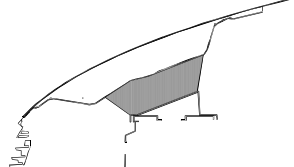
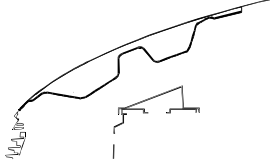
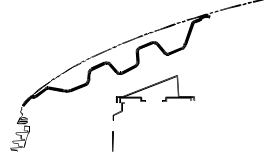
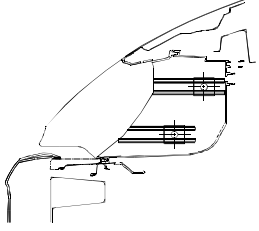
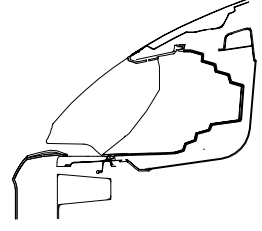
Konzeptbeschreibung	Prinzipskizzen	
Einsatz von zusätzlichen Deformationselementen [REI96], [RIC80]	Konturblech Haubenvorderkante 	Schaumstoff Haubenvorderkante 
Haubeninnenblech mit definierter Sickenbildung [REI96]	Einfachtrapezdicke im Haubeninnenblech 	Doppeltrapezdicke im Haubeninnenblech 
Scheinwerfermodul als energieabsorbierende, kraftbegrenzende Bauteilgruppe [SNC95], [STG87], [REJ87]	Verschiebbar gelagerte Lampe 	Kontrolliert deformierbare Lampe 

Abb. 3.8: Permanente, starre Systeme für den Hüftaufprall

Die Montage eines Prallbügels vor der Motorhaubenvorderkante [MAR73] soll den Hüftaufprall durch eine gezielte, deformationsweiche Auslegung reduzieren bzw. das Abrollen des Fußgängers ermöglichen und somit den Kopf vor dem Kontakt mit der Windschutzscheibe schützen. Dabei handelt es sich um die Kombination eines form- und nachgiebigkeitswirksamen Systems.

Konstruktive Detaillösungsvorschläge zur Minderung der Kopfbelastungen sind vor allem für den Bereich des unteren und oberen Windschutzscheibenrahmens, der A-Säule, für den Übergangsbereich Motorhaube-Kotflügelkante sowie für Motorinnenraumteile vorgestellt worden (Abb. 3.9).

Um einen Pkw-Vorderwagen mit permanenten, starren Systemen "fußgängerfreundlich" zu gestalten, bedarf es vieler Detaillösungen, die auf die kritischen Bereiche abgestimmt werden müssen. Vorteilhaft dabei ist, dass sich einige Lösungen in eine konventionelle Vorderwagenkonstruktion einbinden lassen und andere Detaillösungen nur wenig zusätzliche Bauteile benötigen.

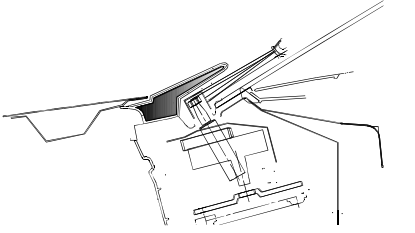
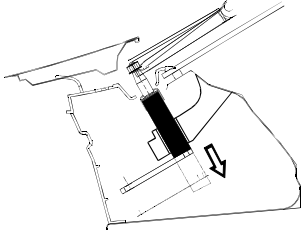
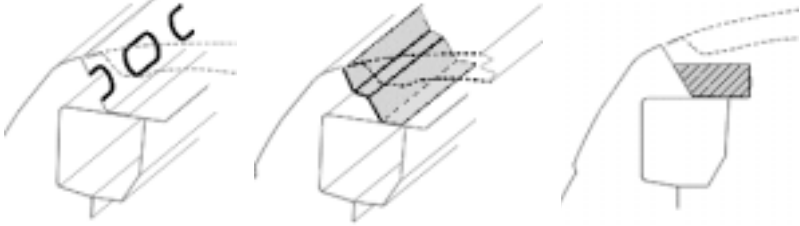

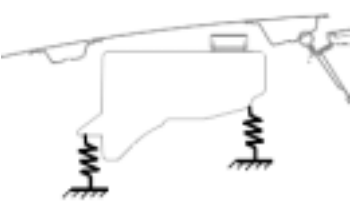
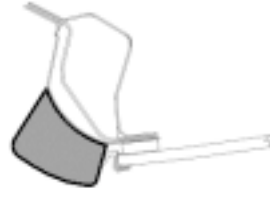

Fahrzeugbereich	Prinzipskizze	
Unterer Windschutzscheibenrahmen – hintere Haubenkante [APP76] [YOS99]	Energieabs. Wischerabdeckung 	Deformierbare Scheibenwischerachsen 
"Übergangsbereich Motorhaube – Kotflügel" [BEZ79], [SCW95], [SCM93], [BEZ89], [SCW89], [YOS99]		
Bauteile im Motorinnenraum [KRA81], [SNC95]	Abgestufte Spritzwand 	Deformierbare Befestigungselemente 
A-Säule, oberer Windschutzscheibenrahmen [STC79], [APP81], [APP83], [HOP85], [MEI86], [KAW99]	Energieabsorb. Scheibenrahmen 	Elastisch gelagerte Scheibe 

Abb. 3.9: Permanente, starre Systeme für den Kopfaufprall

Hinsichtlich Kosten- und Gewichtserhöhungen sind PSS im Vergleich zu AVS oder PVS als vorteilhafter zu beurteilen. Von Nachteil ist der hohe Entwicklungsaufwand zur gezielten Optimierung der vielen Detaillösungen sowie deren möglicher Einfluss auf das Fahrzeugdesign und auf bestimmte Fahrzeuganforderungen (vgl. auch Kap. 4).

### 3.2 Prüfvorschriften zum fahrzeugseitigen Fußgängerschutz

Eine Vielzahl von Untersuchungen - durchgeführt bereits Ende der siebziger Jahre - waren wegweisend für die Entwicklung von Einzelimpaktortests zur Beurteilung der Kompatibilität von Pkw-Vorderwagen beim Fußgängeraufprall. Durch Einzelimpaktortests wird das breite Spektrum der Fußgängeraufprallkinematik auf eine einfache Testdurchführung für den Kopf-, Hüft- und Beinaufprall reduziert. Die Unfallanalyse nimmt dabei entscheidenden Einfluss auf die Definition der einzelnen Prüfvorschriften. Bisher sind international drei Aktivitäten zur Erstellung von Test- bzw. Prüfvorschriften bekannt geworden.

#### 3.2.1 Amerikanische Aktivitäten

Der Schwerpunkt der NHTSA-Aktivitäten konzentriert sich auf ein einfaches Testverfahren zur Beurteilung von Kopfbelastungen [PRE83], [KES87], [MAL90], [MAL87]. Ein Aluminiumprüfkörper bildet hierbei den Erwachsenenkopf nach und ist mit Hybrid-III-Dummyhaut überzogen (Abb. 3.11).

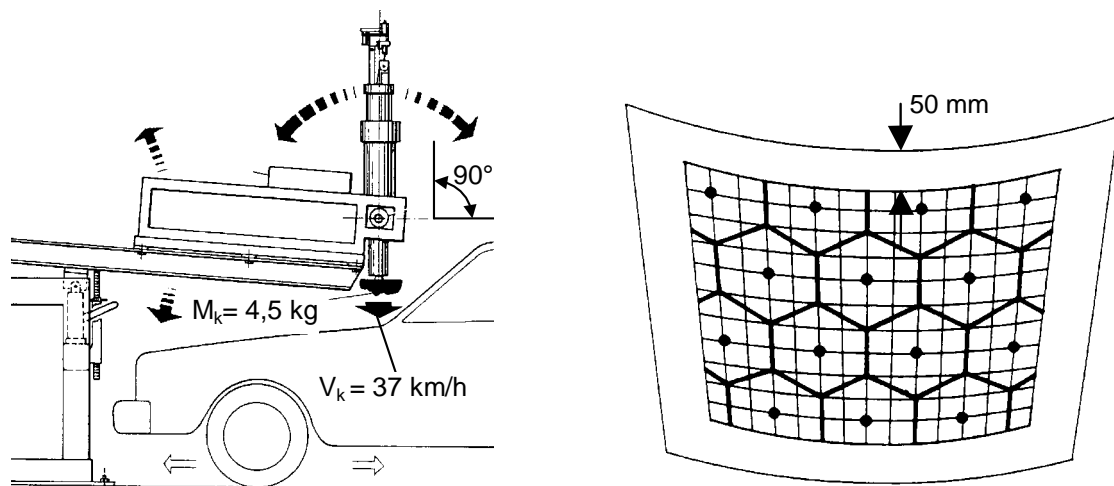


Abb. 3.11: NHTSA-Prüfstandaufbau und Verteilung der Aufprallpunkte des Kopfimpaktors

Insgesamt werden 14 Testkoordinaten festgelegt. Sie werden nach einem gleichmäßigen geometrischen Muster ausschließlich auf der Motorhaube definiert. Als Erfüllungskriterium kommt die HIC-Wertbedingung ( $HIC \leq 1000$ ) zum Einsatz.

Eine sehr einfache Testprozedur für einen Hüftimpaktor (Masse  $7,3 \text{ kg}$ ) aus den frühen achtziger Jahren konnte nie die Bedeutung eines Pilotprojekts überschreiten [PRI83], [PRI97]. Die Anwendung einer Testprozedur für einen Beinimpaktor wird zum derzeitigen Zeitpunkt durch die NHTSA im Rahmen der ISO-Arbeitsgemeinschaft (Kap. 3.2.3) mitdiskutiert [MOR98].

Die untergeordnete Rolle fahrzeugseitiger Fußgängerschutzmaßnahmen in den Vereinigten Staaten von Amerika findet vorrangig ihre Erklärung in dem geringen Anteil an Fußgängerunfällen (Kap. 2.1) und der auf die Fahrzeugdichte bezogenen ungünstigen Nutzen- und Kostenanalyse [PRI97] (vgl. auch Kap. 4.1).

### 3.2.2 Europäische Aktivitäten

Die Arbeitsgruppe "WG 10" der EEVC startete im Januar 1988 mit der Entwicklung einer Prüfvorschrift zum fahrzeugseitigen Fußgängerschutz bei Kraftfahrzeugen. Als Grundlage dienten verschiedene Untersuchungen der EEVC aus den Jahren 1980 - 1987 zu dieser Thematik [EEV85], [EEV82], [KEG85].

Im April 1992 wurde von der EU-Kommission erstmalig der Entwurf einer Richtlinie zur Erweiterung der Richtlinie 74/483/EEC über vorstehende Außenkanten bei Kraftfahrzeugen veröffentlicht. Ein detailliert ausgearbeiteter Entwurf [EEV94] zur gesetzlichen Überprüfung der "Fußgängerfreundlichkeit" von Personenkraftwagen wurde im November 1994 als Endbericht von der EEVC WG 10 vorgestellt. Aufgrund der umfassenden Zusatzerweiterungen dieses Entwurfs gegenüber der Richtlinie 74/483/EEC liegt seit Februar 1996 der eigenständige Regelungsentwurf III/5021/96 EN als Erweiterung der Richtlinie 70/156/EEC zur Erteilung einer EEC-Betriebserlaubnis beim Europäischen Parlament zur Prüfung vor [KEG96]. Kontroverse Diskussionen über die Durchführbarkeit, die Aussagequalität der Impakturvorschriften sowie die konstruktive Umsetzung der Impaktoren entfachten 1997 die Diskussion erneut. In einer weiteren EEVC-Arbeitsgruppe 17 „Fußgängerschutz“ wurde die Prüfvorschrift der EEVC WG 10 überarbeitet und im Dezember 1998 vorgestellt [WG1798]. Die Umsetzung der geänderten WG17-Prüfvorschrift in einen neuen Regelungsentwurf wird für das Jahr 2001 erwartet.

An der Ausarbeitung der Prüfverfahren durch die EEVC-Arbeitsgruppen waren Organisationen verschiedener europäischer Mitgliedstaaten (D, F, I, NL, S, UK) maßgeblich beteiligt. Für die Entwicklung der einzelnen Testimpaktoren sind vor allem die BAST, TRL, TNO sowie INRETS verantwortlich. Als Erfüllungskriterien für die einzelnen Impaktoren werden biomechanische Grenzwerte gefordert, die bis zu einer Geschwindigkeit von 40 km/h die Verletzungsschwere für das Kniegelenk auf AIS 2 und für alle anderen Körperregionen auf AIS 3 reduzieren sollen [HAR85], [HAR89]. Die Impaktorkonstruktion, der Testablauf und die biomechanischen Erfüllungskriterien basieren auf Dummy- und Leichenversuchen, Computersimulationen sowie Unfallrekonstruktionen und Ergebnissen aus der Unfallforschung. Eine Übersicht über die Testdurchführung der Prüfvorschrift III/5021/96 EN wird in Abb. 3.12 vorgestellt. Die Impaktorkonstruktion sowie die Beschreibung zur Bestimmung der Aufprallzonen werden in Anhang II-A und II-B dargestellt.

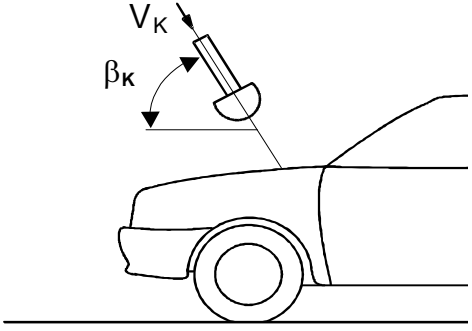
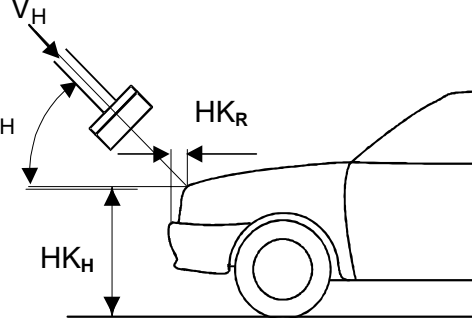
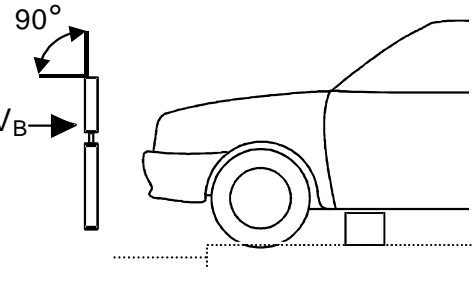
	<p style="text-align: center;"><b>Kopfaufprall</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>o <math>V_K = 40 \text{ km/h}</math></li> <li>o mind. 9 Tests pro Impaktor</li> <li>o Erfüllungskriterium: HPC 1000</li> </ul> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left; padding: 2px;">Erwachsenenkopf</th> <th style="text-align: left; padding: 2px;">Kinderkopf</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 2px;">o <math>\beta_{KE} = 65^\circ</math></td> <td style="padding: 2px;">o <math>\beta_{KK} = 65^\circ</math></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">o <math>m_{EK} = 4,8 \text{ kg}</math></td> <td style="padding: 2px;">o <math>m_{KK} = 2,5 \text{ kg}</math></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">o <math>AV_{EK} = 1500 \text{ bis } 2100 \text{ mm}</math></td> <td style="padding: 2px;">o <math>AV_{KK} = 1000 \text{ bis } 1500 \text{ mm}</math></td> </tr> </tbody> </table>	Erwachsenenkopf	Kinderkopf	o $\beta_{KE} = 65^\circ$	o $\beta_{KK} = 65^\circ$	o $m_{EK} = 4,8 \text{ kg}$	o $m_{KK} = 2,5 \text{ kg}$	o $AV_{EK} = 1500 \text{ bis } 2100 \text{ mm}$	o $AV_{KK} = 1000 \text{ bis } 1500 \text{ mm}$
Erwachsenenkopf	Kinderkopf								
o $\beta_{KE} = 65^\circ$	o $\beta_{KK} = 65^\circ$								
o $m_{EK} = 4,8 \text{ kg}$	o $m_{KK} = 2,5 \text{ kg}$								
o $AV_{EK} = 1500 \text{ bis } 2100 \text{ mm}$	o $AV_{KK} = 1000 \text{ bis } 1500 \text{ mm}$								
	<p style="text-align: center;"><b>Hütaufprall</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>o <math>V_H = f(HK_R, HK_H) = [20, 40] \text{ km/h}</math></li> <li>o <math>m_H = f(HK_R, HK_H) = [10, 15] \text{ kg}</math></li> <li>o <math>\beta_H = f(HK_R, HK_H) = [10, 47]^\circ</math></li> <li>o mind. 3 Tests</li> <li>o Erfüllungskriterien: <ul style="list-style-type: none"> <li>- max. Summenkraft / <math>F_{Hmax} = 4 \text{ kN} (5 \text{ kN}^1)</math></li> <li>- max. Biegung / <math>M_{Hmax} = 220 \text{ Nm} (300 \text{ Nm}^1)</math></li> </ul> </li> </ul>								
	<p style="text-align: center;"><b>Beinaufprall</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>o <math>v_B = 40 \text{ km/h}</math></li> <li>o Aufprallrichtung: horizontal</li> <li>o mind. 3 Tests</li> <li>o Erfüllungskriterien: <ul style="list-style-type: none"> <li>- max Verzögerung <math>a_{Bmax} = 150 \text{ g}</math></li> <li>- max. Biegung im Gelenk <math>\alpha_{Bmax} = 15^\circ</math></li> <li>- max. Knieverschiebung <math>u_{Bmax} = 6 \text{ mm}</math></li> </ul> </li> </ul>								

Abb. 3.12: Übersicht der Prüfvorschrift III/5021/96EN [KEG96] [WG1798]

Die beiden Kopfimpaktoren werden freifliegend auf die definierten Flächenbereiche der Karosserie geschossen. Der Hüftimpaktor wird als geführter Stoß ausgeführt, der Beinimpaktor freifliegend auf die Kontaktlinien katapultiert. Die Auswahl der Aufschlagpunkte innerhalb der definierten Bereiche und Kontaktlinien wird nach der Festlegung bestimmter Mindestabstände zu den Grenzlinien und den vorangegangenen Testpositionen getroffen. Getestet werden diejenigen Stellen, an denen die ungünstigsten Ergebnisse erwartet werden. Für die Kopfimpaktoren und den Beinimpaktor werden feste Aufprallbedingungen gewählt. Für den Hüftaufprall werden für jeden Test die Impaktormasse, der Aufprallwinkel und die Aufprallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Fahrzeugkontur interpolativ aus Diagrammen ermittelt (Anhang II-C).

<sup>1</sup> Höhere Werte beziehen sich auf den überarbeiteten Prüfvorschriftenvorschlag [WG1798].

Die wesentlichen Änderungen der Prüfvorschrift gemäß WG17 beziehen sich auf Hüft- und Beinaufprall. Für den Hüftaufprall werden die Zusammenhänge zwischen den geometrischen Fahrzeuggrößen und den Versuchsparametern zu Gunsten moderner Fahrzeugvorderwagen modifiziert. Die Belastungsgrenzen für das Biegemoment von 220 Nm und die Summenkraft von 4kN [KEG96] werden auf 300Nm [WG1798] resp. 5kN (WG17) angehoben. Die Prüfvorschrift für den Beinimpaktor wird durch die Einführung einer unteren Stoßfängerreferenzlinie eingeschränkt. Danach können Fahrzeuge mit einer Stoßfängerreferenzlinie, welche höher als 500mm ist, mit dem Hüftimpaktor getestet werden. Die übrigen Änderungsvorschläge beziehen sich auf Detailmodifikationen der Impaktorkonstruktion, die exaktere Festlegung der fahrzeugseitigen Testbereiche und die der Einschränkung von Prüftoleranzen [KAL99].

Trotz anhaltender kontroverser Diskussion [FRE00] nehmen die Aktivitäten in der Europäischen Gemeinschaft auf dem Öffentlichkeitssektor zu. So ist ein Prüfkörper-Prüfverfahren in Anlehnung an den Regelungsentwurf III/5021/96 EN seit 1995 ein fester Bestandteil im Testprogramm von Euro-NCAP<sup>2</sup> [EUN00].

### 3.2.3 Weltweite Aktivitäten

In der ISO-Arbeitsgruppe ISO/TC22/SC10/WG2 wird unter Leitung von IHRA und mit Unterstützung europäischer (EEVC, BAST, TRL, INRETS, TNO, MIRA, ACEA, PSA), amerikanischer (NHTSA, SAE, ), australischer (FORS) sowie japanischer Organisationen (JAMA, JARI, JSAE) eine Impaktorprüfvorschrift zur Beurteilung der "Fußgängerfreundlichkeit" von Personenkraftfahrzeugen entwickelt. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Entwicklung von Bein- und Kopfimpaktoren mit entsprechender Beschreibung der Testdurchführung. Die Entwürfe der Prüfvorschriften für die einzelnen Impaktoren sind für eine Anwendung bis zu einer Geschwindigkeit von 11m/s geplant und an die europäischen Aktivitäten angelehnt.

Der konzeptionelle Impaktoraufbau, der Testaufbau sowie die Testdurchführung des ISO- und EU-Beinimpaktors sind vergleichbar. Die Impaktorummantelung des ISO-Beinimpaktors wird mit einer 5 mm dickeren Schaumstoffschicht umgesetzt. Der wesentliche Unterschied liegt in der Beschreibung der Kniegelenkanforderung. In der ISO-Prüfvorschrift wird für die Zertifizierung des Impaktors ein Abgleich mit dynamischen - statt statischen - Zielkurven für die Biegemomente- und für die Scherkraft vorgeschrieben. Des Weiteren werden höhere Deformationsmaximalwerte verwendet. Für die Messwertaufnahme wird zusätzlich das Bie-

---

<sup>2</sup> Euro-NCAP: "European New Car Assessment Program" ist ein verbraucherorientiertes Bewertungsprogramm, welches regelmäßig neue Fahrzeugmodelle auf zukünftige Fahrzeugsicherheitsstandards hin überprüft.



gemoment, die Scherkraft im Gelenk sowie die Kontaktkraft vorgeschlagen [ISO97]. Das ISO-Gelenkelement lässt somit ein direktes Messen des dynamischen Biegemoments und der Scherkräfte im Gelenk zu. Mögliche Erfüllungskriterien werden in [SAK94], ein entsprechender ISO-Beinimpaktor mit reversiblen Kniegelenken in [MOR98] vorgestellt.

Die wesentlichen Unterschiede [ISO98] [SAK93] für die Simulation des Erwachsenenkopfaufpralls gegenüber dem Europäischen Richtlinienentwurf liegen im Einsatz eines Impaktors mit 4,5 kg Gesamtmasse und einem Aufprallwinkel von 53°. Die Kopfaufprallgeschwindigkeit wird in Abhängigkeit zur Fahrzeuggeschwindigkeit über eine lineare Funktion vorgegeben. Eine Impaktorprüfvorschrift für einen Kinderkopf ist in Untersuchung. Aufgrund der untergeordneten Rolle des Hüftaufpralls beim realen Unfallgeschehen wird eine Einführung dieses Impaktors in Frage gestellt [MAT98] und [MAT99].

## **4 Passiver Fußgängerschutz in der Pkw-Entwicklung**

Bei heutigen Fahrzeugentwicklungen wird passiver Fußgängerschutz lediglich nach der Richtlinie 74/483/EEC gesetzlich gefordert. Weiterführende Maßnahmen zur Verbesserung der "Fußgängerfreundlichkeit" von Pkw-Vorderwagen, wie sie beispielsweise im europäischen Richtlinienentwurf III/5021/96EN vorgeschlagen werden, nehmen umfangreichen Einfluss auf den Pkw-Vorderwagen. Bereits existierende, gesetzliche sowie zukünftige, kundenorientierte Anforderungen müssen dabei gleichermaßen Berücksichtigung finden. In einem interaktiv funktionierenden Fahrzeugentwicklungsablauf spiegelt sich dies in einer Verlagerung der Entwicklungsaktivitäten wider.

Im nachfolgenden wird der Zielkonflikt bei der Umsetzung von Fußgängerschutzanforderungen in eine Serienentwicklung aufgezeigt. Daraus resultierend werden sinnvolle Entwicklungsziele definiert und ein Weg zur Umsetzung dieser Ziele aufgezeigt. Für den in Form eines veränderten Entwicklungsablaufes vorgestellte Umsetzungsweg werden notwendige Werkzeuge und Methoden identifiziert sowie die Notwendigkeit abgeleitet, welche Werkzeuge und Methoden davon neu zu entwickeln sind.

### **4.1 Passive Fußgängerschutzanforderungen im Zielkonflikt mit heutigen Fahrzeuganforderungen**

In der heute üblichen Form der Pkw-Entwicklung werden stilistische und im Lastenheft verankerte technische Anforderungen in einem ständigen, interaktiven Entwicklungsprozess zum Gesamtfahrzeug optimiert. Besonders in der Anfangsphase der Entwicklung wird die stilistische Grundform mit den fahrzeugbezogenen technischen Anforderungen in Einklang gebracht. In dieser Phase greift idealerweise die Auslegung von "fußgängerfreundlichen" Pkw-Vorderwagen. Der Umfang der Maßnahmen, welche die Kompatibilität des zu entwickelnden Fahrzeugs für einen Fußgängeraufprall festlegen, wird demzufolge im Lastenheft festgehalten. Da der europäische Richtlinienentwurf III/5021/96EN die bisher einzige offizielle, umfangreich konkretisierte Prüfvorschrift zur Beurteilung passiver Fußgängerschutzmaßnahmen ist, wird er als Bezugsgröße vier möglicher Erfüllungsstrategien herangezogen.

- I) Passive Fußgängerschutzmaßnahmen werden lediglich in der seit Jahren üblichen Form berücksichtigt (Erfüllung der Richtlinie 74/483/EWG).
- II) Gezielte zusätzliche Maßnahmen werden in die Fahrzeugkonstruktion integriert (verdeckte Scheibenwischerachsen, geänderte Formgebung des Stoßfängers usw.). Eine partielle Erfüllung des Richtlinienentwurfs III/5021/96EN wird angestrebt (vgl. auch [FRE00]).

- III)** Alle zur Erfüllung des EU-Richtlinienentwurfs notwendigen Maßnahmen werden im Lastenheft festgehalten.
- IV)** Zusätzliche oder über Strategie III hinausgehende Maßnahmen werden getroffen (Berücksichtigung von Scheibe und Scheibenrahmen oder Übererfüllung der in III vorgeschriebenen Grenzwerte).

Die Umsetzung dieser Erfüllungsstrategien ist mit aktiven und passiven, variablen Systemen sowie starren, permanenten Systemen (vgl. Kap. 3.1.2) denkbar. Auf einzelne Teilbereiche bezogen ist auch eine Kombination der Strategien anwendbar. Je nach Wahl der Erfüllungsstrategie und der Umsetzungsart werden unterschiedliche Anforderungen an Bauteile, Bauteilgruppen oder Fahrzeugprogrammziele gestellt.

Eine zusätzliche Einbindung von Anforderungen zur Gestaltung "fußgängerfreundlicher" Pkw-Vorderwagen in das Lastenheft nimmt in sehr komplexer Form Einfluss auf die fünf prinzipiellen Anforderungsblöcke (Abb. 4.1).



Abb. 4.1: Einflussnahme von passivem Fußgängerschutz auf verschiedene Anforderungen

Folgende Einzelpositionen der Anforderungsblöcke werden aufgrund gesetzlicher Vorschriften oder kundenorientierter Erwartungen von einem modernen Pkw gefordert:

#### 1) Mechanische Anforderungen:

- => Stoßfängertest nach ECE 42, FMVSS 581 und SM24
- => Motorhaubentest, wie z.B. Haubeneindrückttest, -schließtest, -torsionstest
- => Frontal-Crash-Test, wie z.B. ECE 33, FMVSS 208
- => Haubenöffnungskinematik
- => Karosseriesteifigkeit und –schwingungsverhalten
- => Betriebsfestigkeit der Karosserie und Anbauteile.

## 2) Aerodynamische Anforderungen:

- => Optimierung der Vorderwagenaußenkontur ( $C_w$ -Wert-Anforderung)
- => Optimierung der vorderen Karosserieöffnungen bestimmter Motorraumfreiräume für Motoransaugluftzufuhr, Innenraumbelüftung und Bremsenkühlung.

## 3) Stylistische Anforderungen:

- => "Corporate Identity" (z.B. BMW-Nierenkühlergrill, Ford-"New Edge Design")
- => Dem "Zeitgeist" Rechnung tragen (z.B.: "Cab Forward Design", "Retro Design")
- => Abgestimmte Proportionen und gezielte Linienführung von Karosseriefugen.

## 4) Niedrige Kosten

- => Vermeidung zusätzlicher Baugruppen
- => Einsatz optimaler Konstruktionsmaterialien
- => Einfache, kostenorientierte Fertigung der Einzelteile und der Baugruppen.

## 5) Sonstige Anforderungen:

- => Forderungen nach der Einhaltung bestimmter Sichtfelder und -grenzlinien
- => Funktionserfüllung bestimmter Bauteile erfordern bestimmte Mindestgrößen sowie entsprechende Freiräume zu anderen Bauteilen (z.B. Volumen des Luftfilterkastens, Abstand des Kühleraggregats zu Motoranbauteilen)
- => Forderung nach gutem Recycling [WIS94], [WIS97]
- => Anordnung und Lichtleistung der Scheinwerfer
- => Böschungswinkel für den vorderen Stoßfänger
- => Bauteilgewicht
- => Sonderanforderungen an Spezial- und Geländefahrzeuge.

Diese fünf Anforderungsblöcke werden durch konstruktive Änderungen zu Gunsten passiver Fußgängerschutzmaßnahmen direkt betroffen. Indirekte Einflussnahmen, beispielsweise auf den Benzinverbrauch, die Versicherungsschadeneinstufung, das Fahrzeuggewicht oder auf die Fahrzeugakustik können davon abgeleitet werden.

Der Grad der Erfüllung des EU-Richtlinienentwurfs kann somit als „Intensitätsregler“ verstanden werden, der entsprechend die Einflussnahme auf die einzelnen Anforderungen bestimmt. Abb. 4.2 verdeutlicht prinzipiell die qualitativen Zusammenhänge unter Kostenaspekten.

Als Ausgangsbasis dient Erfüllungsstrategie I, wie sie bei heutigen Produktionsfahrzeugen „Stand der Technik“ ist. Durch eine zusätzliche - vergleichsweise niedrige - variable Kostenfreistellung sowie durch entsprechende Investitionen für permanente, starre Systeme kann der Erfüllungsgrad erhöht werden ( $a_1$ ). Für bestimmte Bereiche können Verbesserungen des Erfüllungsgrades nach heutigem Wissensstand nur durch variable Systeme erreicht

werden. Der Kostenzuwachs steigt sprunghaft an ( $b_1$ ). Die Einführung komplett neuer Technologien ist notwendig. Ein zusätzliches Erfüllungspotential über die Anforderungen des EU-Richtlinienentwurfs hinaus ist abschätzbar (z.B. Windlauf-"Airbag" mit Schutz vor einem Scheibenaufprall). Analog dazu kann der Erfüllungsgrad von der Ausgangsbasis ausgehend weiter gesteigert werden, wenn auf das Vorderwagendesign Einfluss genommen wird ( $a_2$  und  $b_2$ ). Hierdurch können größere Deformationsfreiräume sowie vorteilhafte Geometrieparameter für die Fahrzeugaußenkontur berücksichtigt werden. Dies führt jedoch zu einer Vereinheitlichung der Vorderwagen-Designparameter (vgl. auch Kap. 5.1).

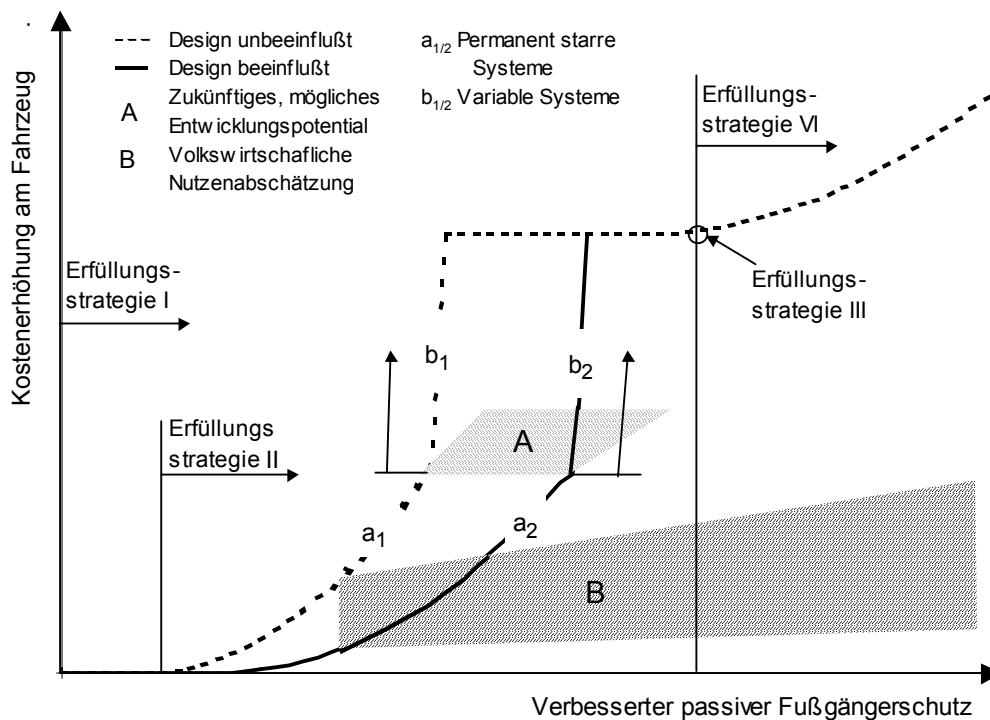


Abb. 4.2: Qualitative Kostenbetrachtung konstruktiver Fußgängerschutzmaßnahmen

Der Bereich A reflektiert eine prinzipielle Abschätzung des zukünftigen Potentials, wenn auf weitere Erkenntnisse über wirksame Fußgängerschutzmaßnahmen zurückgegriffen werden kann. Durch die Integration neuer Technologien können besonders "mechanische" und "sonstige" Anforderungen erfüllt und somit zusätzlicher Freiraum für konstruktive Maßnahmen zum passiven Fußgängerschutz geschaffen werden. Dieses spiegelt sich dann indirekt in einer Kostenerhöhung wider.

Die gesamte Kostenerhöhung kann entweder durch den Wegfall bestimmter Fahrzeugoptionen kompensiert oder durch einen entsprechenden Aufpreis an den Kunden weitergegeben werden. Die Bereitschaft der Kunden, zusätzliche Kosten für Fußgängerschutzmaßnahmen zu tragen, ist bis dato ungeklärt. Eine Analyse des Kundenverhaltens wird auf

besondere Schwierigkeiten stoßen, da der Käufer durch diese Maßnahmen keinen direkten Nutzen erfährt. Vom Kunden unabhängig kann eine volkswirtschaftliche Nutzenanalyse höhere Investitionen (Bereich B) für fußgängerfreundliche Pkw-Entwicklungen rechtfertigen (vgl. auch [LAW93], [DAV97]). Um die Einflussnahme von passiven Fußgängerschutzmaßnahmen auf die Fahrzeugkosten und die übrigen Anforderungen zu kontrollieren, bedarf es daher einer genauen Zieldefinition für den Entwicklungsumfang.

#### 4.2 Passiver Fußgängerschutz als Entwicklungsziel

Durch die Zieldefinition wird der Umfang des passiven Fußgängerschutzes und somit der Einfluss auf die einzelnen Fahrzeugattribute festgelegt. Die Zieldefinition wird dabei durch den Richtlinienentwurf III/5021/96EN vorgegeben. Der EU-Richtlinienentwurf unter Berücksichtigung der dort definierten Grenzwerte kann bisher noch von keinem Serienfahrzeug erfüllt werden. Eine Analyse von 75 Fahrzeugen verschiedener Fahrzeugklassen, welche zwischen 1995 und 2000 im Rahmen von Euro-NCAP [EAM00] getestet wurden, zeigt für die einzelnen Impaktoren unterschiedliche Erfüllungswerte. Die Einteilung der Erfüllungsstufen<sup>1</sup> erfolgt dabei nach folgenden Kriterien:

- Erfüllungsstufe I: Vom Fahrzeughersteller definierte verschärfte Grenzwerte<sup>2</sup> werden eingehalten.
- Erfüllungsstufe II: Vorgeschriebene Grenzwerte aus [KEG96] werden eingehalten.
- Erfüllungsstufe III: Gesetzlich definierte Grenzwerte werden gerade nicht erfüllt. Getestete Fahrzeugbereiche können durch konventionelle, konstruktive Maßnahmen optimiert werden.
- Erfüllungsstufe IV: Grenzwerte werden weit überschritten. Aufwendige, konstruktive Maßnahmen mit entsprechend hohem Einfluss auf das Fahrzeuglastenheft sind notwendig.

Wie aus [Abb 4.3](#) ersichtlich, ist der Varianzbereich für die vier Erfüllungsstufen und die verschiedenen Testfahrzeuge sehr breit gefächert.

---

<sup>1</sup> Die Grenzwertfestlegungen für Erfüllungsstufen I, III und IV basieren auf Einschätzung und Erfahrung des Autors.

<sup>2</sup> Um sicherzustellen, dass gesetzlich definierte Grenzwerte - unter Berücksichtigung der Test- und Produktionsstreuung - erfüllt werden, müssen die Erfüllungskriterien entsprechend verschärft werden. Diese Werte lassen sich aus statistischen Versuchsreihen ermitteln.

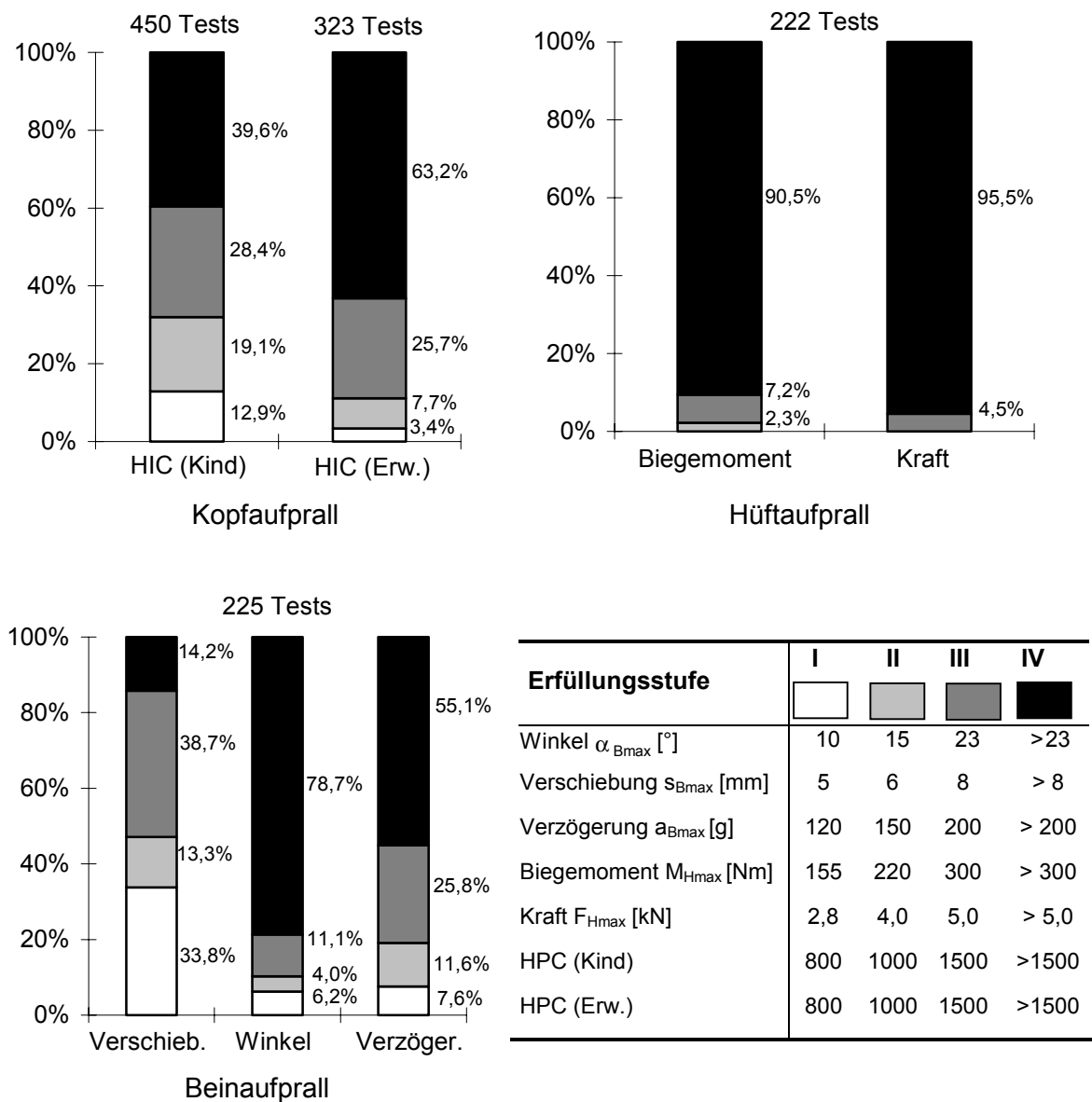


Abb. 4.3: Testergebnisse von 75 nach Euro-NCAP geprüften Pkw [EAM00], [EUN00]<sup>3</sup>

Alle Testfahrzeuge sind ohne umfangreiche, konstruktive Maßnahmen von der Erfüllung des EU-Richtlinienentwurfs weit entfernt. Sowohl die scheinbar vorteilhafte stylistische Form als auch die Dimensionierung der relevanten Bauteilgruppen müssen für die "besseren" Fahrzeuge als rein zufällig angesehen werden, da sie nicht gemäß dem EU-Richtlinienentwurf konzipiert wurden. Eine Substitution der europäischen Fahrzeugflotte wird, um

<sup>3</sup> Die Euro-NCAP-Prüfung weicht bei der Auswahl der Impaktunkte von dem EU-Richtlinienentwurf III/5021/96EN ab. Es werden nur sechs Impaktunkte für den Kopf ausgewählt, von denen die bessere Hälfte durch den Fahrzeughersteller vorgegeben wird. Fahrzeuge, die nach der Euro-NCAP-Prüfung getestet werden, weisen daher bessere Ergebnisse auf, als solche, die durch den Richtlinienentwurf getestet werden.

der Prüfvorschrift des EU-Richtlinienentwurfs gerecht zu werden, in [SIN95] und [DAV97] hinsichtlich Kosten-Nutzenanalyse als unausgewogen beurteilt.

Neben den schwer zu erfüllenden Grenzwerten sind bei der Anwendung der Prüfvorschrift gemäß Regelungsentwurf III/5021/96 sowie dem überarbeiteten WG17-Prüfvorschriftenentwurf [WG1798] mehrere Unzulänglichkeiten bzw. Kritikpunkte aufgefallen, welche eine fahrzeugbezogene Zieldefinition beeinflussen.

#### Kopfimpakt:

- 1) Unzureichende bzw. zu überarbeitende Definition der Testvorschrift bei Überlappung von Kinderkopf- und Hüftaufprallbereich [HAP99] beim Übergangsbereich vom Kinder- zum Erwachsenenkopf sowie für den Aufprallwinkel
- 2) Unberücksichtigter Geschwindigkeitseinfluss des Kopfaufpralls auf das Fahrzeug durch unterschiedliche Aufprallkinematik
- 3) Ungeklärte Einflussnahme des Bereichs Windschutzscheibe/-rahmen hinsichtlich Erfüllungspotential und volkswirtschaftlichem Nutzen.

#### Hüftimpakt:

- 1) Hohe Restriktionen an die Fahrzeugfront durch niedrige Erfüllungskriterien (Abb.4.3)
- 2) Sehr aufwendige Durchführung der gesamten Prüfvorschrift
- 3) Geringer Nutzeneffekt durch die untergeordnete Rolle des Hüftaufpralls hinsichtlich Verletzungshäufigkeit und -schwere (vgl. auch Abb 2.5) [YM98], [YM99], [FOR98]
- 4) Mangelnde Übereinstimmung von Komponententest und realem Unfall [FOR98], [YM99]
- 5) Hoher Zielkonflikt von Hüftaufprallbenefiz und steigende Belastung für Kinderkopf [HAP99]
- 6) Schlechte Ergebnisqualität und Reproduzierbarkeit (Kap 7.3) [GRE98].

#### Beinimpakt:

- 1) Hohe Ungenauigkeit und Fehlerhaftigkeit bei der Gelenkverschiebung [GER98], [MOR98]
- 2) Notwendigkeit der Gelenkverschiebung ist umstritten (vgl. auch Kap 6.1.3).

Für die praktikable Festlegung passiver Fußgängerschutzmaßnahmen in den Lastenheften zukünftiger Fahrzeugprogramme lassen sich daher folgende Anforderungen aufstellen:

- => Die technische Umsetzung aller baulichen Einzelmaßnahmen am Fahrzeugvorderwagen muss auch für Serienfahrzeuge realistisch sein.
- => Es wird ein – zumindest - neutrales volkswirtschaftliches Kosten-/Nutzenverhältnis für den Umfang der Fahrzeugänderungen angestrebt.
- => Die Überprüfung der Erfüllungskriterien erfolgt durch einfache, reproduzierbare und fehlerfreie Prüfvorschriften.



Das globale Entwicklungsziel konzentriert sich daher auf einen verbesserten passiven Fußgängerschutz mit teilweise Bezug auf die europäische Prüfvorschrift (Erfüllungsstrategie II aus Kap. 4.1). Eingeschränkt werden die Bereiche der Prüfvorschrift, die während der Durchführung dieser Arbeit ungeklärt sind oder solche, die derartige technische Umsetzungen erfordern, die auch in absehbarer Zukunft nicht realisierbar erscheinen. Durch diese Maßnahme kann des Weiteren das ungünstige Kosten-/ Nutzenverhältnis relativiert werden. Die wesentlichen Entwicklungsziele werden in [Abb 4.4](#) vorgestellt. Ein von der ACEA vorgeschlagener Alternativvorschlag wird in [FRE00] vorgestellt.

Allgemein	Berücksichtigung des Pkw-Vorderwagens ohne Scheibe und ohne seitlichen und oberen Scheibenrahmen ----- Testbereiche und Referenzlinien (vgl. Anhang IIa) werden aus [WG1798] übernommen. Die Definition des äußersten, hinteren Aufprallpunkts und der Übergangsbereich vom Kinder- zum Erwachsenen aufprallbereich werden modifiziert. ----- Verschärfte Grenzwerte (Erfüllungsstufe I) werden nicht berücksichtigt.
Beinimpaktor	Vernachlässigung der Gelenkverschiebung
Hüftimpaktor	Impaktorsvorschrift nach [KEG96] oder [WG1798] wird nicht berücksichtigt
Kopfimpaktor	Impaktorsvorschrift nach [WG1798] ----- Flächenbezogene Reduktion der Testbereiche (Abb. 4.5)

Abb. 4.4: Zusammenfassung der wesentlichen Entwicklungsziele

Aufgrund der flächenbezogenen Reduktion der Testbereiche ([Abb. 4.5](#)) für den Kopfimpaktor (hier: 20%) können besonders aufwendig zu modifizierende Bereiche des Pkw-Vorderwagens ausgenommen werden. Die Flächenreduktion kann durch wenige zusammenhängende Flächenteilbereiche (hier: drei pro Impaktor) umgesetzt werden.

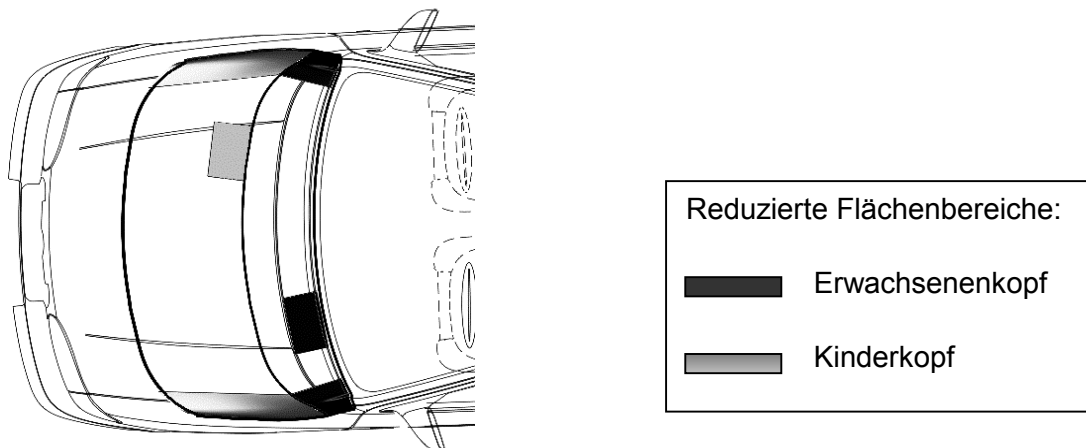


Abb. 4.5: Flächenbezogene Reduktion der Testbereiche für den Kopfimpakt

Eine Reduktion auf einen Flächenteilbereich erscheint sinnvoll, da alle Ansätze von Prüfvorschriften zur Beurteilung der "Fußgängerfreundlichkeit" von Pkw-Vorderwagen auf statistischen Reduktionszahlen basieren. Diese sind vor allem:

=> die Verteilung der Aufprallpunkte auf den Vorderwagen

=> die Reduktion der Unfallfolgeerscheinungen in einzelnen Stufen (z.B.: Herabsetzen der Einzelschwereverletzung um eine Stufe bei verbesserter Aufprallkompatibilität).

Das Entwicklungsziel konzentriert sich, um eine Verhältnismäßigkeit hinsichtlich Kosten/Nutzen (Abb. 4.2) zu erreichen, ausschließlich auf die Verwendung permanenter, starrer Systeme. Für den Beinimpaktor wird dabei in jedem Fall von einer bedingten Einflussnahme auf das Fahrzeugdesign durch die Integration eines Stoßstangenspoilers ausgegangen. Änderungen für den Kopfaufprallbereich sind lediglich im Rahmen detailimmanenter Stylingrestriktionen (Kap. 5.1.1) enthalten. Die Berücksichtigung der Hüftimpaktorerfüllungskriterien sowie der Testvorschrift erfolgt lediglich als Referenz. Die Erfüllungskriterien für den Hüftimpaktor werden nicht als verbindliches Entwicklungsziel eingebunden. Es wird eine nicht quantifizierte Verbesserung gegenüber üblichen Produktionsfahrzeugen angestrebt.

Das hier definierte Entwicklungsziel fordert umfangreiche Änderungen an Pkw-Vorderwagen und erscheint daher nur für Neuentwicklungen praktikabel. Um die Entwicklung zukünftiger "fußgängerfreundlicher" Fahrzeugmodelle gemäß Erfüllungsstrategie II bestmöglich zu unterstützen, muss sichergestellt sein, dass entsprechende Entwicklungswerkzeuge sowie ein darauf abgestimmter Entwicklungsprozess zur Verfügung stehen.

#### **4.3 Erweiterter Pkw-Entwicklungsablauf durch passiven Fußgängerschutz**

In der Vergangenheit sind zahlreiche, einfache, konstruktive Detailideen bekannt geworden, die sich bis hin zu aufwendigen Gesamtkonzepten mit der technischen Umsetzung von passiven Fußgängerschutzmaßnahmen beschäftigen (vgl. Kap. 3.1.2). Diese Konzeptvorschläge haben in der Regel das Stadium der Forschung oder der frühen Vorentwicklungsstufe nicht verlassen. Die Umsetzung einer Konzeptidee in ein verifiziertes, produktionsreifes System ist in einen komplexen, interaktiv agierenden Entwicklungsablauf eingebunden. Die Entwicklung eines "fußgängerfreundlichen" Pkw-Vorderwagens muss daher in Einklang mit den übrigen Erfüllungskriterien des Gesamtfahrzeugs gebracht werden.

Die heute üblicherweise praktizierte Fahrzeugentwicklung basiert auf der Systementwicklung nach dem "Topdown"-Prinzip (Abb. 4.6). Als Ausgangsbasis des Prozesses werden die kundenorientierten und gesetzlichen Forderungen ermittelt und daraus das entsprechende Fahrzeuganforderungsprofil entwickelt. Dabei werden die Anforderungen - soweit möglich und sinnvoll - bis zu den einzelnen Bauteilgruppen aufgebrochen ("top-down") und

in einem systematischen, analytischen Prozess [CHN96], [DOE99] in Einklang gebracht (Synthese). Analytische Konzeptwerkzeuge unterstützen dabei die Abstimmung des Fahrzeuganforderungsprofils. Bei der Systementwicklung einzelner Bauteilkomponenten bis zum Gesamtfahrzeug erfolgt die Validierung zunehmend durch analytische Werkzeuge. Prüfstand-, Bug- und Gesamtfahrzeugtests werden für die Synthese und die Anforderungsvalidierung häufig nur noch zur Verifizierung analytischer Aussagen eingesetzt.

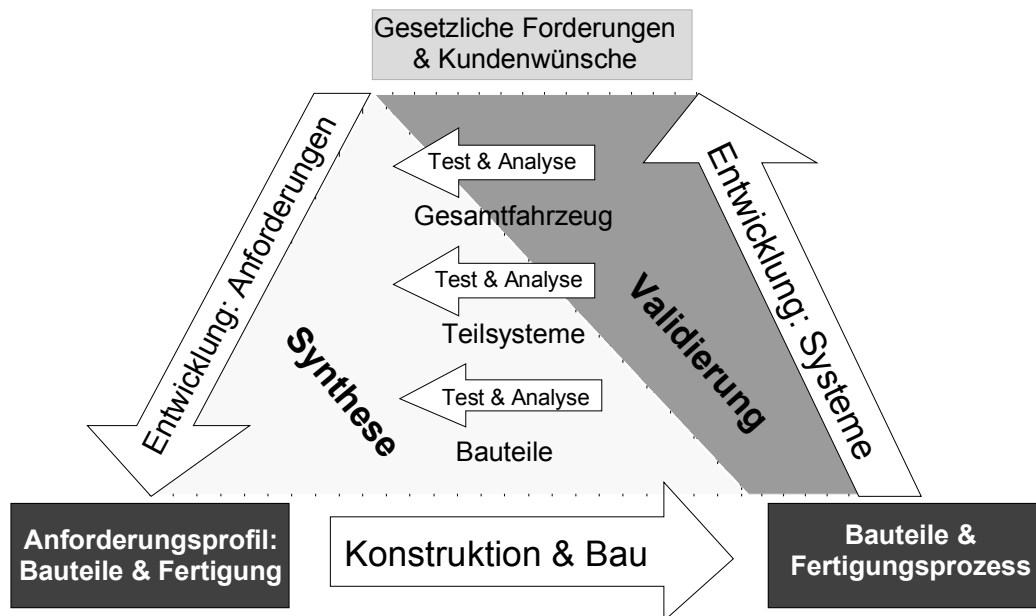


Abb. 4.6: Auf Systementwicklung basierende Fahrzeugentwicklung nach dem "Topdown"-Prinzip [CHA96]

Der Systementwicklungsprozess nach dem "Topdown"-Prinzip ist durch das parallele Ablaufen der entsprechenden Entwicklungsaktivitäten charakterisiert (Abb 4.7). Nach Ablauf der einzelnen Entwicklungsblöcke werden Zielvorgaben (z.B. Themenentscheidung, Prototypenzulassung) gefordert und deren Erreichen kontrolliert. Die zeitliche Abfolge der einzelnen Zielvorgaben hängt vorrangig vom Umfang bzw. Grad der Fahrzeugneuentwicklung ab (z.B.: 17 Monate - "Face Lift", 42 Monate - "komplette Neuentwicklung" [JEW96]).

Die einzelnen Prozessschritte zur Gestaltung "fußgängerfreundlicher" Pkw-Vorderwagen müssen sich entsprechend in den Gesamtprozess eingliedern (Abb 4.8). Während der Erstellung des Anforderungsprofils wird der Umfang passiver Fußgängerschutzmaßnahmen mit den übrigen Lastenheftanforderungen festgelegt.

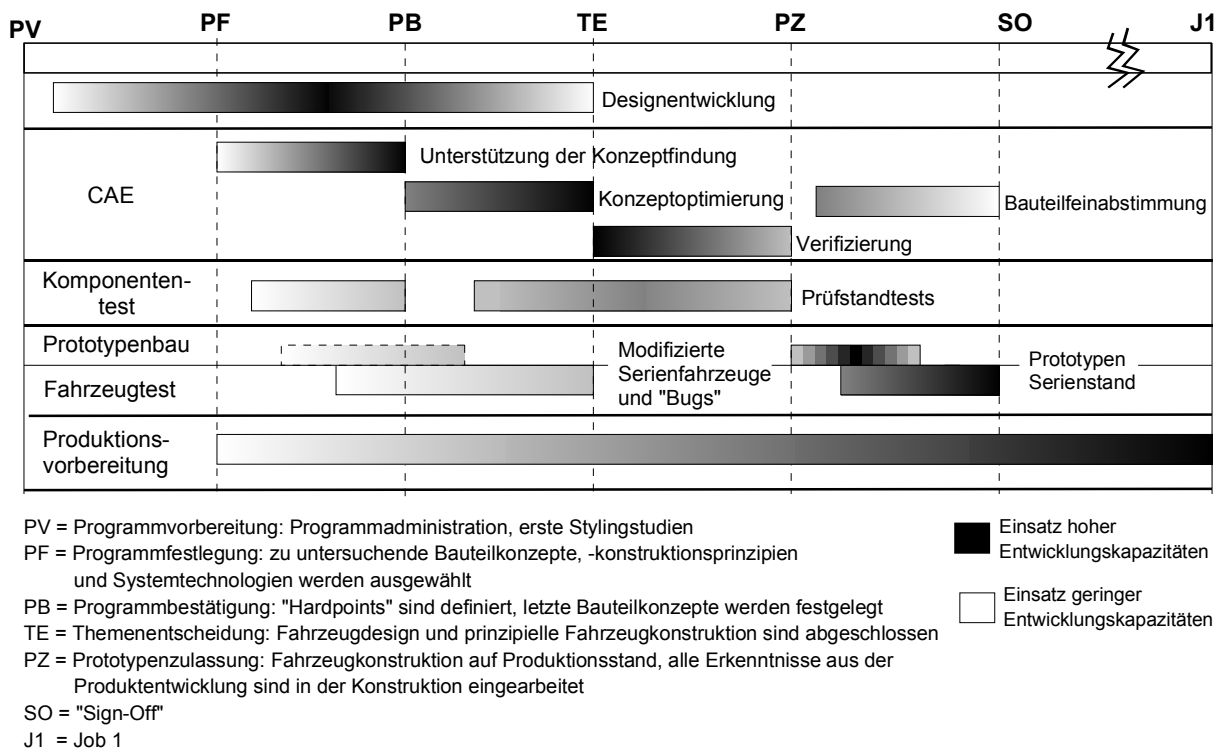


Abb. 4.7: Globaler Ablaufplan zur Entwicklung von Personenkraftwagen basierend auf [LOJ93]

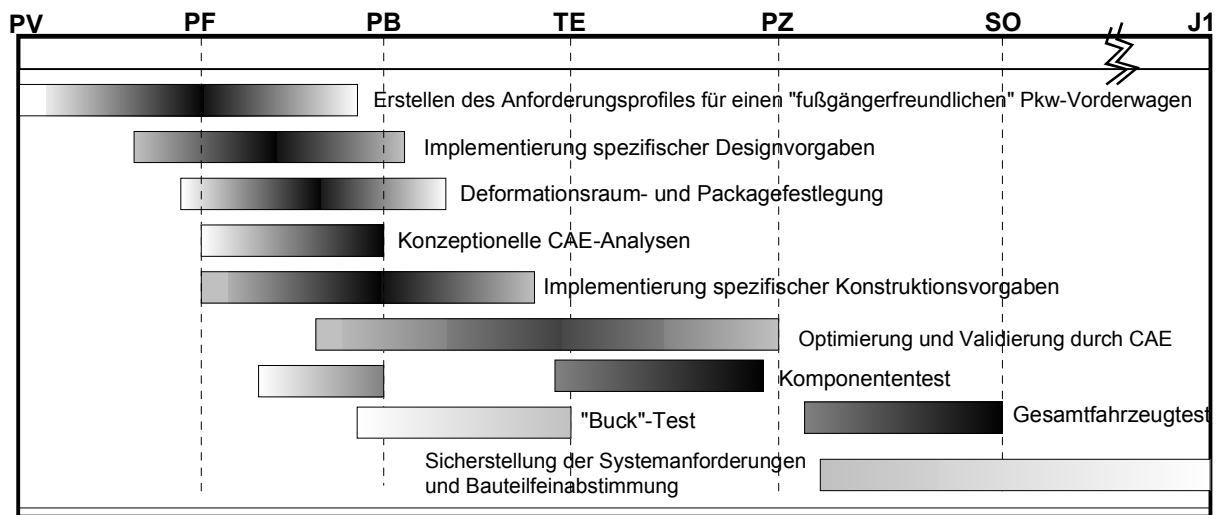


Abb 4.8: Entwicklungsablauf zur Gestaltung "fußgängerfreundlicher" Pkw-Vorderwagen

Da bei der Definition von Fußgängerschutzmaßnahmen – besonders bei permanenten, starren Systemen - eine direkte Einflussnahme auf das Fahrzeugdesign berücksichtigt werden muss, lassen sich vier Erfüllungsebenen für das Fahrzeuganforderungsprofil unterscheiden (Abb. 4.9).

Fußgängerschutzmaßnahmen	Mit Einfluss auf andere Anforderungen	Ohne Einfluss auf andere Anforderungen
Mit Einfluss auf das Fahrzeugdesign	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zusätzlicher Stoßstangenspoiler</li> <li>- Erhöhte Motorhaubenkontur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Optimierte Haubenöffnungslinie</li> <li>- Verdeckte Scheibenwischerachsen</li> </ul>
Ohne Einfluss auf das Fahrzeugdesign	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Optimiertes Motorraumpackage</li> <li>- Schaumstoffstoßfängersystem</li> <li>- Energieabsorbierende Strukturteile im vorderen und hinteren Haubenbereich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Obere Federbeinbefestigung in flacher Bauweise</li> <li>- Optimiertes Haubeninnenblech</li> <li>- Optimierte Lage der oberen Längsträger</li> </ul>

Abb 4.9: Lastenhefterweiterung durch Fußgängerschutzmaßnahmen in 4 Erfüllungsebenen

Während der Erstellung des Lastenhefts müssen entsprechende Kostenerhöhungen sowie Einschränkungen anderer Anforderungen zu Gunsten eines passiven Fußgängerschutzes berücksichtigt werden. Fast zeitgleich mit der Erstellung des Fahrzeuganforderungsprofils erfolgt die Implementierung der relevanten Designvorgaben sowie die Ermittlung der Deformationsfreiraumzonen und des Packages der Motorraumeinbauteile.

Von der Konzeptphase bis zur Optimierung der gewählten Konzepte werden Bauteile und Bauteilgruppen nach den von den Impaktoren geforderten Deformationscharakteristiken entwickelt. In der Konzeptionsphase werden Bauteilanforderungen in definierte Konstruktionsparameter umgesetzt. In der Optimierungsphase werden diese auf konkrete Werte festgelegt. Der Konstruktionsablauf wird dabei durch CAE-Analysen nach der FE-Methode bestimmt und durch Komponenten- und "Bug"-tests unterstützt. Das Fertigen und anschließende Testen der Prototypenteile wird hierfür auf relevante Bereiche reduziert (vgl. auch [WIS89]). Die auf diese Weise durchgeführten Testreihen dienen vorrangig der Bestätigung der CAE-Ergebnisse ([Abb 4.10](#)). Im "theoretischen" Idealfall stimmen Berechnungsvorhersagen und Testergebnisse überein. In der Praxis können diese Testergebnisse als Kontrollinstanz verstanden werden, welche einen Abgleich der CAE-Modelle und Berechnungsannahmen mit der Testsituation ermöglichen. Ein Aufgreifen der Iterationsschleife in die analytische Optimierung liefert erneut Konstruktionsparameter mit verbesserter Aussagequalität. Für die Endphase der Entwicklung wird angestrebt, Gesamtfahrzeuge lediglich für die notwendigen Zertifizierungs- und Homologierungstests zu verwenden.

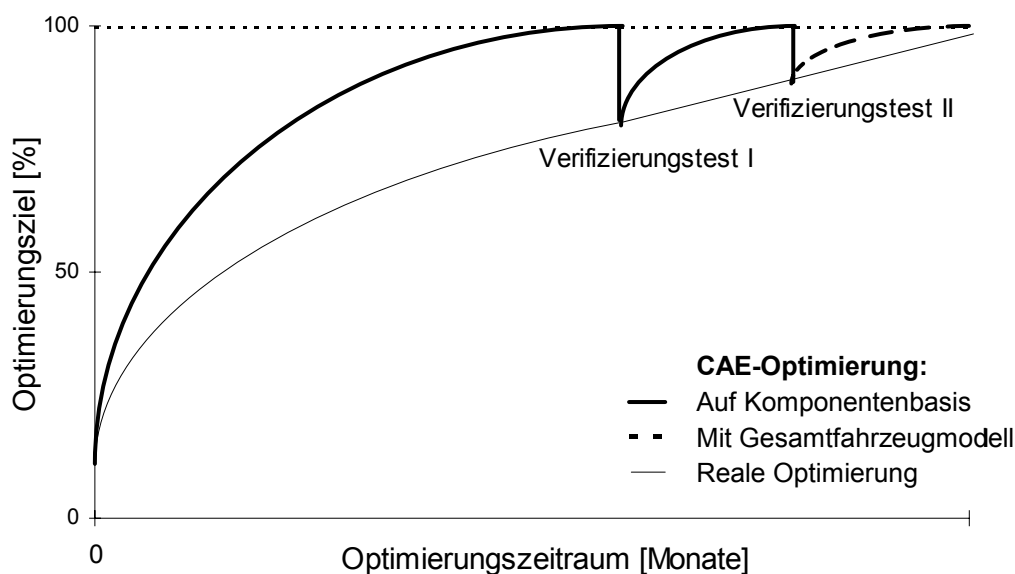


Abb 4.10: Prinzipieller, interaktiver Optimierungsprozess

Der Entwicklungsablauf mit den einzelnen Entwicklungsaktivitäten muss dabei folgende Anforderungen erfüllen:

- => Unterstützung einer zunehmenden Verkürzung von Produktentwicklungszyklen
- => Erfüllung der Fußgängerschutzanforderungen aller Einzelsysteme
- => Minimierung der Einflussnahme auf die übrigen Fahrzeuganforderungen.

Für die einzelnen Entwicklungsaktivitäten wird daher die Existenz entsprechender Werkzeuge und Methoden gefordert. Diese können entweder aus bereits bekannten Werkzeugen abgeleitet und weiterentwickelt werden, oder sie müssen komplett neu für die spezifischen Aktivitäten entwickelt werden. In [Abb. 4.11](#) werden für die einzelnen Entwicklungsaktivitäten aus [Abb 4.8](#) die entsprechenden Werkzeuge und Methoden sowie deren Einsatz und Nutzen vorgestellt.

Nach Wissen des Autors wurden bis heute weder ein CAE-Verfahren zur automatischen Generierung der Referenzlinien, der Impaktoraufprallbereiche und –eindringzonen, noch ein Substitutionsprüfstand für Pkw-Vorderwagen, mit dem Verwendungsziel der Reduzierung des Vorderwagens auf beim Fußgängeraufprall betroffene Bauteilgruppen, vorgestellt. Die im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelten Werkzeuge für den Komponentenversuch sowie für die Deformationsraum- und Packageauslegung verstehen sich als Bindeglied zwischen den bekannten Werkzeugen und Methoden. Sie ergänzen somit den zukünftigen Entwicklungsablauf zur Gestaltung "fußgängerfreundlicher" Pkw-Vorderwagen.

Entwicklungsaktivität	Werkzeug und Methode	Einsatz und Nutzen
Designentwicklung	Designrichtlinien	Vorgabe geometrischer und funktionaler Parameter für die Außenhautkontur
Deformationsraum und Packagefestlegung	PILU ("Pedestrian Impaktor Location Utility")	Automatische Generierung der Referenzlinien, der Impaktoraufprallbereiche und –eindringzonen
Konzeptunterstützung durch CAE	Vereinfachte FEM-Impaktor-Modelle und -Methoden	Gewinnung qualitativer Aussagen zur Konzeptbeurteilung mittels 'handlicher' und rechenzeiteffizienter Modelle
Konstruktionsfestlegung	Konstruktionsrichtlinien	Vorgabe geometrischer und funktionaler Parameter und Prinzipien für Bauteile und Bauteilgruppen
Optimierung und Verifikation durch CAE	Detailgetreue FEM-Impaktor- und Bauteilmodelle mit Methodik	Detaillierte Untersuchungen an Bauteilen und Bauteilgruppen mit quantitativem Aussagewert
Komponententest	Substitutionsprüfstand für Pkw-Vorderwagen ("Ped-Prot"-Testvorrichtung)	Reduktion der zu prüfenden Fahrzeugbereiche auf relevante Bauteilgruppen oder Einzelkomponenten

Abb 4.11: Werkzeuge und Methoden und deren Einsatz und Nutzen zur Gestaltung "fußgängerfreundlicher" Pkw-Vorderwagen

Im folgenden werden bekannte Entwicklungswerkzeuge und -methoden für die Design- und Konstruktionsphasen sowie für die analytischen Entwicklungsstufen vorgestellt.

## **5 Bekannte Entwicklungswerkzeuge zur Gestaltung “fußgängerfreundlicher” Pkw-Vorderwagen**

Als bekannte Entwicklungswerkzeuge werden hier Werkzeuge, Richtlinien und Methoden vorgestellt, die sich mit der Beurteilung und Entwicklung passiver Fußgängerschutzmaßnahmen beschäftigen und sich in der Anwendung bereits etabliert haben. Ihr Entwicklungsstand kann als “fortgeschritten” bezeichnet werden.

Als grundsätzliches Entwicklungswerkzeug verstehen sich die Prüfpaktoren mit entsprechenden Prüfvorschriften (vgl. Kap. 3.2.2). Erst durch ihre Anwendung lässt sich der Einsatzzweck anderer Werkzeuge konkretisieren.

### **5.1 Designrichtlinien**

Von den Designrichtlinien wird bei der Ausarbeitung des Stylingmodells lediglich Gebrauch gemacht, wenn entsprechende Vorgaben im Fahrzeuglastenheft eine Einflussnahme auf das Fahrzeugdesign zulassen (vgl. auch Abb. 4.9). Die im nachfolgenden aufgeführten geometrischen Vorgaben verstehen sich als restriktive Stylingvorgaben. Sie sind nur in einem engen Bereich veränderbar.

Durch sie wird die Voraussetzung geschaffen, passive Fußgängerschutzmaßnahmen einzubinden, welche nach optimalen Energieabsorptionsaspekten ausgelegt werden. Erst durch die strukturelle Optimierung der Außenhautteile und der darunter befindlichen Bauteile kommt der Nutzen der Designmodifikationen zum Tragen.

Die Designrichtlinien zur Gestaltung “fußgängerfreundlicher” Pkw-Vorderwagen lassen sich in form- und detailimmanente Designvorschriften unterteilen und erstrecken sich über den gesamten Vorderwagen. Bei formimmanenten Designvorgaben werden großflächige Außenkonturflächen vom Fahrzeugdesign gefordert. Bei detailimmanenten Designvorgaben werden lediglich einzelne Fahrzeugausstattungsmerkmale vorgegeben.

Sowohl für form- als auch für detailimmanente Designvorgaben kann festgestellt werden, dass “weiche” und “großflächige” Radien und Übergänge am Vorderwagen die Folgeerscheinungen eines Fußgängeraufpralls positiv beeinflussen.

#### **5.1.1 Detailimmanente Designvorgaben**

Um den Fußgängerkopfaufprall zu entschärfen, können drei detailbezogene Designvorgaben Berücksichtigung finden (Abb. 5.1). Diese Designlösungen haben ihre Anwendbarkeit bei Serienfahrzeugen sowohl unter stilistischen Aspekten als auch aus funktionaler Sicht bereits unter Beweis gestellt. Ihre positiven Auswirkungen auf den Fußgängeraufprall sind



im Vergleich zu formimmanenten Designvorgaben gering. Sie decken lediglich kleine Bereiche des Vorderwagens ab.

Design-Beschreibung	Positive Auswirkungen	Negative Auswirkungen
Verlängerung der Motorhaube über die Scheibenwischerachse	<b>auf den Kopfaufprall:</b> 1) Verteilung der Flächenpressung beim Kontakt Motorhaube/Scheibenwischerachse 2) Energieabsorption durch die Motorhaubenstruktur	1) Einschränkung der unteren Sichtfeldbegrenzung möglich 2) Vergrößerung des zu testenden Motorhaubenbereichs durch die Verlagerung der hinteren Referenzlinie gemäß III/502/96EN (vgl. auch Abb. 5.5)
Auslegung der Haubenöffnungslinie nach der Kotflügelkontur (Abb. 5.2)	<b>auf den Kopfaufprall:</b> Reduzierung der Deformationssteifigkeit durch Verlagerung des steifen, resp. vertikalen Kotflügelflansches	1) Öffnungslinienauslauf zur A-Säule gestaltet sich restriktiver 2) Öffnungskinetik erfordert u.U. aufwendigere Scharniere 3) Spaltmaß der Haubenöffnungslinie wird in einen visuell sensiblen Bereich verlegt
Abschlepphaken außerhalb der Deformationszone (z.B. Einschraubblösungen)	<b>auf den Beinaufprall:</b> Kein harter Kontakt mit dem vorstehenden Abschlepphaken	1) Aufbau wird komplexer 2) U.U. schlechtere Zugänglichkeit zum Abschlepphaken

Abb. 5.1: Detailimmanente Designrichtlinien und deren Auswirkungen

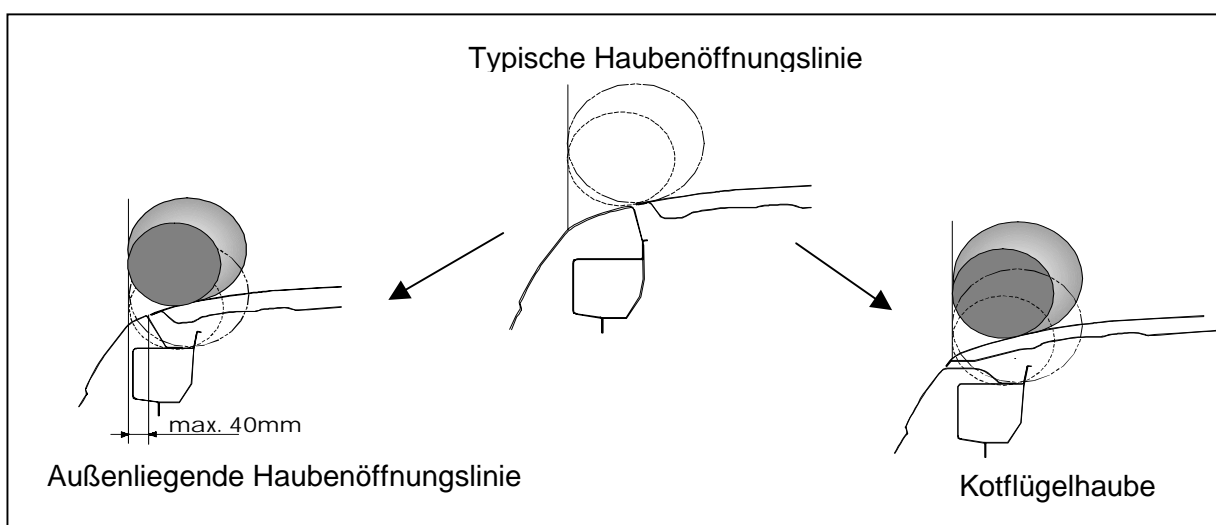


Abb. 5.2: Optimale Lagen der seitlichen Haubenöffnungslinie

### 5.1.2 Formimmanente Designvorgaben

Bei den formimmanenten Designrestriktionen werden größere Bereiche von stilistischen Flächen oder Modellvolumen vorgegeben. Sie lassen sich entsprechend der Fußgängerimpaktoren in die Bereiche "Spoiler-Stoßfänger", "Haubenvorderkante" und "Motorhaube/Kotflügel" unterteilen. Eine konsequente Anwendung dieser Designrestriktionen kann bisher an keinem Serienfahrzeug beobachtet werden.

#### 5.1.2.1 Geometrische Stoßfänger- und Spoilerparameter für den Beinaufprall

Analytische und experimentelle Untersuchungen für die Außenkonturparameter von Stoßfänger und Stoßstangenspoiler werden in [STA98], [GRO89], [HUL00], [BRO98] vorgestellt (Abb. 5.3). Die geometrischen Parameter nehmen im Wesentlichen Einfluss auf die Biegung im Gelenk und lassen sich durch die Einbindung eines Stoßstangenspoilers charakterisieren.

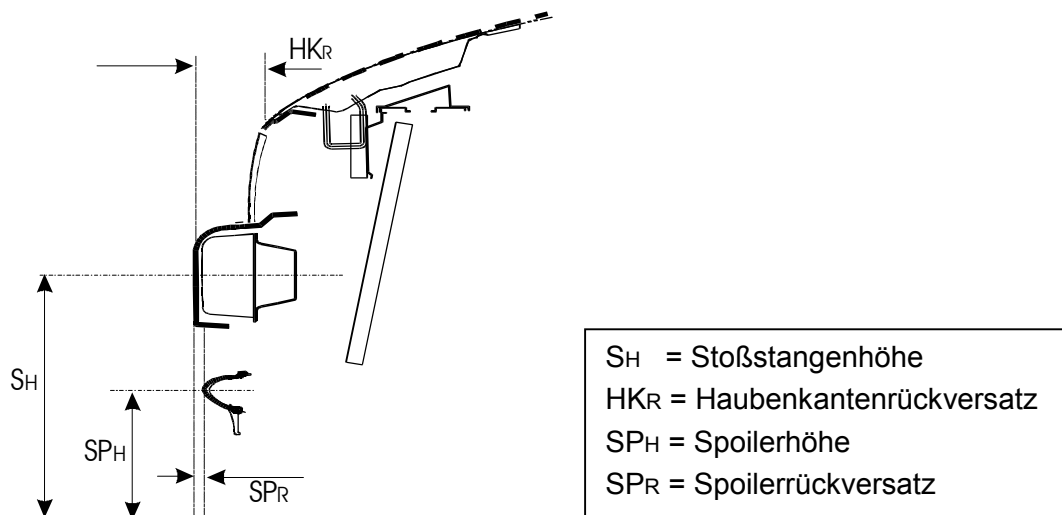


Abb. 5.3: "Fußgängerfreundliche" Stoßfänger-Spoilergeometrie - Darstellung im Mittelschnitt

Unter Berücksichtigung tendenzieller Werteangaben können dabei folgende Daten zusammengefasst werden :

=> Die optimale Höhe des Stoßfängers ( $S_H$ ) über der Bodenaufstandsfläche beträgt ca. 420 mm. Eine niedrigere Höhe kann als vorteilhaft für die Winkelreduzierung angesehen werden, kompromittiert u.U. andere, gesetzlich geregelte Stoßfängeranforderungen.

=> Der Haubenkantenrückversatz ( $HK_R$ ) sollte so gering wie möglich sein.

=> Ein notwendiger Stoßstangenspoiler mit Deformationscharakteristik (vgl. Kap 5.2) sollte möglichst nahe zum Bodenaufstand positioniert werden. Es ist dabei ein möglichst niedriger Spoilerrückversatz ( $SP_R$ ) anzustreben. Vorteilhaft ist ein Spoilerdesign, welches auf gleicher Ebene mit der Stoßstangenvorderkante liegt.

Für die hier vorgestellten Parameter gilt, dass sie weitestgehend konstant über die Fahrzeugbreite verlaufen. Sie nehmen daher besonderen Einfluss auf das stilistische Gesicht des Fahrzeugs in perspektivischer Ansicht.

### 5.1.2.2 Geometrische Haubenvorderkantenparameter für den Hüftaufprall

Ziel der geometrischen Auslegung ist es, die Haubenvorderkantenlage so zu wählen, dass die biomechanischen Grenzwerte der Hüfte bereits bei geringem Deformationsweg eingehalten werden. Dies wird durch die Einleitung einer niedrigen Impaktorenergie (vgl. auch Kap. 6.1.2) erreicht. In [KEG96] und [WG1798] werden die Zusammenhänge zwischen Aufprallgeschwindigkeit, -winkel, Impaktormasse und der Lage der Haubenvorderkante festgelegt. Die Bereiche der kinetischen Impaktorenergie - als Funktion der Hüftaufprallgeschwindigkeit und der Impaktormasse - können daraus ermittelt werden (Abb. 5.4). "Pkw I" und "Pkw II" geben repräsentativ für zwei Serienfahrzeuge die Lage der Haubenvorderkante über die gesamte Fahrzeugbreite wieder.

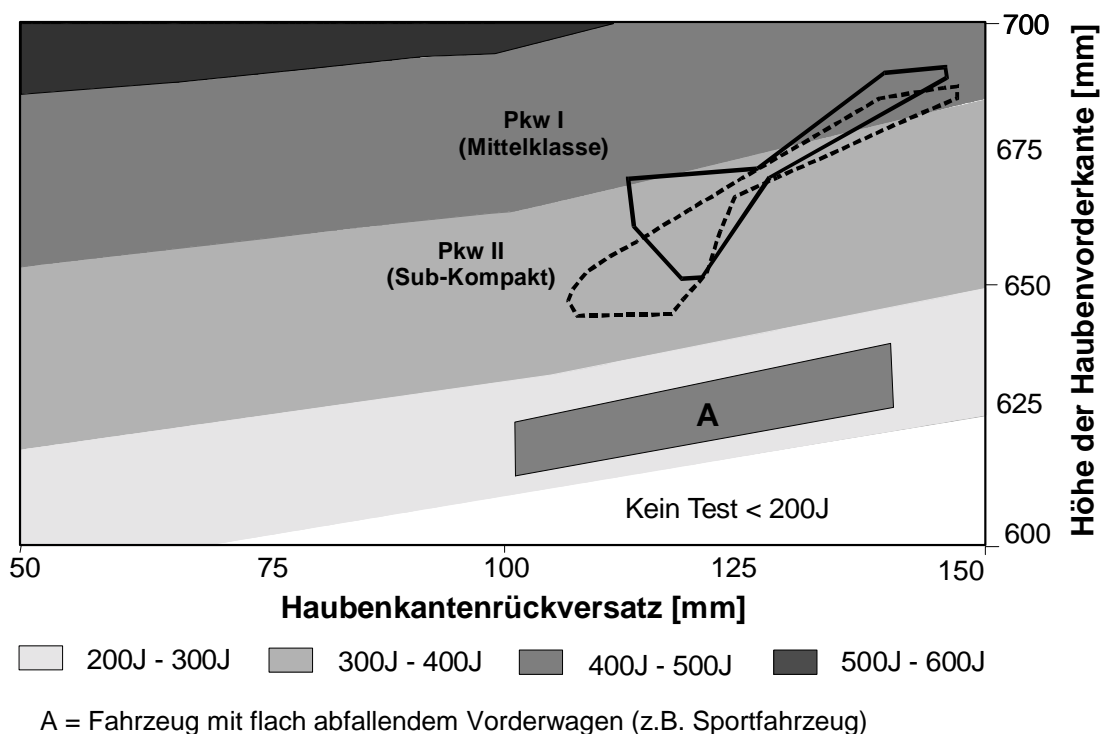


Abb. 5.4: Einfluss der Haubenvorderkantenlage auf die kinetische Hüftimpaktorenergie

Angestrebt wird eine möglichst tiefe Anordnung der Haubenvorderkante und ein hoher Haubenkantenrückversatz. Für bestimmte Fahrzeugtypen (z.B.: Sportfahrzeuge mit flach abfallendem Vorderwagen) lässt sich ein praktikabler Bereich der Haubenvorderkantenhöhe von 615 - 640 mm und ein Haubenkantenrückversatz von 100 - 140 mm (Bereich A) abschätzen. Auch hier ist ein konstanter Verlauf über die Fahrzeugbreite anzustreben.

### 5.1.2.3 Konturfläche von Motorhaube und Kotflügel für den Kopfaufprall

Die Vielfalt von Fahrzeugvorderwagen und Kombinationen von Motorraumeinbauteilen lassen hier keine konkrete Aussage zu. Es kann allgemein festgestellt werden, dass unter Berücksichtigung der minimalen Deformationsfreiräume ein zum Scheibenbereich zunehmendes Motorhauben- und Kotflügelprofil vorteilhaft ist (Abb. 5.5). Die maximal zulässige hintere Haubenhöhe sowie die Vorderwagenbombierung werden dabei durch die untere Sichtfeldbegrenzung vorgegeben.

### 5.1.3 Anwendung der Designrichtlinien an einem Pkw-Vorderwagen

Bei der Anwendung der Designrichtlinien nehmen insbesondere die formimmanenten Designänderungen hohen Einfluss auf das gesamte Erscheinungsbild und den übrigen Anforderungskatalog des Fahrzeugs.

Abb. 5.5 zeigt einen Mittelschnitt durch ein Mittelklassefahrzeug, auf welches die Designrichtlinien angewendet werden.

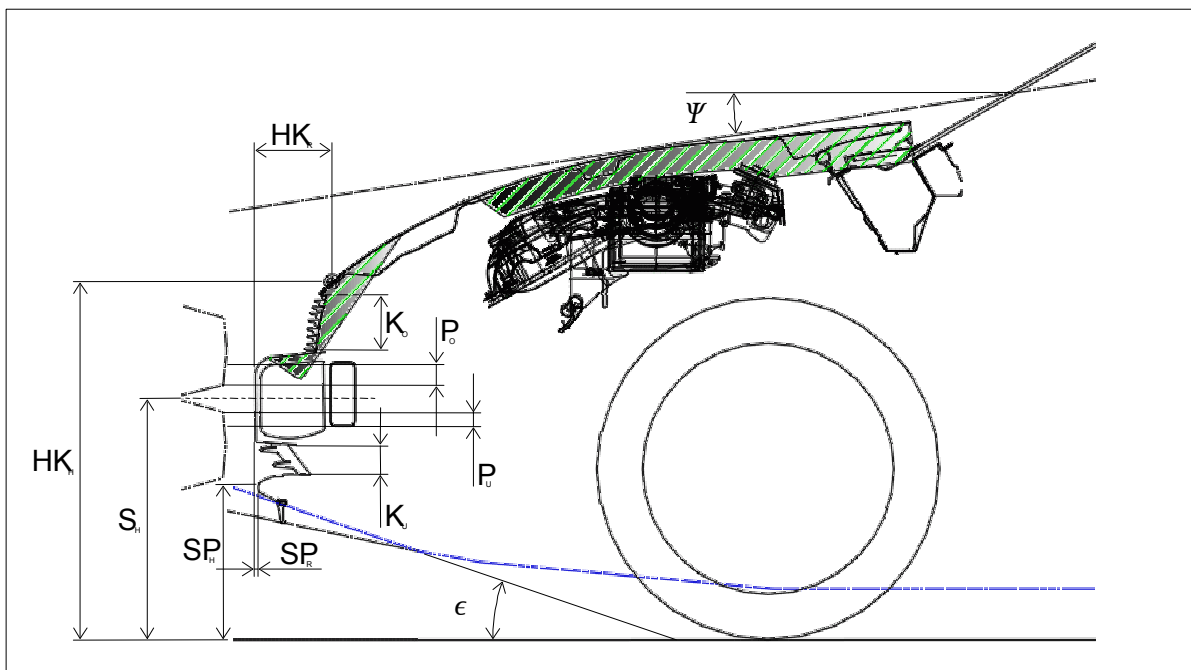


Abb. 5.5: Angewandte Designrichtlinien an einem Fahrzeug der Mittelklasse

Der Einfluss auf die geforderten minimalen Deformationsfreiräume (vgl. Kap. 6.1), auf die Sichtfeldbegrenzung, den Böschungswinkel und die Kühleröffnungen wird zwischen designmodifiziertem, „fußgängerfreundlichem“ Fahrzeug (FFF) und Originalfahrzeug (OF) verglichen. Die einzelnen geometrischen Parameter und Einflussfaktoren können für die Fahrzeuge gegenübergestellt werden (Abb. 5.6).

Parameter	OF	FFF	Einflussfaktor	OF	FFF
Spoilerhöhe (SP <sub>H</sub> ) [mm]	256	270	Böschungswinkel ( $\varepsilon$ ) [°]	33	26
Spoilerrückversatz (SP <sub>R</sub> ) [mm]	79	0	Sichtfeldwinkel ( $\psi$ ) [°]	9,7	8,6
Stoßstangenhöhe (S <sub>H</sub> ) [mm]	435	420	Kühleröffnung oben (K <sub>o</sub> ) [mm]	105	95
Haubenkantenhöhe (HK <sub>H</sub> ) [mm]	672	635	Kühleröffnung unten (K <sub>u</sub> )	75	53
Haubenkantenrückvers. (HK <sub>R</sub> )	107	135	Pendelschlagüberlap. (P <sub>o/u</sub> )	38/25	38/25

OF = Originalfahrzeug

FFF = Modifiziertes „fußgängerfreundliches“ Fahrzeug

Abb. 5.6: Geometrische Parameter und Einflussfaktoren von Originalfahrzeug und modifiziertem „fußgängerfreundlichem“ Fahrzeug

Es gilt, die Querschnittsänderungen entlang der Fahrzeugbreite möglichst gering zu halten. Für die Pendelschlaghöhen der Bagatellschadenanforderungen von Stoßfängern wird eine gleichbleibende Überlappung eingehalten.

Die Anwendung der Designrichtlinien unter Berücksichtigung aller Einbauteile erfolgt in interaktiven Prozessschritten. Die Konkretisierung der geometrischen Parameter ist dabei für das jeweilige Fahrzeugdesign und den Fahrzeugtyp lediglich innerhalb geringer Bereiche individuell veränderbar. Somit muss unabhängig vom Fahrzeugtyp und der stilistischen Intention bei Anwendung der Designrichtlinien eine „Vereinheitlichung“ der Fahrzeugvorderwagen in Kauf genommen werden.

## 5.2 Konstruktionsrichtlinien für den „passiven“ Fußgängerschutz

Unter Konstruktionsrichtlinien für passive Fußgängerschutzmaßnahmen versteht man technische Anleitungen zur Umsetzung von Bauteilkonstruktionen als Einzelbauteile oder als Bauteilgruppen, welche die Kompatibilität des Pkw-Vorderwagens für einen Fußgängeraufprall verbessern. Es kann prinzipiell zwischen konzeptionellen sowie detailorientierten Konstruktionsrichtlinien unterschieden werden. Konzeptionelle Konstruktionsrichtlinien beschreiben die Umsetzung sowohl lokaler als auch globaler Bauteilkonzepte. Sie betreffen in der Regel ganze Bauteilgruppen sowie deren geometrische Abstimmung in den vorgegebenen Deformationsraumzonen. Detailorientierte Konstruktionsrichtlinien hingegen bauen auf den vorgegebenen Bauteilkonzepten auf. Die Bauteilgeometrie wird durch die Beschreibung der einzelnen Konstruktionsparameter konkretisiert. Unterschiedliche Randbedingungen können bei gleichen Konzeptlösungen unterschiedliche Konstruktionsparameter erfordern.

### 5.2.1 Konzeptionelle Konstruktionsrichtlinien

Nachfolgend werden konzeptionelle Konstruktionsrichtlinien für permanente, starre Systeme<sup>1</sup> vorgestellt.

Konzeptionell lässt sich der gesamte Kopfaufprallbereich in plastische und freideformierbare Zonen sowie einen entsprechenden Übergangsbereich unterteilen (Abb. 5.7). Die plastischen Aufprallbereiche zeichnen sich durch das interaktive Mitwirken mehrerer Bauteilgruppen am Deformationsvorgang aus. Die einzelnen Deformationscharakteristiken  $F_1(t)$ ,  $F_2(t)$ ,  $F_3(t)$ ,  $F_x(t)$  der in den plastischen Bereichen liegenden Bauteile  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$ ,  $Z_x$  addieren sich gesamtheitlich zu einem weitestgehend konstanten Kurvenverlauf  $F_{ges}(t)$ . Verschiedene konzeptionelle Lösungsansätze für den plastischen Deformationsbereich werden auch in Abb. 3.9 vorgestellt.

Die freideformierbare Zone wird fast ausschließlich durch die globale Deformation der Motorhaube selbst bestimmt. Hier ist eine möglichst homogene Verteilung von Masse und Steifigkeit anzustreben, wie sie durch den Autor in [ROT99] aber auch in [SAK98] vorgestellt wird (Abb. 5.8). Ziel ist es, über eine breite Aufprallfläche Ergebnisse für den HPC-Wert sowie die maximale Verzögerung  $g_{Kmax}$  zu erhalten, welche innerhalb eines engen Toleranzbandes  $r_{HPC}$  und  $r_{gKmax}$  um die Zielwerte ( $HPC < 1000$  und  $g_{Kmax}$  [150g, 220g]) liegen. Um den freien Deformationsraum dabei weitestgehend zu erhalten, wird eine geringe Höhe des Haubenquerschnitts angestrebt.

---

<sup>1</sup> Die Verwendung variabler Fußgängerschutzkonzepte (Kap 3.1.2) wird aus den in Kap.4.2 erwähnten Gründen nicht berücksichtigt.

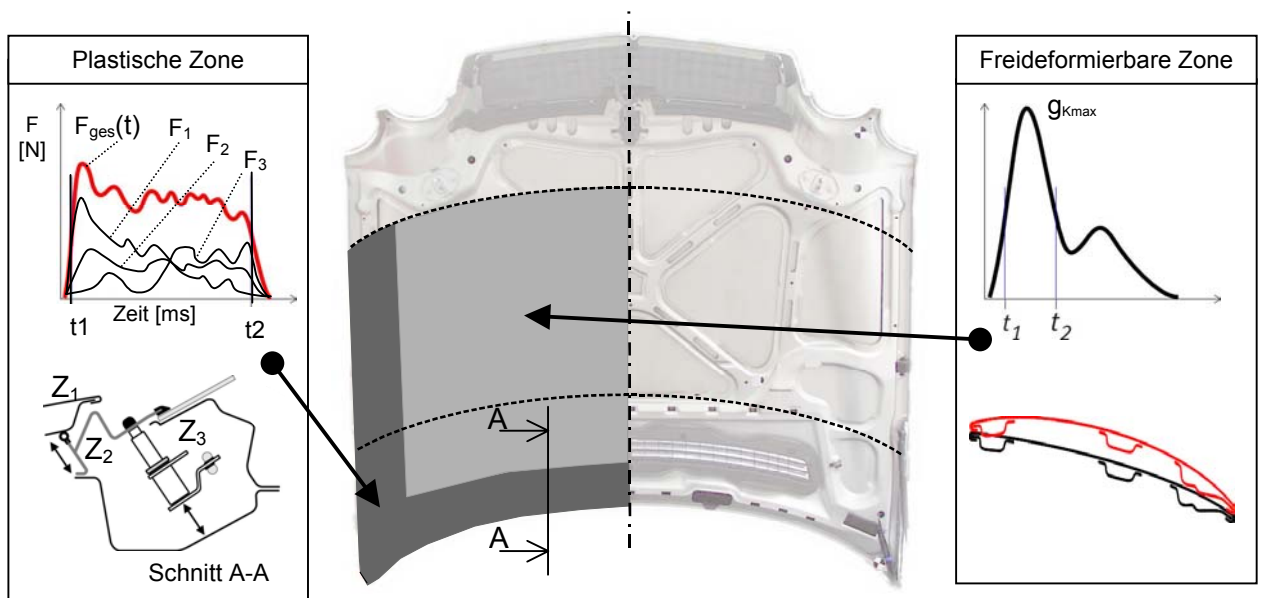


Abb. 5.7: Aufteilung der Kopfaufprallbereiche in plastische und freie Deformationszonen

Den unterschiedlichen Massen für Kind- und Erwachsenen Kopf wird durch unterschiedlich steife Aufprallzonen Rechnung getragen [YOS99]. Bauteile, welche im Deformationsbereich der freideformierbaren Zone liegen, dürfen - im Gegensatz zu den plastischen Deformationsbereichen - nur mit einer sehr niedrigen Deformationssteifigkeit an der Gesamtdeformation teilnehmen.

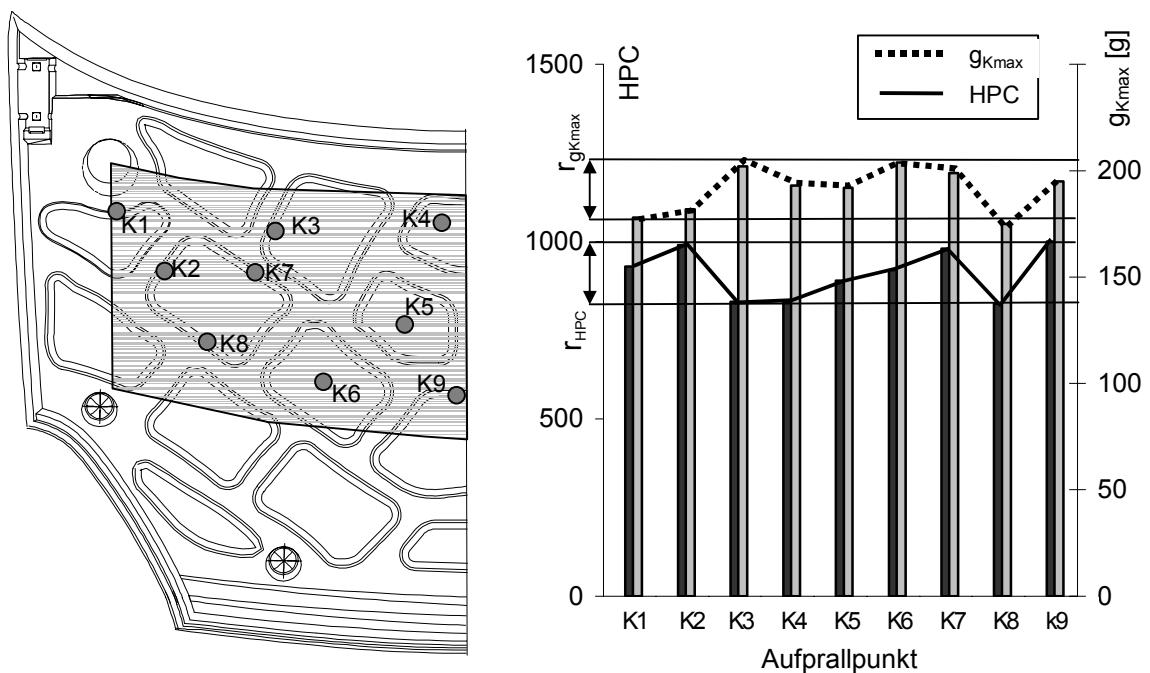


Abb. 5.8: Massen- und steifigkeitshomogenes Motorhaubenkonzept [ROT99]

Der Hüftaufprallbereich lässt sich konzeptionell in 2 Bereiche unterteilen:

- 1) Mittelbereiche ohne Scheinwerfer
- 2) Außenbereiche mit Scheinwerfer.

Über die gesamte Fahrzeugbreite ist die Motorhaube sowie das Frontend-Modul vom Impaktoraufprall betroffen. Entsprechend der beiden Bereiche bestimmt der Frontscheinwerfer oder im Mittelbereich das Schließsystem maßgeblich den Deformationsverlauf. In Abb. 3.8 werden konzeptionelle Vorschläge für die Haubenkonstruktion sowie die deformationsoptimierte Auslegung der Frontscheinwerfer vorgestellt. Das i.d.R. sehr starre Schließsystem im Mittelbereich der Haube kann entweder als schwächer dimensioniertes Doppelschließsystem nach außen oder rückseitig an das Frontend-Modul – außerhalb des Deformationsraumes - angebracht werden. Bei bestimmten Fahrzeugkonturen nimmt der obere Bereich des Stoßfängers am Hüftaufprall teil und muss entsprechend deformationsweich ausgeführt werden. Die höchste positive Einflussnahme auf den Hüftaufprall erreicht man allerdings durch die optimale Wahl der Vorderwagen-Geometrieparameter (vgl. Abb.6.5).

Für den Beinaufprall konzentrieren sich die konzeptionellen Konstruktionsmaßnahmen auf die Bereitstellung abgestimmter Deformationselemente (vgl. auch Abb 6.8) in horizontaler Richtung zu Gunsten der Beinverzögerung sowie in vertikaler Richtung zu Gunsten der Biegung im Gelenk. Als horizontales Deformationselement ist die Verwendung eines Schaumstoffblockes hinreichend bekannt. Der Einsatz des sehr individuell einstellbaren Polyurethans [HUL00] oder sogar der Kombination verschiedener Schaumstoffe [KEL98] auch in Verbindung mit Aluminiumschäumen [SCI00], deuten ein zusätzliches Potential an. Eine praktikable Lösung zur Reduzierung der Unterschenkelrotation kann durch einen auf den Unterschenkelschwerpunkt abgestimmten Kraftverlauf in Form eines Spoilers mit abgestimmter Steifigkeit erreicht werden (Abb. 5.9).

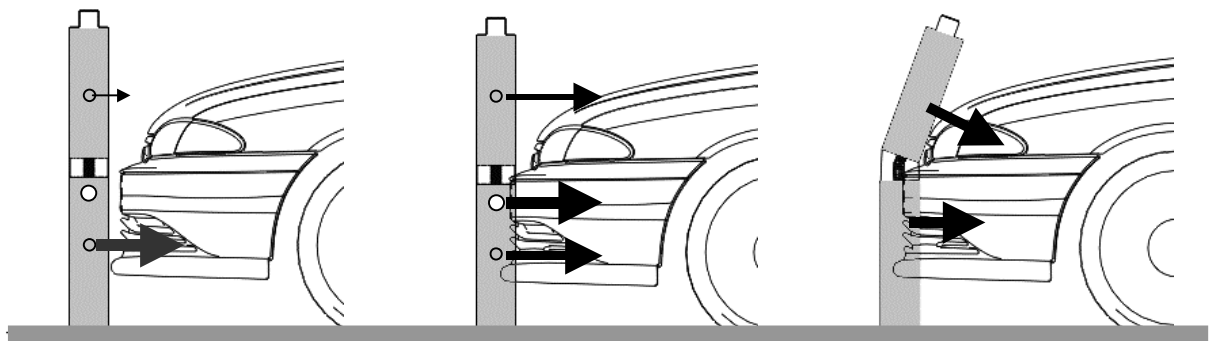


Abb. 5.9: Einflussnahme vorteilhafter Stoßfängerparameter auf die Biegung im Gelenk



Es wird eine möglichst tiefe Krafteinleitung unterhalb des Gesamtimpaktorschwerpunkts angestrebt. Konzeptionelle Lösungen für die Ausführung des Spoilers werden in Abb. 3.7 vorgestellt.

Eine theoretische, aber für viele Fahrzeugtypen wenig praktikable Maßnahme ist die Bereitstellung einer der Massenträgheit des Oberschenkels frühzeitig entgegenwirkenden Reaktionskraft. Dies lässt sich in Form einer Haubenkante auf Höhe des Oberschenkelschwerpunkts und eines in etwa gleicher Horizontalposition befindlichen hohen Stoßstangenprofils umsetzen. Allerdings wird durch einen hier geforderten geringen Haubenkantenrückversatz  $HK_R$  der Hüftaufprall negativ beeinflusst.

### 5.2.2 Detailorientierte Konstruktionsrichtlinien

Die detailorientierten Konstruktionsrichtlinien geben zumindest qualitative, idealerweise quantitative Aussagen zu den einzelnen Konstruktionsparametern des verwendeten Konzepts. Folgende Konstruktionsparameter sind für die einzelnen Bauteilgruppen der Impaktbereiche von Bedeutung:

- 1) Materialeigenschaften und Wandstärken
- 2) „Genauer“ Geometrieverlauf innerhalb eines vorgegebenen Bauraums
- 3) Verbindungsverfahren und Fügestellen.

Besonders bei der Festlegung der detaillierten Konstruktionsparameter ist der Einsatz analytischer Verfahren nach der Finiten Elemente Methode üblich.

### 5.3 Impaktormodelle und CAE-Methoden

Der während der Optimierungsphasen notwendige Einsatz von CAE-Verfahren nach der Finite Element Methode (FEM) setzt die Existenz von FEM-Impaktormodellen sowie CAE-Methoden voraus.

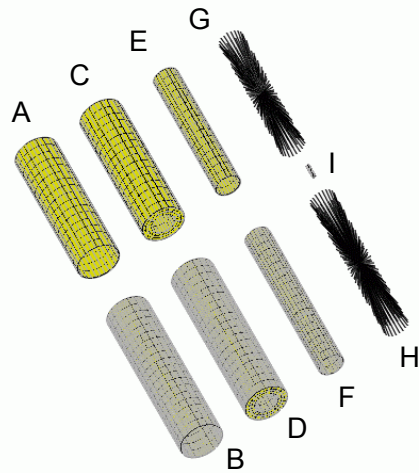
Die Impaktormodelle verstehen sich hierbei als Werkzeuge, welche dem Benutzer mit entsprechenden Anwendungsvorschriften zur Verfügung gestellt werden. Ein Eingriff in die interne Impaktormodell- und -datenstruktur wird vom Anwender nicht erwartet. Die CAE-Methoden beinhalten Richtlinien für die Erstellung der Modelle, für die Eingabe der Berechnungs- und Materialdaten sowie Hinweise für die Datenauswertung. Die CAE-Methodik versteht sich als „Leitfaden“ für den Benutzer. Sowohl für die Impaktormodelle als auch für Methoden kann somit folgendes, grundsätzliches Anforderungsprofil definiert werden:

- => hohe Aussagequalität durch verifizierte Modelle und Methoden
- => einfache Anwendung bei gleichzeitig hoher Rechenzeiteffizienz
- => Sicherstellung stabiler und reproduzierbarer Berechnungsabläufe.

#### 5.3.1 Impaktormodelle

Die FEM-Impaktoren (Abb. 5.10) basieren auf der Konstruktion des Bein-, Hüft- sowie der beiden Kopffimpaktoren aus Anhang II-B. Die relevanten Impaktorbauteile werden als separate Komponenten mit entsprechender Bauteilgeometrie sowie repräsentativen Materialdaten abgebildet [KON00], [CON94], [FRI99]. Für das Beinimpaktormodell ist durch Vernachlässigung der Gelenkverschiebung (vgl. auch Kap. 4.2) ein stabiler, unkomplizierter Beinimpaktor für Konzeptuntersuchungen bekannt geworden [STA98].

Einzelne Bauteile werden mit der Zielsetzung einer Minimierung der Modellgröße und nach entsprechendem Abgleich mit detaillierten Bauteilmodellen auf einfache Starrkörpermodelle reduziert. In den Kernkörpern befinden sich die vom Gesamtsystem abgeleiteten Informationen über die Masse, die Massenträgheitsmomente sowie die theoretischen Schwerpunkt- und Messwertaufnehmerkoordinaten. Die Knotengeometrie wird für die einzelnen Bauteilkomponenten so festgelegt, dass sie in den Kontaktbereichen zu angrenzenden Bauteilen übereinstimmen. Entsprechende Kontaktschnittstellen werden festgelegt sowie die Reibbedingungen zwischen den einzelnen Bauteilen während des Verifizierungsvorganges exakt quantifiziert.



Bein-Impaktor

**Haut (A & B)**

- Anisotropes Material (elastisch-orthotrop)
- Vereinfachung der Kontaktbedingungen
- Eingrenzung der Schaumstoffummantelung

**Schaumstoffummantelung (C&D)**

Elastisch-plastisches Materialverhalten basierend auf Testdaten

**Kernschale (E & F)**

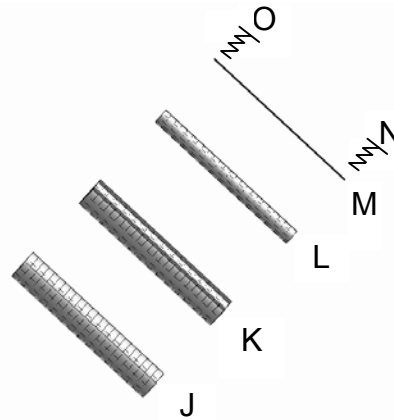
- Elastisches Material (Stahl)
- Vorrangig zur Visualisierung bei Animation

**Starrkörperkern (G & H)**

Enthält Masse, Schwerpunktinformationen und Massenträgheitsmomente

**Kniegelenk (I)**

- Ausgeführt als Federelement
- Elastisch-plastisches Materialverhalten nach empirisch ermittelter Testkurve
- Laterales Biegemoment als Freiheitsgrad



Hüft-Impaktor

**Haut (J)**

- Anisotropes Material (elastisch-orthotrop)
- Vereinfachung der Kontaktbedingungen
- Eingrenzung der Schaumstoffummantelung

**Schaumstoffummantelung (K)**

Visko-elastisches Materialverhalten basierend auf Testdaten

**Kernschale (L)**

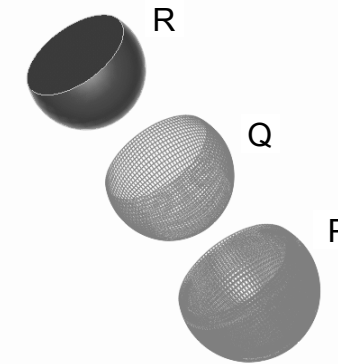
Elastisches Material

**Kernkörper (M)**

Zylindrisches Balkenelement zur Biegemomentenaufnahme

**Kernkörperverbindung (N&O)**

- Ausgeführt als Federelement
- Simulation der beiden Karftaufnehmer und der starren Impaktoraufnahmevorrichtung



Kopf-Impaktor

**Neoprenhaut (P)**

- Visko-elastisches Materialverhalten
- Vereinfachung der Kontaktbedingungen
- Eingrenzung der Schaumstoffummantelung

**Kernschale (Q)**

Elastisches Material

**Kernkörper (R)**

- Repräsentiert durch Starrkörper
- Enthält Masse, Schwerpunktinformationen und Massenträgheitsmomente

**Anmerkung:**

Kinder- und Erwachsenenimpaktor sind analog aufgebaut

Abb. 5.10: Prinzipielle Darstellung der CAE-Impaktormodelle

Die Aussagequalität der FEM-Impaktormodelle wird anhand von Testreihen überprüft. Hierfür werden die Impaktormodelle auf den im Richtlinienentwurf [KEG96] und [WG1798] vorgeschriebenen "Zertifizierungstest" abgeglichen. Die vorgeschriebenen Zertifizierungsvorrichtungen werden ebenfalls als idealisierte FEM-Modelle abgebildet. Die Impaktormodelle müssen innerhalb der vorgegebenen Toleranzfelder die Verifizierungstests erfüllen. Um die Aussagequalität bei Gesamtfahrzeugtests zu bestätigen, ist eine abschließende Verifizierung der FEM-Impaktoren mit einer Fahrzeugtestreihe durchzuführen.

Rückmeldungen aus praktischen Simulationsanwendungen sowie zunehmende Erkenntnisse aus experimentellen Untersuchungen nehmen interaktiv Einfluss auf die stetige Weiterentwicklung zu exakteren und einfacheren Impaktoren.

### 5.3.2 CAE-Methoden

Der Schwerpunkt bei der CAE-Methodik bezieht sich auf die Modellerstellung. Wesentliche Zielsetzung dabei ist es, die Modellgröße und dessen Inhalt so zu entwickeln, daß bei minimaler Modellgröße eine bestmögliche Aussagequalität erreicht wird (Abb. 5.11). Die CAE-Methodik greift hierbei unterstützend ein.

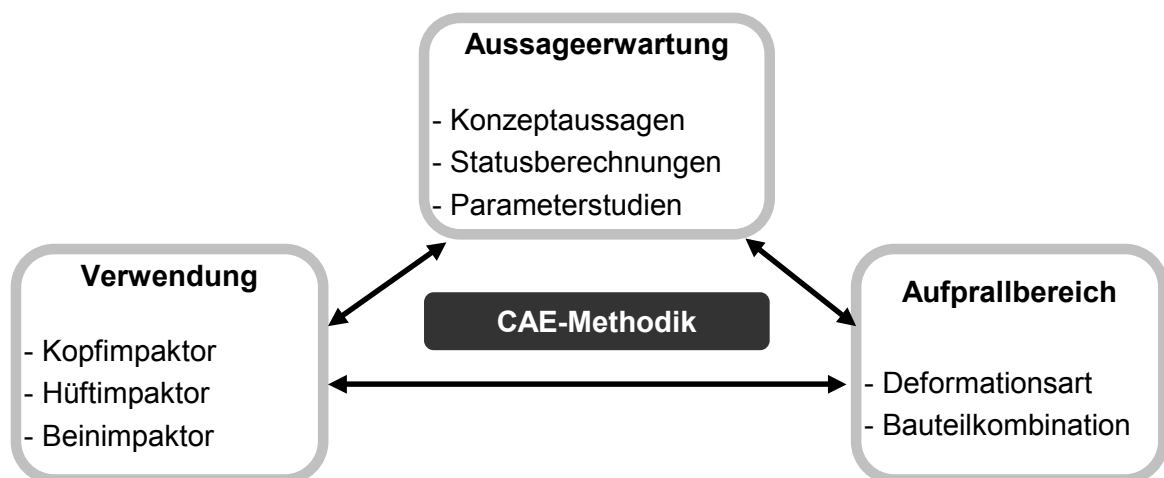


Abb. 5.11: Modellvielfaltbestimmende Einflussfaktoren

Schon die Auswahl der zu modellierenden Bauteilkombinationen für die einzelnen Aufprallbereiche bedarf besonderer Aufmerksamkeit. In Kap 7.3 werden für die einzelnen Impaktorbereiche Baugruppen mit entsprechenden Freischneidungen vorgestellt, welche mit guter Übereinstimmung das Verhalten im Gesamtfahrzeug reflektieren. Die direkte Verwendung von FEM-Modellen aus Gesamtcrashuntersuchungen ist wegen der mangelnden Detailtiefe der Komponenten für Fußgängerimpaktuntersuchungen ungeeignet. Es werden kleine Bauteile (z.B. Haubenaufschlagdämpfer), feine Konturen von Bauteilen (z.B. Prägung in Scharnierbügeln) sowie einfache Kunststoff- und Elastomerteile modelliert und

mit entsprechenden – häufig erst aus Tests zu bestimmenden - Materialdaten versehen [PHI99]. In [PHL99] wird ein Ansatz vorgestellt, nach dem einzelne Bauteilmodelle durch Komponententests verifiziert werden, um dann in einem Gesamtfahrzeugmodell eingebunden zu werden [HOM99]. Für den Kopfaufprall können spezielle Aussagen getroffen werden [OTU99], [CON94]:

- => Repräsentative Reibbedingungen zwischen Fahrzeugstruktur und Impaktoren sind individuell festzulegen.
- => Das haubenseitig befestigte Dämmaterial muss in den Modellen wirklichkeitsgetreu berücksichtigt werden.
- => Die Darstellung der Verbindung zwischen Haubenaußen- und Haubeninnenblech erfolgt nach experimentell ermittelten Testkurven der Klebmasse oder bei Konzeptmodellen als starre Verbindungselemente (Einfluss auf Verzögerungsverlauf durch Klebung ca. 10%).

Um aussagekräftige Rückmeldungen auf CAE-Analysen und deren Modellqualität zu erhalten, ist ein möglichst baldiger Abgleich zu Testergebnissen entweder auf Komponentenbasis oder zu Gesamtfahrzeugtests von großer Bedeutung.

## **6 „Pedestrian Impactor Location Utility (PILU)" - Ein Prognosewerkzeug für die Deformationsraum- und Packageauslegung**

Bereits während der Vorentwicklungsphase werden die im Lastenheft definierten Grundanforderungen in geometrische Design- und Konstruktionsvorschriften umgesetzt. Ein im Rahmen dieser Arbeit speziell entwickeltes CAE-Werkzeug ("Pedestrian Impactor Location Utility" oder PILU) unterstützt dabei die Einhaltung der Grundanforderungen zur Gestaltung "fußgängerfreundlicher" Pkw-Vorderwagen.

Die ersten Designstudien in digitaler Form eines neuen Fahrzeugmodells bieten die Ausgangsbasis für die Anwendung von PILU. Als Ausgabedaten werden automatisch Kontaktzonen auf der Fahrzeugkontur für die Bein-, Hüft- und Kopfpaktoren erzeugt. Anhand dieser Informationen können Bereiche (z.B. zwischen Hüftaufprall und Kinderkopfaufprall) identifiziert werden, welche außerhalb der kritischen Testzonen liegen und im weiteren Entwicklungsablauf unberücksichtigt bleiben.

Des Weiteren werden für die kritischen Aufprallbereiche Deformationszonen über die gesamte Vorderwagenkontur ermittelt. Als Basis dienen semi-empirische Eindringparameter. Die Wahl der Lage von Motorraumeinbauteilen wird durch die Definition dieser Freiräume unterstützt. Bereiche, in denen Motorraumeinbauteile innerhalb dieser Freiräume positioniert sind, werden als kritisch erkannt. Erste Abschätzungen über den Verlauf von Karosseriestrukturanordnungen können getroffen werden.

Je nach Erfüllungsgrad der einzelnen Bereiche (Kap. 4.2) können somit die für die weitere Entwicklung relevanten Zonen differenziert werden.

Durch das PILU werden folgende Entwicklungsschritte unterstützt:

- ⇒ Rückmeldung auf stilistische Maßnahmen für einen verbesserten, passiven Fußgängerschutz
- ⇒ Differenzierung zwischen relevanten und irrelevanten Außenkonturbereichen für die einzelnen Körperregionen
- ⇒ Festlegung von Deformationsfreiräumen, Einbaulagen von Motorraumeinbauteilen sowie von Fahrzeugstrukturteilen.

Mit diesen Informationen stehen die geometrischen Randbedingungen für die nachfolgende Konzeptionsphase der Bauteile zur Verfügung.

Das gesamte Werkzeug besteht aus einer Makro-Bibliothek, welche die Kommunikation mit der 3D-CAD-Software "PDGS" (Product Design Graphic System) übernimmt, und einer in der Programmiersprache "C" entwickelten Software, in der die eigentlichen Berechnungsroutinen implementiert sind.

Die semi-empirischen Deformationsbedingungen werden für den Benutzer als Standardvoreinstellungen bereitgestellt, können aber manuell verändert werden, um den individuellen Konstruktionszielen der einzelnen Fahrzeugprogramme zu entsprechen.

## 6.1 Semi-empirische Deformationsbedingungen

Als semi-empirische Deformationsbedingungen werden hier idealisierte Aussagen über das Deformationsverhalten der betroffenen Karosseriestrukturen sowie der Motorraumeinbauteile verstanden. Diese werden von theoretischen Betrachtungsweisen abgeleitet und durch Erkenntnisse aus realen Versuchsergebnissen ergänzt. Als Ausgangsbasis kommt das Prüfverfahren III/5021/96 EN und dessen Vorschriften zum Einsatz (vgl. Kap. 3.2.2).

### 6.1.1 Kopfaufprall

Für die HPC<sup>1</sup>-Wertbedingung ( $HPC \leq 1000$ ) des Kinder- und Erwachsenenkopfaufpralls lässt sich ein theoretischer Verzögerungsverlauf  $g_{Kt}(t)$  ([Abb. 6.1](#)) herleiten:

$$HPC^1 = \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} g_K(\tau) dt \right]_{\max}^{2,5} (t_2 - t_1) \leq 1000 \quad (t_2 - t_1) \leq 15ms \quad (6.1)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} g_K(\tau) dt \leq \left( \frac{1000}{(t_2 - t_1)} \right)^{0,4} (t_2 - t_1) = 15,85(t_2 - t_1)^{0,6}$$

$$g_K(t_2) - g_K(t_1) \leq 15,85 \times 0,6(t_2 - t_1)^{-0,4}$$

ergibt sich unter der Randbedingungen  $t_1=0$  und  $t_2 = t$

$$g_{Kt}(t) \leq 9,51 \cdot t^{-0,4} \quad (6.2)$$

---

<sup>1</sup> Die HPC-Wertbedingung ist von der HIC-Wertbedingung abgeleitet und unterscheidet sich lediglich in der Dauer des Zeitintervalles. Beim HIC gilt ein Intervall  $(t_2 - t_1) \leq 35ms$ .

Ältere Untersuchungen zum Fußgängerkopfaufprall (z.B. [Abb. 6.3](#)) beziehen sich i.d.R. auf das HIC.

Unter Berücksichtigung der Erdbeschleunigung sowie einer Kopfaufprallgeschwindigkeit von  $v_0 = 40 \text{ km/h}$  kann durch zweifache Integration von  $g_{kt}$  eine translatorische, theoretische Minimaleindringung in Aufprallrichtung von  $s_{kt} = 51,1 \text{ mm}$  ermittelt werden. Diese Eindringung ist masseunabhängig und gilt somit gleichermaßen für den Kinder- als auch den Erwachsenenkopf.

Die bei realen Fahrzeugtests beobachteten ähnlichen Kurven - i.B. im Mittelbereich der Motorhaube - verlaufen ähnlich der semi-empirischen Zielkurve  $g_{kse}(t)$  und sind im Wesentlichen durch folgende Charakteristika gekennzeichnet:

- => Anfangssteigung der Verzögerung  $g_{kse}(t)$  bis zum Zeitpunkt  $t_{max-se}$
- => Maximaler Verzögerungspeak  $g_{kse-max}(t_{max-se})$
- => Exponentieller Verzögerungsabfall nach dem Zeitpunkt  $t_{max-se}$

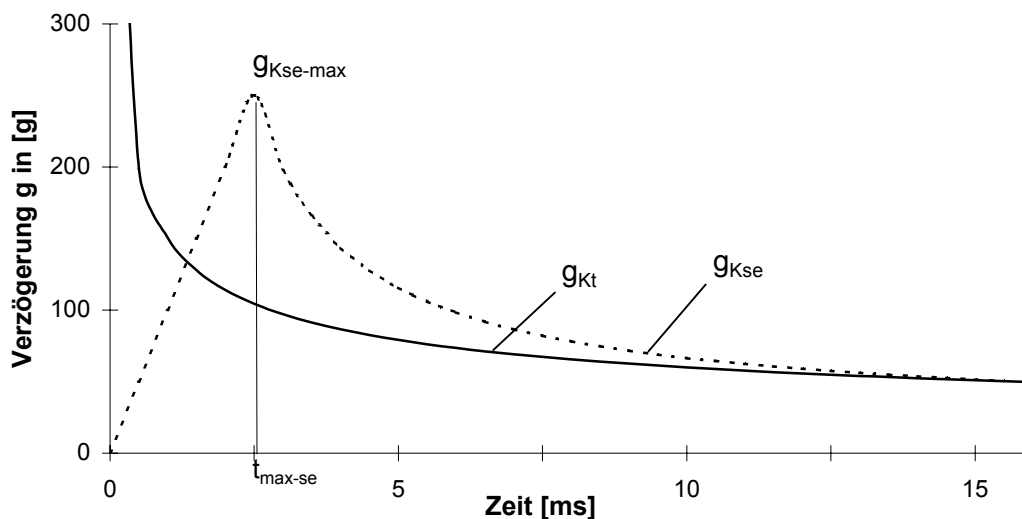


Abb.6.1: Theoretischer und prinzipieller semi-empirischer Kopfaufprallverzögerungsverlauf

Für den Verzögerungspeak  $g_{kse-max}$  wird in der Literatur [GLA95], [HOW78] und [SBS88] ein Maximalwert von 200-250g angegeben. Bei Werten oberhalb dieser Peakverzögerung nimmt das Risiko einer Schädelfraktur stark zu. In [OKA94] wird für eine semi-empirische Zielkurve - unter Berücksichtigung eines linearen Verzögerungsabfalls - mit  $t_{max-se} = 3,0 \text{ ms}$  und  $g_{kse-max} = 250 \text{ g}$  eine Impaktoreindringung  $s_{kse} \approx 56 \text{ mm}$  ermittelt.

Der Kopfimpaktor wird während der Eindringung entlang einer Bahnkurve translatorisch und rotatorisch verzögert. Die für die Fahrzeugauslegung relevanten Deformationsraumzonen werden hierbei hauptsächlich durch die Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Haubenfläche beeinflusst. Dies kann beispielsweise aus der Analyse der Einzelver-



zögerungen des 3-axialen Beschleunigungsaufnehmers sowie aus CAE-Untersuchungen und Filmanalysen entnommen werden. Für die konzeptionelle Festlegung des Deformationsraums können daher einfache geometrische Zusammenhänge herangezogen werden.

Die Deformationsraumzone  $X_K$  bestimmt sich aus der Impaktoreindringung  $s_K$  unter Berücksichtigung des absoluten Aufprallwinkels. Der absolute Aufprallwinkel setzt sich aus dem Aufprallwinkel zur Horizontalebene ( $\beta_{KK} = 50^\circ$  und  $\beta_{EK} = 65^\circ$ ) sowie dem Tangentialwinkel  $\lambda$  - gemessen als Relativwinkel zwischen Fahrzeugaußenkontur und Horizontalebene - zusammen. Abb. 6.2 veranschaulicht für den Kinder- und Erwachsenen Kopf die Abhängigkeit der Deformationsraumzone vom Haubenneigungswinkel sowohl für die theoretisch ideale (51,1mm) als auch für weitere Impaktoreindringungen.

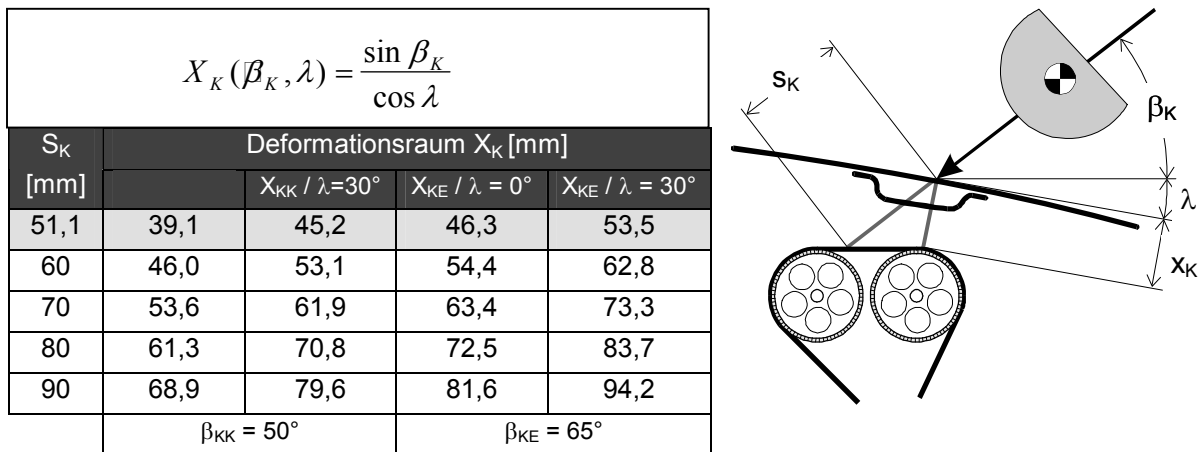


Abb. 6.2: Zusammenhang von Deformationsraumzone, Impaktoreindringung und Haubenneigung

Eine Abschätzung praxisbezogener Deformationsraumzonen wird in [ZEL94] und [OTU98] vorgestellt. Die experimentell ermittelten Verzögerungskurven werden durch zweifache Integration und unter Annahme einer zur Motorhaube senkrechten, resultierenden Verzögerung in Eindringzonen umgewandelt (Abb. 6.3). Es werden für die Erfüllung von HPC=1000 für den Kinderkopfaufprall mindestens 50mm (54mm nach [OTU98]) und für den Erwachsenenkopfaufprall 70mm als realisierbare Deformationsräume ermittelt.

Diese Freiraumzonen setzen aufgrund unterschiedlicher Massen für den Kinder- und Erwachsenenkopfimpaktor verschieden steife Aufprallzonen voraus. Der hierfür ausschlaggebende Faktor ist die maximal zulässige Verzögerung bzw. Kraft, bei der eine Schädelfraktur auftreten kann. Der maximale Verzögerungspeak bestimmt somit die Steifigkeiten der beiden Aufprallbereiche.

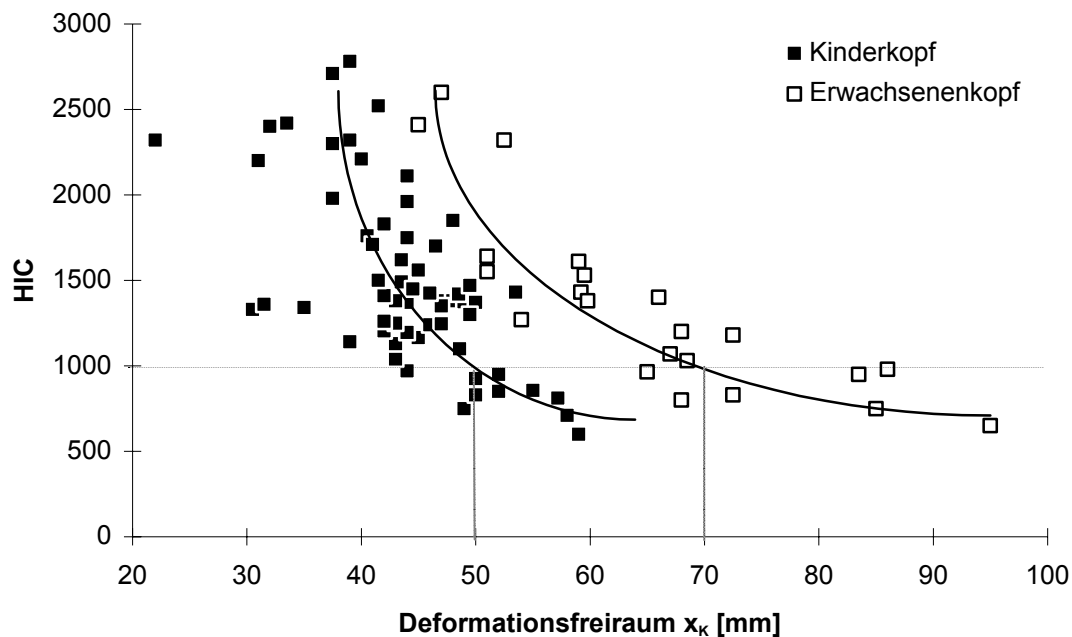


Abb. 6.3: Deformationsfreiräume in Relation zum HIC-Wert (abgeleitet aus [ZEL94])

Die beim Kopfaufprall betroffenen Fahrzeugbauteile müssen abgestimmte Deformationsverhalten aufweisen, durch welche ein Kopfverzögerungsverlauf ähnlich dem semiempirischen Kurvenverlauf  $g_{Kse}(t)$  erzeugt wird. Für die beiden Kopfmassen gilt es, abgestimmte Steifigkeitsbedingungen zu berücksichtigen. Es werden dafür Deformationsfreiräume von mindestens 50 mm bzw. 70 mm gefordert. Explizite Aussagen für die Übergangsbereiche werden nicht getroffen.

### 6 1.2 Hüftaufprall

Um eine zulässige maximale Summenkraft von  $F_{Hmax} \leq 4\text{kN}$  bei minimalem Deformationsweg einzuhalten, wird ein theoretischer Kraftverlauf  $F_{Ht}(t)$  angestrebt, der konstant bei 4kN verläuft (Abb. 6.4). Es lässt sich für Pkw-typische geometrische Vorderwagenparameter ( $HK_H = [600\text{ mm}, 800\text{ mm}]$  und  $HK_R = [50\text{ mm}, 200\text{ mm}]$ ) aus dem Richtlinienentwurf III/5021/96EN (Anhang II-C) ein Bereich für die Impaktoraufprallenergie  $E_{Hkin}(HK_H, HK_R) = [70\text{ J}, 815\text{ J}]$  ermitteln. Unterhalb von 200J entfällt der Test laut Richtlinienentwurf. Dieser Wert wird daher als  $E_{Hmin}$  definiert. Die Impaktoraufprallenergie wird – unter der Annahme rein plastischer Deformation - durch die Fahrzeugstruktur dissipiert.

$$E_{Hkin}(HK_H, HK_R) = E_{Hdef}(s(t), F_H(t)) \quad (6.3)$$

$$\frac{1}{2} m_H v_H(t_0)^2 = F_{Hmax} S_{Ht} \quad (6.4)$$

Für die Anfangsimpaktgeschwindigkeit gilt [KEG96]:  $v_{Hmax}(t_0) = 40\text{km/h}$  /  $v_{Hmin}(t_0) = 20\text{km/h}$  sowie für die gesamte Hüftmasse bei 200J / 815J:  $m_{Hmax} = 13,20\text{kg}$  /  $m_{Hmin} = 12,96\text{kg}$

Unter Berücksichtigung der maximalen und minimalen Energiedissipation durch die Impaktorummantelung von  $E_{Umin}$  ca.  $65\text{J}^1$  sowie  $E_{Umax}$  ca.  $115\text{J}$  sowie unter Vernachlässigung der vor den Kraftaufnehmern montierten Impaktorbauteilmassen von  $m_{HV}=2,55\text{kg}$  (siehe auch Anh.II-B) lässt sich 6.4 wie folgt darstellen:

$$\frac{\left[ \frac{1}{2}(m_H - m_{HV})v_H(t_0)^2 \right] - E_U}{F_{Hmax}} = s_{Ht}(t) \quad (6.5)$$

Der stark von der Vorderwagenkontur abhängige Bereich der theoretischen Minmaleindringung ermittelt sich demnach zu:  $s_{Ht}(t) = [23,9\text{mm}; 135,6\text{mm}]$

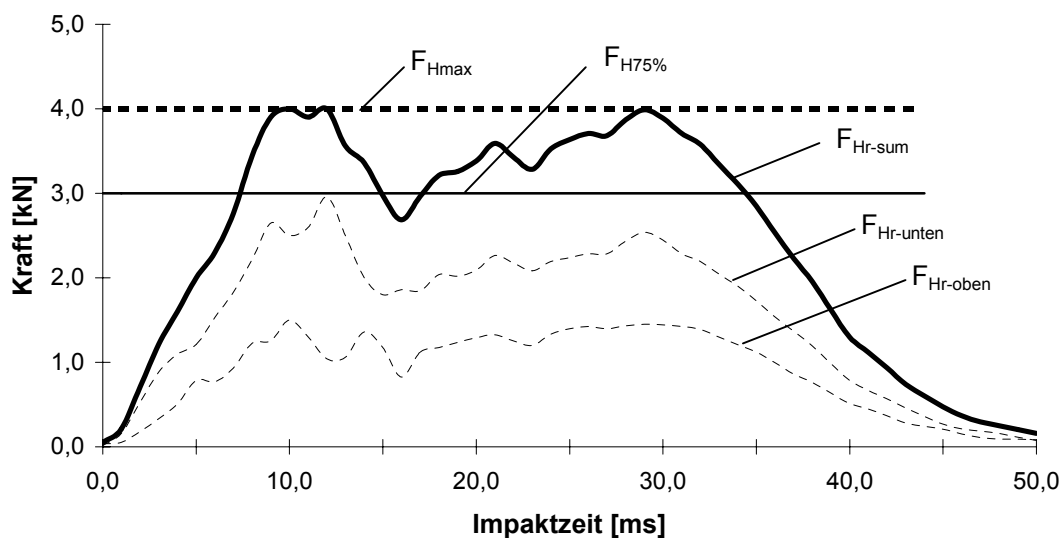


Abb. 6.4: Theoretischer semi-empirischer Summenkraftverlauf sowie exemplarischer realer Kraftverlauf für den Hüftaufprall

Ein anzustrebender realer Summenkraftverlauf  $F_{Hr-sum}(t)$  – bestehend aus oberem ( $F_{Hr-oben}$ ) und unterem Kraftverlauf ( $F_{Hr-unten}$ ) – zeichnet sich durch einen schnellen Kraftanstieg auf maximal 4kN sowie eine Energiedissipation auf möglichst konstantem, hohem Niveau aus. Als semi-empirischer Zielwert wird ein gemittelter Kraftverlauf  $F_{H75\%}(t)$  von 3kN angestrebt, welcher einer Energieeffizienz<sup>2</sup>  $E_{eff}$  der Fahrzeugstruktur von 75% entspricht.

<sup>1</sup> Entnommen aus CAE-Analysen bei 200J und 500J.

<sup>2</sup> Energieeffizienz ist eine Maßzahl für das Energieabsorptionsvermögen von Deformationsbauteilen.

Dafür lassen sich, ebenfalls unter Berücksichtigung der geringsten Energiedissipation durch die Impaktorummantelung  $E_{Umin}$  und der vor den Kraftaufnehmern montierten Impaktorbaueteilmassen, Eindringwerte  $s_{Hse}(t) = [31,9\text{mm}, 197,5\text{mm}]$  erreichen (Abb. 6.5).

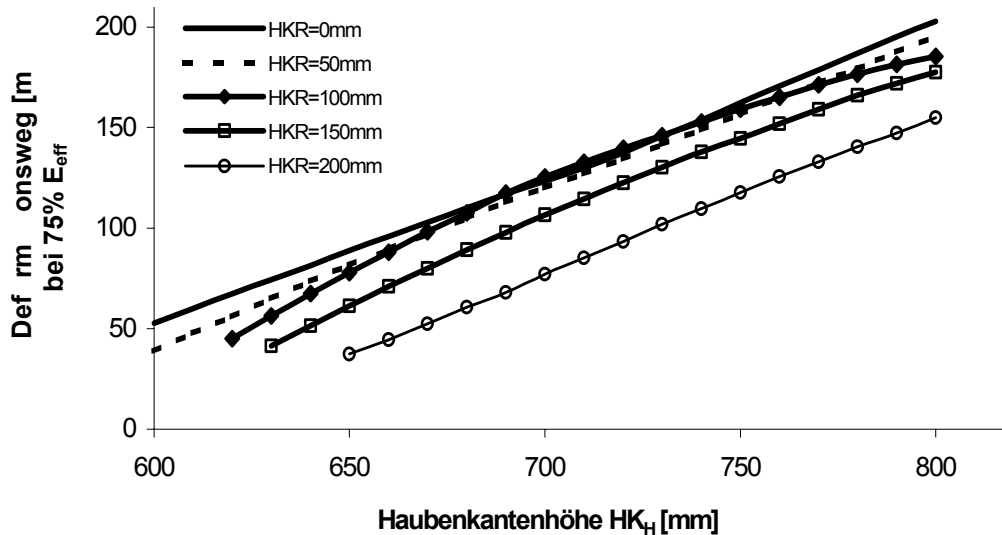


Abb. 6.5: Deformationsraumabschätzung für den Hüftaufprall in Abhängigkeit von der Haubenkantenhöhe  $HK_H$  sowie dem Haubenkantenrückversatz  $HK_R$  unter Annahme einer 75%igen Energieeffizienz der Fahrzeugstruktur

Testergebnisse von bisher getesteten Fahrzeugen weisen i.d.R. für das an den drei Stellen gemessene Biegemoment  $M_H(t)$  des Hüftimpaktors einen ähnlichen Kurvenverlauf auf, wie bei den einzelnen Kraftverläufen  $F_{Hr}(t)$ . Ursächlich hierfür ist die weitestgehend zentrale Krafteinleitung auf die Mitte des Hüftimpaktors. Dies zeigt sich als Abhängigkeit der Impaktorenergie respektive der Summenkraft in bezug auf das Biegemoment<sup>4</sup> (Abb. 6.6).

Eine Beschränkung des Biegemomentenverlaufs auf die geforderten 220 Nm lässt sich daher vor allem durch eine Reduzierung der zeitabhängigen Flächenkraft  $F_{Hr}(t)$  erreichen. Zusätzlich kann durch die Wahl geeigneter Konstruktionsparameter am Pkw-Vorderwagen eine Verschiebung der Flächenkraft zu den Auflagern mit gleichzeitiger Reduzierung der mittigen Biegemomentenmaxima erreicht werden.

<sup>4</sup> Die sehr hohen Werte für das Biegemoment sowie die Summenkraft entstammen veröffentlichten Testdaten von Serienfahrzeugen (vgl. auch Abb.4.3).

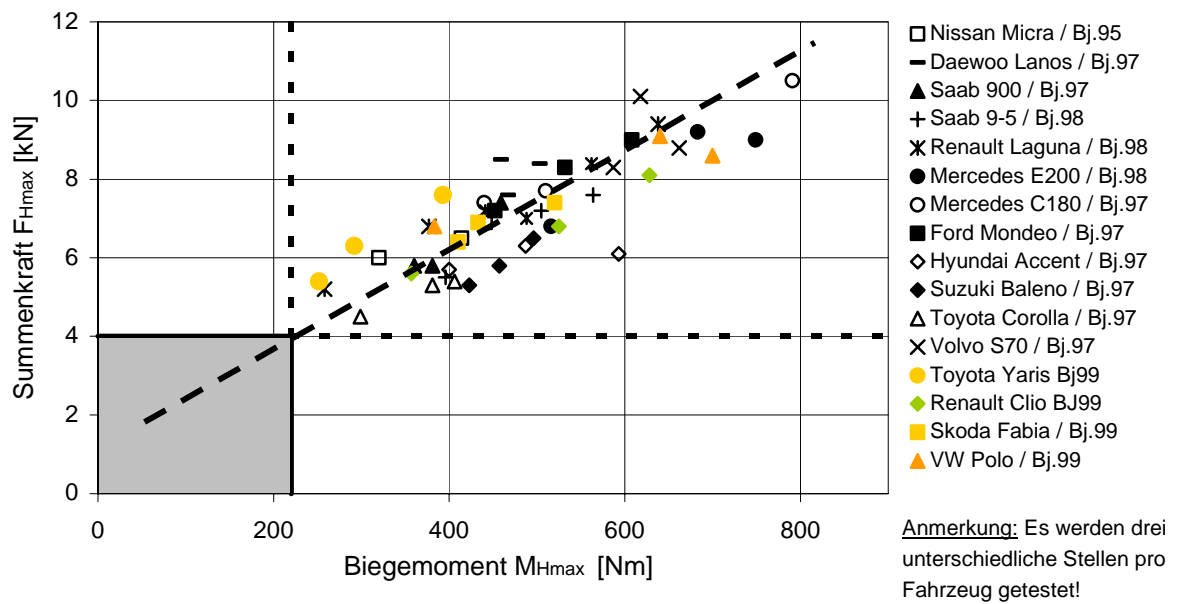


Abb. 6.6: Einfluss der Summenkraft auf das Biegemoment beim Hüftaufprall nach Euro-NCAP getesteter Serienfahrzeuge [EAM00], [EUN00]

Die Auslegung der Fahrzeugbauteile im Bereich der vorderen Haubenkante erfolgt demzufolge unter Berücksichtigung einer Deformationscharakteristik mit abgestimmtem, plastischem Verhalten (75% Energieeffizienz,  $F_{Hmax} \leq 4\text{kN}$ ) und einer gleichmäßigen Verlagerung der zeitlich abhängigen Flächenkraft zu den beiden Auflagern. Die Wahl der geometrischen Vorderwagenparameter nimmt beim Hüftaufprall maßgeblich Einfluss auf die variable semiempirische Eindringzone.

### 6.1.3 Beinaufprall

Die für PILU relevante Betrachtungsweise des Beinimpaktors beschränkt sich auf eine maximal zulässige Verzögerung von 150 g ( $a_{Bmax}$ ) und eine maximale, dynamische Biegung im Gelenk von  $15^\circ$  ( $\alpha_{Bmax}$ ). Die Verschiebung im Gelenk wird nicht berücksichtigt, da die konstruktive Ausführung der Knieverschiebemechanik für die Messdatenauswertung sehr fehlerhaft ist [SAK94], [CES96], [WG1798]. [BRO98]<sup>1</sup>. Geometrische Fahrzeugparameter, welche die Biegung positiv beeinflussen, nehmen in ähnlichem Umfang Einfluss auf die Verschiebung.

<sup>1</sup> Anmerkung des Autors: Der von TRL [LAW98] überarbeitete Beinimpaktor mit einer verbesserten Messwertaufnahme der Knieverschiebung wurde erst während der Endphase dieser Arbeit bekannt. Er stand nicht für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche zur Verfügung.

Um die maximal zulässige Verzögerung - gemessen im oberen Bereich des Unterschenkels - bei geringer Impaktoreindringung zu realisieren, wird ebenfalls ein Rechteckverzögerungsverlauf  $a_{Bt}(t)$  angestrebt, welcher mit  $a_{Bmax}$  identisch ist (Abb. 6.7). Es lässt sich die Eindringung bestimmen aus dem Energiegleichgewicht von kinetischer und rein plastischer Deformationsenergie:

$$E_{Bkin} = E_{Bdef}(s_B(t), F_B(t)) \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{2} \cdot m_B \cdot v_B(t_0)^2 = a_{Bmax} \cdot m_B \cdot s_{Bt}(t_{end})$$

$$\frac{\frac{1}{2} \cdot v_B(t_0)^2}{a_{Bmax}} = s_{Bt}(t_{end}) \quad (6.6)$$

Unter Vernachlässigung der Neoprenhaut und der darunter befindlichen Schaumstoffschicht lässt sich mit  $a_{Bmax}=150g$  und  $v_B(t_0) = 40 \text{ km/h}$  eine theoretische Minimaleindringung von  $s_{Bt}(t) = 41,9\text{mm}$  ermitteln.

Typische Verzögerungsverläufe  $a_{Br}(t)$  aus Fahrzeugversuchen weisen in der Regel einen ersten Verzögerungspeak  $a_{B1}$  sowie einen zweiten Peak  $a_{B2}$  auf. Der erste Peak wird hierbei durch den Stoßfängerkontakt selbst hervorgerufen. Der zweite Peak wird zusätzlich durch den Kontakt des Oberschenkels mit der Motorhaubenvorderkante bestimmt. Für die semi-empirischen Zielwerte wird daher ein Kurvenverlauf  $a_{Bse}(t)$  angestrebt, der einen schnellen Verzögerungsanstieg auf maximal  $150 \text{ g}$  und eine Energieeffizienz der betroffenen Fahrzeugstruktur von ca.  $75\%$  ( $a_{B75\%} = 112,5 \text{ g}$ ) aufweist. Daraus lässt sich eine Minimaleindringung  $s_{Bse}(t) = 55,9 \text{ mm}$  ermitteln.

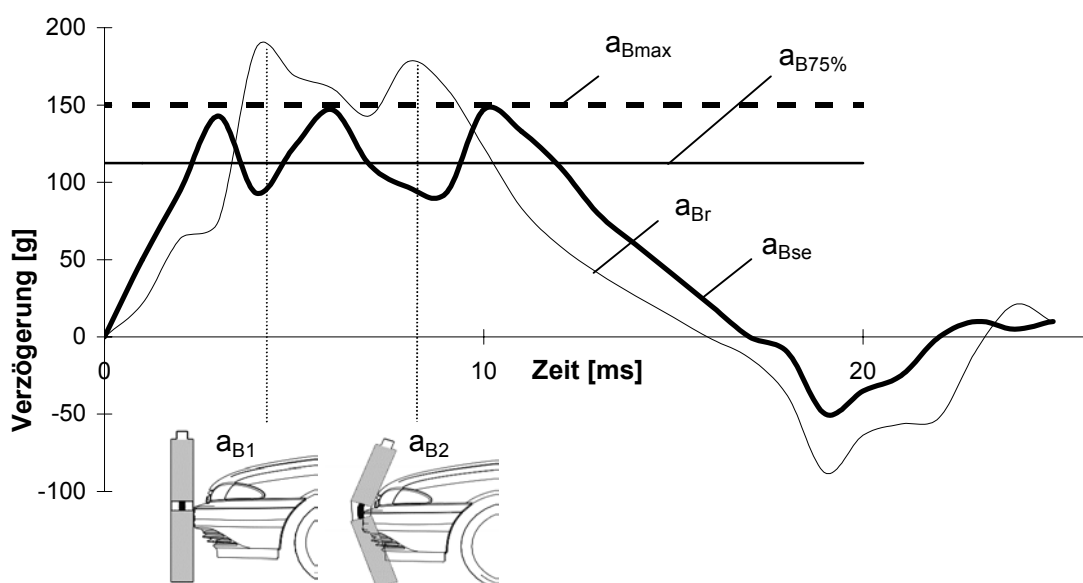


Abb. 6.7: Theoretische, typische sowie semi-empirische Verzögerung des Beinimpaktors

Die Biegung im Gelenk ergibt sich aus der rotatorischen Relativbewegung der beiden Impaktorhälften (vgl. auch Abb. 5.9). Die Reaktionskraft - ausgelöst durch den Stoßfänger bzw. Spoilerkontakt - wirkt hauptsächlich auf den Unterschenkel. Für den Oberschenkel wird die Rotation um das Kniegelenk durch die Massenträgheitskraft und die Gelenksteifigkeit von maximal 500 Nm definiert. Die Gelenksteifigkeit ist durch die Prüfvorschrift III/5021/96EN für das Gelenk-Deformationselement vorgegeben. Erst bei einem Kontakt des Oberschenkels mit dem Kühlergrill bzw. der Motorhaubenvorderkante wirkt eine weitere Reaktionskraft der Rotation entgegen. Der Kraftverlauf auf den Unterschenkel greift oberhalb des Unterschenkelschwerpunkts an und führt zu einer Rotation des Unterschenkels um die Kraftresultierende mit der Steifigkeit des Kniegelenks als Widerstandsmoment. Die entgegengesetzte Rotation der beiden Impaktorhälften verursacht die Biegung im Gelenk. Neben der Auslegung des Energieabsorptionsverhaltens der Stoßfänger-Spoilerkombination auf eine Energieeffizienz von 75% gilt es, die geometrischen Konturparameter des Pkw-Vorderwagens auf eine Flächenkraftverteilung zu optimieren, welche eine Biegung im Gelenk minimiert (vgl. auch Kap 5.2.1). Der Auslegungsschwerpunkt für die Eindringzone konzentriert sich dabei auf die untere Beinimpaktorhälfte.

#### 6.1.4 Deformationsbedingungen für PILU

Die in PILU enthaltenen semi-empirischen Deformationsbedingungen sind als individuell veränderbare Standardeinstellungen festgelegt. Die in [Abb. 6.8](#) angegebenen Einstellungen und Zusammenhänge werden für den Datengenerierungsprozess zugrunde gelegt:

	Kopf		Hüfte		Bein	
	Kind	Erwachsener	$F_H$ [kN]	$M_H$ [Nm]	$a_B$ [g]	$\alpha_B$ [°]
	HPC	HPC				
<b>Eingabeparameter in PILU</b>	Werte für die Kurvencharakteristik, Grenzwerte		Energieeffizienz, Impaktorcharakteristiken, Grenzwerte		Energieeffizienz, Impaktorcharakteristiken, Grenzwerte	
<b>Theoretische min. Eindringung</b>	51,1mm (HPC = 1000)		23,9mm – 135,6 mm ( $F_{Hmax} = 4kN$ )		41,9 mm ( $a_{Bmax} = 150g$ )	
<b>Semi-empirische Eindringung</b>	50mm ( $\beta_{KK} = 50^\circ$ )	70mm ( $\beta_{KE} = 65^\circ$ )	31,9mm – 197,5 mm ( $F_{Hmax} = 3kN$ )		55,9 mm ( $a_{Bmax} = 112,5g$ )	
<b>Grundlage</b>	Typischer Verzögerungsverlauf mit experimentellen Charakteristiken		Energieeffizienz	Flächenkraftverteilung	Energieeffizienz	Flächenkraftverteilung
<b>Berücksichtigung geometrischer Abhängigkeiten</b>	ja	ja	ja	ja	ja	nein
<b>Ausgabe</b>	Graphisch		Graphisch/numerisch		Graphisch	

Abb. 6.8: Grundlagen und Standardeinstellungen der Deformationsbedingungen in PILU

## 6.2 Datengenerierungsprozess durch PILU

Die Generierung von Daten durch PILU beinhaltet die Aktivierung speziell dafür entwickelter Module innerhalb der CAD-Umgebung und in externen ProgrammROUTINEN. Der prinzipielle Prozessablauf für die Ermittlung der Außenhautaufprallbereiche und der entsprechenden Eindringzonen wird in Abb. 6.9 dargestellt. In dem CAD-Programm werden durch den Benutzer sowohl die Ausgangsdaten (die 3D - Außenflächen des Stylingmodells) als auch die Enddaten (Referenzlinien und Eindringungsflächen) bearbeitet.

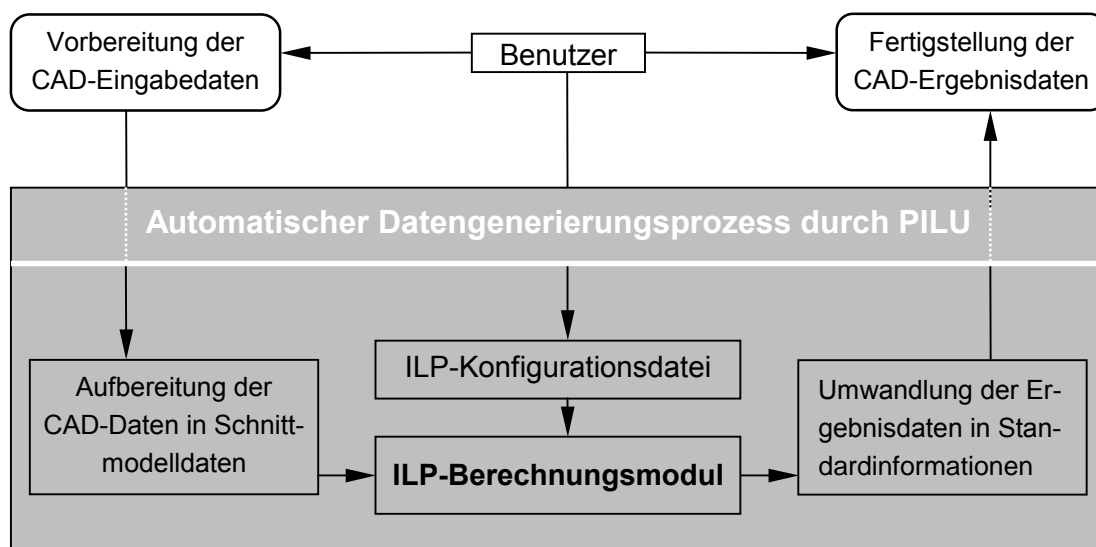


Abb. 6.9: Prinzipieller Prozessablauf zur Ermittlung der Aufprallbereiche und der Eindringzonen unter Verwendung von PILU

Die prinzipielle Funktionsweise von PILU basiert auf der Generierung eines durch Makros unterstützten Schnittmodells durch den Pkw-Vorderwagen innerhalb des CAD-Programms. Hier werden mit frei wählbaren Schnittparametern die eingelesenen Fahrzeugdaten in konstante X- und Y-Schnitte umgewandelt. Diese Daten werden für den eigentlichen Berechnungsvorgang des externen ILP's ("Impactor Location Program") verwendet. Für die Datenübertragung wird das Standardformat "Nastran" eingesetzt.

Das ILP-Berechnungsmodul bildet den analytischen Kern von PILU. Die vor- und nachgeschalteten Makroroutinen innerhalb des CAD-Programms basieren auf einem PDGS-eigenen Standard [PDG95] und sind in einer eigens für PILU angefertigten Bibliothek abgespeichert.



Während des Einlesens der Daten wird die interne Datenstruktur aufgebaut. In ihr sind die einzelnen Schnitt- und Punktinformationen enthalten. Irrelevante CAD-Informationen, die nicht zur Bildung der Außenkontur beitragen, werden herausgefiltert. Das ILP-Berechnungsmodul organisiert die interne Datenstruktur sowie die I/O-Schnittstellenverwaltung und beinhaltet die mathematischen Umsetzungsroutinen für die Berechnung der Impaktoraufprallbereiche sowie deren entsprechende Eindringzonen (Abb. 6.10).

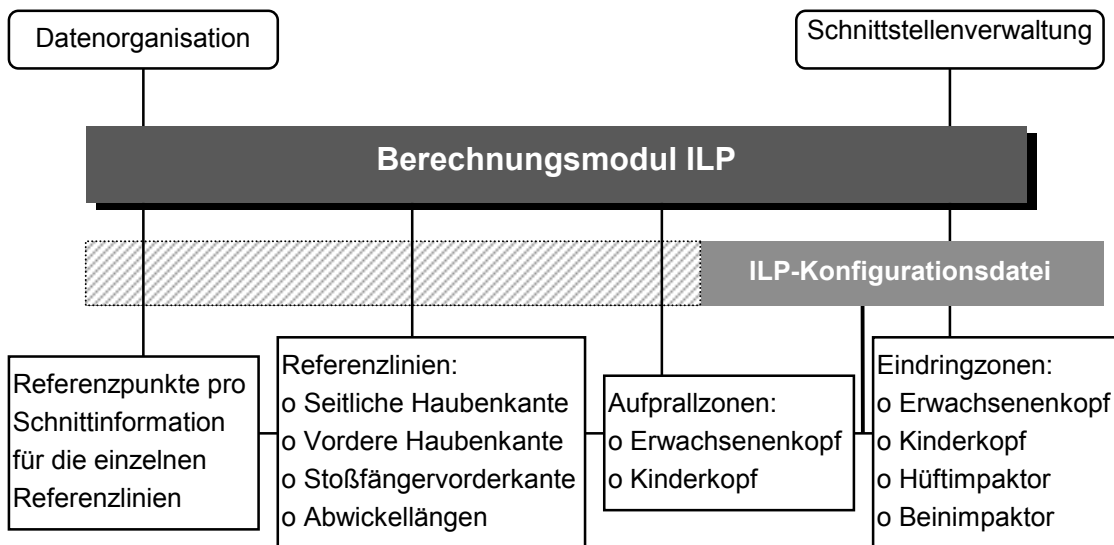


Abb. 6.10: Funktionen des Berechnungsmoduls ILP

Bei der Ermittlung der Referenzlinien sowie der Abwickellängen lassen sich die geometrischen Zusammenhänge durch mathematische Gleichungen abbilden [FBE97]. Als Datenbezug werden die Schnittinformationen verwendet und einzelne Referenzpunkte bestimmt. Zwischen den entsprechenden Referenzlinien bzw. Abwickellängen definieren sich die beiden Kopfaufprallbereiche. Die Kontaktzonen für den Bein- und Hüftimpaktor orientieren sich an den entsprechenden Referenzlinien.

Die Eindringparameter der einzelnen Impaktoren stehen - basierend auf den semiempirischen Deformationsbedingungen (Kap 6.1.4) - als Standardeinstellung in der Konfigurationsdatei zur Verfügung. Die geometrischen Abhängigkeiten auf die individuelle Fahrzeugaußenkontur finden automatisch Berücksichtigung.

Die Umsetzung der Beinimpaktoreindringung erfolgt durch die Verschiebung der Referenzlinie in Fahrzeuginnenrichtung bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Radiusbedingungen an den Referenzpunkten. Bei der Eindringungsfläche für den Kopfaufprall werden die unterschiedlichen Aufprallwinkel, die Radiusbedingungen und ein Übergangsbereich - bei

1500mm Abwickellänge - mit der höheren Eindringtiefe des Erwachsenenkopfs berücksichtigt. Für den Hüftaufprall steht ein eigenes Unterprogramm zur Verfügung, welches für jeden Schnitt die Eindringtiefe in Abhängigkeit von der lokalen Fahrzeugkontur ermittelt. Die für diese Anwendung notwendigen Diagramme sind aus [KEG96] (siehe auch [Anhang II-C](#)) entnommen und als mathematische Polynome im Programm implementiert. Die so ermittelten Daten definieren die expliziten Eindringtiefen an den definierten Schnittebenen. Eine entsprechende Textdatei sammelt diese Informationen.

Alle durch das ILP ermittelten analytischen Ausgabedaten werden in Standardinformationen umgewandelt und stehen auf CAD-Ebene in PDGS für die weitere Anwendung und die eigentliche Packageauswertung zur Verfügung.

### 6.3 Anwendung

Durch die offene Struktur von PILU kann der Anwender sowohl verbessernd als auch manipulativ in den Ausführungsablauf eingreifen. Während des gesamten Ausführungsablaufs werden folgende Benutzeraktionen gefordert (vgl. auch [Anhang VI-A](#)):

- => Eingabe der digitalisierten CAD-Daten des Designmodells
- => Begleitung der Makroroutinen für die Schnittdatenerstellung
- => Begleitung der Makroroutinen für den Datentransfer
- => Aufbereitung der Konfigurationsdatei.

Der sowohl am zeitlich umfangreichsten als auch mit den meisten Fehlern behaftete Benutzereinsatz liegt in der Zusammenstellung und Aufbereitung der Fahrzeugaußenhautdaten. In der Praxis liegen die Außenhautinformationen entweder in Form von Einzelteilen (Motorhaube, Kotflügel usw.) mit Flächeninformationen oder vereinzelt als reine Linien-(Scan)-Daten des Designmodells vor. Nach der Zusammenstellung der CAD-Informationen werden für die Bereiche bzw. Bauteile, welche als reine Liniendaten vorliegen, Hilfsflächen konstruiert. Eine Automatisierung dieses Vorgangs ist aufgrund der CAD-Datenverwaltung von PDGS nicht realisierbar. Der zunehmende Einsatz von EPDM-Systemen<sup>1</sup> verspricht hier zukünftig eine hohe Verbesserung.

---

<sup>1</sup> Zum Zeitpunkt der Entwicklung von PILU war ein leistungsfähiges EPDM-System nicht verfügbar.

Das Umsetzen der Vorderwagenflächen in Schnittdaten erfolgt über zwei PDGS-Makros, die vom Benutzer aktiviert werden. Nach einer Kontrolle der generierten Schnittdaten werden diese mit Hilfe von weiteren Makros in Nastran-Format exportiert. Vor dem Einsatz des

ILP-Berechnungsmoduls wird die Konfigurationsdatei durch den Benutzer bearbeitet. In der Konfigurationsdatei werden dem Anwender zwei Konfigurationsblöcke zur Verfügung gestellt (Anhang VI-B). Der erste Block beinhaltet vorgegebene Standardparameter (z.B. Referenzlinienparameter, Impaktormasse, -aufprallwinkel und -geschwindigkeit), welche bei abweichenden Untersuchungen vom Benutzer verändert werden können. Der zweite Block verfügt über alle speziellen fahrzeugbezogenen Eingabedaten (Fahrzeugaufstandsebene, Eindringparameter und individuelle Dateienverwaltung), welche vom Benutzer jedesmal erneut ausgefüllt und überprüft werden müssen.

Nach dem eigentlichen Berechnungsvorgang durch das ILP-Berechnungsmodul stehen dem Anwender sechs Dateien zur Verfügung. Neben den vier eigentlichen Hauptdateien - drei für die Impaktoreindringbereiche sowie eine für die Referenzlinien - wird noch zusätzlich eine Textdatei für die Hüfteindringparameter (Abb. 6.11) und eine Kontrolldatei zur Visualisierung der Außenkontur des Fahrzeuges erstellt.

Y [mm]	Bump.Lead HK <sub>r</sub> [mm]	Bon.Height HK <sub>h</sub> [mm]	Velocity v <sub>h</sub> [km/h]	Angle β <sub>h</sub> [°]	Energy E <sub>h</sub> [J]	Mass m <sub>h</sub> [kg]	Offset s <sub>h</sub> [mm]
20	112.5	675.1	27.5	37.0	417.5	14.3	149.1
40	112.4	674.6	27.5	36.9	416.2	14.3	148.7
60	112.2	673.9	27.4	36.9	414.1	14.3	147.9
80	111.9	672.9	27.3	36.9	411.1	14.3	146.8
100	114.3	674.0	27.2	37.3	411.6	14.4	147.0
120	114.0	672.5	27.1	37.3	406.9	14.4	145.3
140	113.3	670.6	26.9	37.2	401.5	14.4	143.4
160	112.6	668.4	26.7	37.2	395.4	14.3	141.2
180	112.8	669.6	26.8	37.2	395.0	14.5	141.2
200	112.8	668.8	26.8	37.2	395.0	14.5	141.2




Abb. 6.11.: Ergebnisdatei für die Hüfteindringung entlang der Fahrzeugfront

Die vier Ergebnishauptdateien werden - unterstützt durch zwei weitere Makros - in PDGS geladen und in Linien- bzw. Flächendaten umgewandelt. Diese Informationen können vom Anwender durch Überlagerung mit den Motorraumeinbauteilen genutzt werden, um Deformationsbereiche zu visualisieren und die geometrischen Daten der Bauteile und Strukturbereiche festzulegen.

#### 6.4 Exemplarischer Einsatz von PILU zur geometrischen Dimensionierung eines "fußgängerfreundlichen" Pkw-Vorderwagens

Hier werden exemplarisch die einzelnen Anwendungsschritte sowie deren Ergebnisdarstellungen vorgestellt. Die geometrische Dimensionierung des Pkw-Vorderwagens basiert hierbei auf den Lastenheftannahmen aus Kapitel 4.2, den detailimmanenten Designrichtlinien (Abb. 5.1) sowie den geometrischen Stoßfänger- und Spoilerparametern (Abb. 5.3 und Abb. 5.5) für einen verbesserten Beinaufprall.

Als Ausgangsbasis werden die digitalisierten Flächendaten des halben Designmodells in PDGS eingelesen und überprüft (Abb. 6.12). Darauf aufbauend generieren die beiden "Schnitt"-Makros in 20mm-Abständen Längs- und Querschnitte über den gesamten Pkw-Vorderwagen.

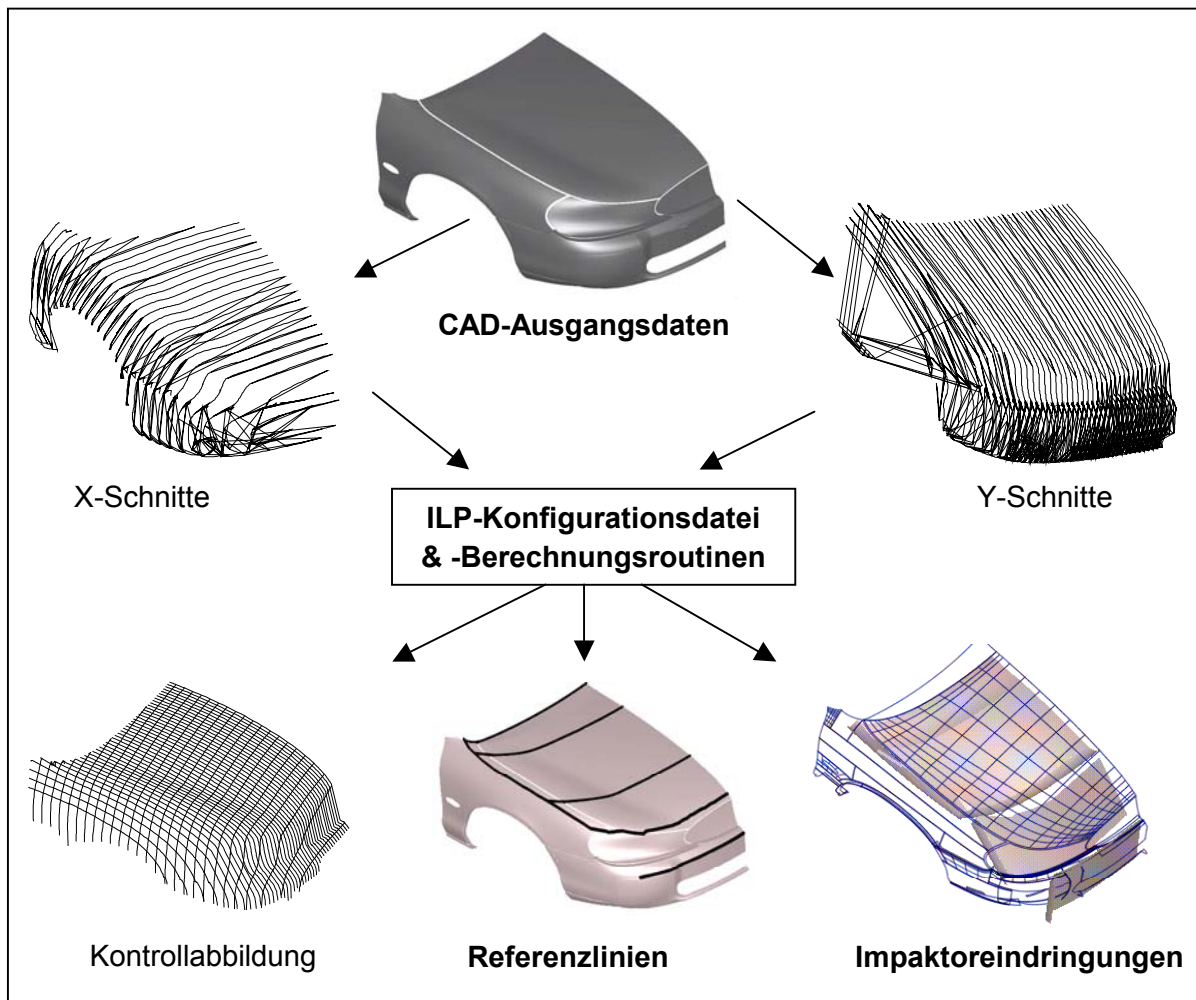


Abb. 6.12: Generierung der Referenzlinien sowie Impaktoreindringzonen durch "PILU"

In der Konfigurationsdatei (Anhang VI-B) werden neben den Standardeinstellungen die fahrzeugspezifischen Daten sowie die semi-empirischen Eingabedaten (Abb. 6.8) verwendet. Der Benutzer erhält als graphische Ausgabedatei die Kontrollabbildung der Berechnungsbasis, die Referenzlinien sowie die Eindringflächen. Die seitlichen Haubenöffnungsflächen können entsprechend Abb. 5.2 direkt von den Referenzlinien abgeleitet werden.

Abbildung 6.13 zeigt die Darstellung der Bauteileindringungen als Überlagerung der Fahrzeugbauteile mit den semi-empirischen Eindringungsflächen der einzelnen Impaktoren. Für diese Untersuchung werden alle für den Fahrzeugtyp vorgesehenen Motorvarianten und Bauteilpositionen der verschiedenen Optionen (z.B. Turboladerkühler, Servolenkungsaggregate) berücksichtigt. Es werden jeweils die Bauteile in das Ergebnismodell eingebracht, welche keinen Mindestabstand von der Fahrzeugaußenkontur aufweisen.

Die einzelnen Impaktbereiche lassen sich weiter für die Packageauslegung und die Bauteilkonzeptionierung gemäß der wesentlichen Entwicklungsziele (Kap. 4.2) unterteilen.

**Bereich I:** Steife Bauteile dringen in den Deformationsraum ein. In diesen und den direkt angrenzenden Bereichen müssen die Lastenheftanforderungen bezüglich des passiven Fußgängerschutzes nicht erfüllt werden. Diese Bereiche dürfen daher die im Lastenheft vorgegebene Flächeneinschränkung nicht überschreiten. Hier wird eine Flächeneinschränkung von 20% zugelassen (vgl. auch Abb. 4.5).

**Bereich II:** Weiche oder weich zu befestigende Bauteile dringen in den Deformationsraum ein. Diese Bauteile müssen in Verbindung mit den Außenhautteilen besonders ausgelegt werden, damit sie unter der Restriktion der gesetzlichen Anforderungen ein entsprechendes Deformationsverhalten aufweisen.

**Bereich III:** Darunter versteht man die Bereiche, bei denen sich unmittelbar unter der minimalen Eindringfläche Bauteile befinden. Durch gezieltes Auslegen der Außenhautteile darf die durch PILU vorgegebene Eindringfläche nicht oder nur sehr geringfügig überschritten werden.

**Bereich IV:** In diesen Bereichen steht weitaus mehr Deformationsweg zur Verfügung als durch die Eindringungsfläche vorgegeben wird. Bei der Auslegung der Außenhautbereiche muss lediglich darauf geachtet werden, dass diese nicht zu “steif” bzw. mit zu hohen anteiligen Massen ausgeführt werden. Für eine zu deformationsweiche Auslegung kann immer noch von ausreichendem Deformationsweg ausgegangen werden.

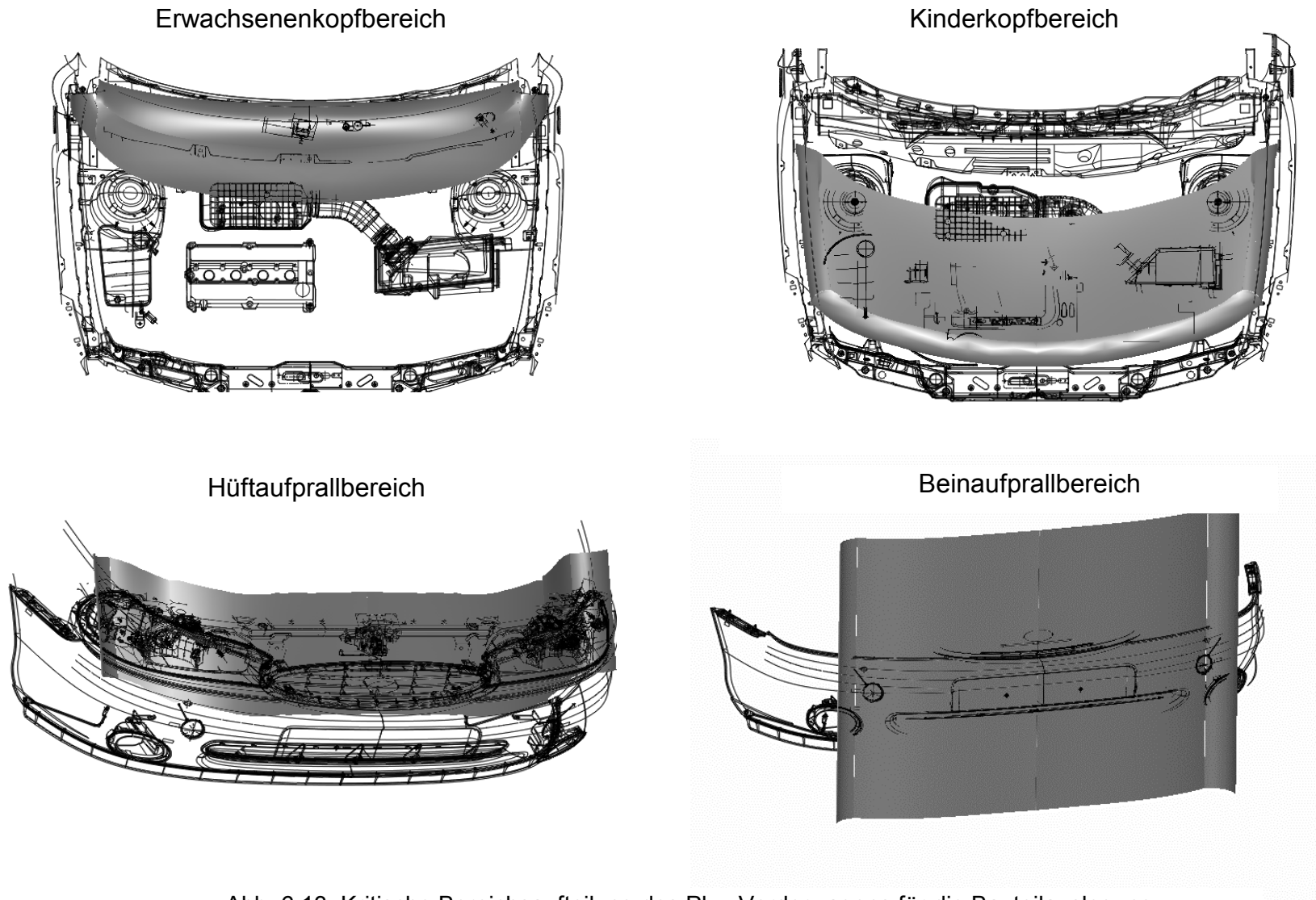


Abb. 6.13: Kritische Bereichsaufteilung des Pkw-Vorderwagens für die Bauteilauslegung

Die Bereiche II, III und IV decken somit in ihrer Summe die 80% der Außenhautfläche ab, wobei die Bereiche II und III während der nachfolgenden Entwicklungsarbeit besondere Berücksichtigung finden. In einem interaktiven Prozess werden diese Bereiche und die Bauteillagen definiert. Möglichst viele Bauteile werden so positioniert, daß die Bereiche III und IV maximal werden.

Durch diese Bereichseinteilung wird für die nachfolgende Konzeptionierung und Optimierung der einzelnen Bauteilgruppen der Entwicklungsrahmen festgelegt. Die Notwendigkeit zur Verwendung zusätzlicher Bauteile (z.B. Deformationselemente) für das entsprechende Fahrzeugdesign kann hieraus bereits abgeleitet werden.

## 7 „Ped Prot Testrig“ - Eine variable Komponententestvorrichtung

Während der Optimierungsphase werden durch FEM-Simulation Konstruktionsparameter (Bauteilgeometrie, Materialkenndaten, Wandstärken usw.) festgelegt. Die Optimierung erfolgt vorrangig durch den Einsatz speziell auf den Fußgängeraufprall abgestimmter CAE-Impaktoren und -Methoden (vgl. auch Kap 5.3). Da die reale Optimierung von der analytischen Optimierung abweicht (vgl. auch Abb. 4.9), wird eine frühe Validierung durch Versuche angestrebt. Eine Versuchsdurchführung während der Optimierungsphase mit einer Testvorrichtung hat daher zwei Aufgaben:

- => Lieferung verbindlicher Ergebnisse, um CAE-Aussagen abzugleichen mit dem Ziel einer verbesserten Basis für die nächste FEM-Optimierungsschleife
- => Kontrolle des realen Entwicklungsfortschrittes mit den Fahrzeugprogrammzielen.

Ziel der hier entwickelten Testvorrichtung ist es, große Teile des Pkw-Vorderwagens zu ersetzen, um die Anzahl der zu fertigenden Prototypenteile zu minimieren. Dadurch werden zeit- und kostenintensiv zu fertigende Bauteile lediglich für die Bereiche benötigt, welche direkt unter dem Einfluss der Impaktoren in Deformationszonen liegen. Eine der analytischen Optimierung überlagerte, kontinuierliche Versuchsdurchführung zielt somit auf die Verkürzung der Entwicklungszeit zur Gestaltung „fußgängerfreundlicher“ Pkw-Vorderwagen ab (Abb. 7.1).

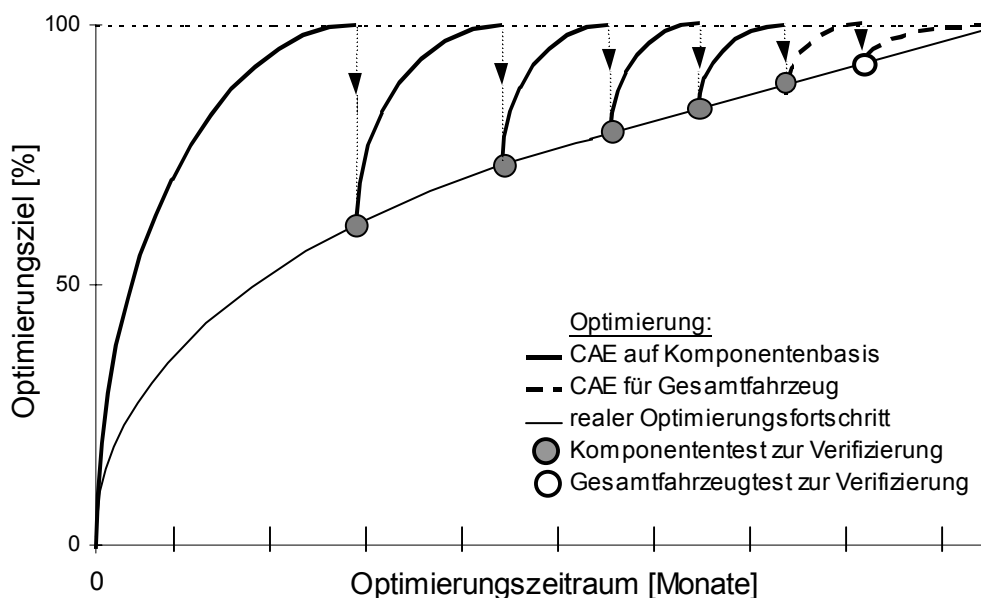


Abb. 7.1: Durch Komponententest unterstützter, analytischer Optimierungsprozess von Fußgängerschutzmaßnahmen



Um dem allgemeinen Anforderungsprofil bei Komponententests Rechnung zu tragen, wird ein hohes Maß an Variabilität der Testvorrichtung gefordert. Das allgemeine Anforderungsprofil stellt sich wie folgt für den „Ped Prot Testrig“ dar:

- => Substitution von Pkw-Vorderwagen verschiedener Größe durch die Testvorrichtung
- => Montage verschiedener Karosserie- und Fahrzeugeinbauteile je nach zu untersuchenden Testbereichen
- => Korrelation von Komponententestergebnissen mit dem ‘Ped Prot Testrig’ gegenüber Testergebnissen von Gesamtfahrzeugtests
- => Aufnahme von Motorraumeinbauteilen durch die Testvorrichtung
- => Leichte Montage und Demontage von zu untersuchenden Bauteilen
- => Einfache Handhabung bei der Verstellung der Fahrzeugparameter
- => Geringes Transport- und Aufbewahrungsvolumen.

## 7.1 Untersuchungen zur Ergebnisqualität

Da die wesentliche Aufgabe der zu entwickelnden Testvorrichtung die Substitution großer Teile des Pkw-Vorderwagens ist, gilt es, den Umfang der durch eine einheitliche Testvorrichtung zu ersetzenden Bauteile festzulegen. Ziel ist es hier, eine vergleichbare Ergebnisqualität von getesteten Bauteilen auf einer Testvorrichtung und aus realen Fahrzeugversuchen zu erhalten. Als Ausgangsbasis dienen Untersuchungen von real getesteten Fahrzeugen.

### 7.1.1. Untersuchung der Teststreuung von Gesamtfahrzeugtests

Als maximal zu erreichende Ergebnisqualität wird die Teststreuung aus Gesamtfahrzeugtests herangezogen. Untersuchungen von [GRE98] beschäftigen sich mit der Ermittlung der Teststreuung für die einzelnen Impaktoren. Als Vergleichsbasis werden an sechs verschiedenen Fahrzeugtypen insgesamt 28 Impaktstellen für den Erwachsenenkopf, 42 Impaktstellen für den Kinderkopf und 18 Impaktstellen jeweils für den Bein- und Hüftimpaktor ausgewählt. Jede Impaktstelle erfährt in zwei unterschiedlichen Testeinrichtungen jeweils drei Wiederholungstests<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Für den Beinimpakt werden lediglich zwei Wiederholungstests von Testlabor I vorgestellt.

Aus Versuchen mit Komplettfahrzeugen werden die Teststreuungen der einzelnen Kriterien<sup>2</sup> sowohl gesamt als auch für die einzelnen Testlabors angegeben (Abb. 7.2).

Impaktor	Kriterium	Labor I		Labor II		Streuung zw. Lab I u. Lab II [%]	Ges. Teststreuung	
		o.G.St. [%]	u.G.St. [%]	o.G.St. [%]	u.G.St. [%]		o.G.St. [%]	u.G.St. [%]
Kopf	HPC	-4,9	+4,7	-4,3	+3,7	± 4,9	-9,0	+9,1
Hüfte	Kraft	-11,9	+16,2	-10,3	+7,2	± 7,8	-16,5	+15,3
	Moment	-11,1	+14,1	-10,3	+7,8	± 7,8	-16,5	+15,3
Bein	Verzögerung	-3,5	+3,5	-12,6	+12,3	± 15,7	-19,4	+25,6
	Biegung	n.e.	n.e.	-21,4	+12,3	n.e.	n.e.	n.e.

o.G.St = obere Grenzstreuung

u.G.St = untere Grenzstreuung

Abb. 7.2: Zusammenfassung der Teststreuung von Fußgängerimpaktorversuchen mit Gesamtfahrzeugen [GRE98]

Zur Beurteilung der Ergebnisqualität bei Verwendung einer Komponententestvorrichtung wird die maximale, gesamte Teststreuung (obere und untere Grenzstreuung) sowie die Teststreuung von Testlabor II<sup>3</sup> für die Biegung im Beingelenk herangezogen.

### 7.1.2 Ergebnisqualität bei Verwendung einer starren Testvorrichtung

Es kann prinzipiell zwischen zwei konzeptionellen Prüfstandsvarianten unterschieden werden. Bei der einen Variante werden die Einflüsse vom Fahrwerk sowie vom elastisch-plastischen Verhalten der Vorderwagenkernstruktur (z.B. obere und untere Längsträger) vernachlässigt. Die Testvorrichtung wird als einfache, starre Rahmenstruktur angenommen. Die zweite Variante setzt die Existenz eines Feder-Dämpfersystems voraus, durch welche die Reaktionseinflüsse von Fahrwerk und Vorderwagenkernstruktur berücksichtigt werden. Eine solche Ausführung hat einen hohen, konstruktiven Aufwand zur Folge.

Die Verwendung einer starren Testvorrichtung ist nur dann zulässig, wenn der durch die Unterstruktur und das Fahrwerk kompensierte Energieanteil - bezogen auf die gesamte Impaktoraufprallenergie - einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Messergebnisse nimmt.

<sup>2</sup> Die Gelenkverschiebung im Bein wird nicht berücksichtigt (vgl. Kap. 6.1.3).

<sup>3</sup> Testergebnisse aus Labor I nicht verwertbar.

Im Besonderen teilt sich der in Z-Richtung (Hochachse) wirkende - überwiegend in potentielle Energie umgewandelte - Anteil auf die Fahrwerksfederung und die untere Karosseriestruktur auf. Für den Kopf- und Hüftaufprall kann die in X-Richtung (Fahrzeuginnenachse) und Y-Richtung (Fahrzeugquerachse) wirkende Kraftkomponente demgegenüber vernachlässigt werden. Beim Beinaufprall ist die Kraftkomponente in X-Richtung orientiert. Für den Beinaufprall ist der Einfluss in Y-Richtung sowie Z-Richtung und somit auf die Fahrwerksfederung ohne Bedeutung.

Aus der Filmanalyse von Gesamtfahrzeugtests kann die Verschiebung von undefor mierten Bereichen des Pkw-Vorderwagens mit den Kraft- bzw. Verzögerungsverläufen der einzelnen Impaktoren verglichen werden. Zweckmäßig wird eine Punktbe wegung auf der Oberstruktur gewählt, welche sowohl den Einfluss der Fahrwerksfederung als auch die Deformation der Unterstruktur erfasst, aber außerhalb des eigentlichen Deformationsbereiches liegt (z.B. Kotflügeloberkante). Dieser Punkt macht bei einer quasi-starren Testvorrichtung keine Bewegung mit.

Um den Einfluss des Pkw-Vorderwagens für ein breites Spektrum beurteilen zu können, werden sowohl für den Hüft- als auch für den Kopfaufprall jeweils 2 Extremwerte ausgewählt. Für beide Impaktoren werden Aufprallpunkte aus einem Gesamtfahrzeugtest bestimmt, welche einen aggressiven Kraft- bzw. Verzögerungsverlauf ( $F_{Hh}(t)$  bzw.  $g_{Kh}(t)$ ) bei geringem Deformationsweg sowie einen weichen Kraft- bzw. Verzögerungsverlauf ( $F_{Hw}(t)$  bzw.  $g_{Kw}(t)$ ) bei hohem Deformationsweg aufweisen. Die Vorderwagenbewegung für die extremen Aufprallvorgänge wird per optischer Punktverfolgung in z-Richtung als  $z_{Hh}$  und  $z_{Kh}$  für den harten Aufprall und als  $z_{Hw}$  und  $z_{Kw}$  für den weichen Aufprall erfasst.

Aufgrund der Massenträgheitseffekte des gesamten Pkw-Vorderwagens kann eine Phasenverschiebung zwischen den kritischen Kurvenmaximalwerten und der Reaktion der Unterstruktur und der Fahrwerksfederung beobachtet werden. Für den Kopfaufprall sowie für den „weichen“ Hüftaufprall<sup>4</sup> stellt sich die Maximalverzögerung für das zu beurteilende Erfüllungskriterium während der Anfangsphase des Aufpralles ein. Der Hauptanteil der geringen Vorderwagenbewegung (<10% von der Gesamtimpaktoreindringung) erfolgt erst nach dem Hauptpeak (Abb. 7.3).

---

<sup>4</sup> Die höheren Werte des aggressiven Hüftaufpralls haben in der Praxis eine untergeordnete Bedeutung, da die Bauteilauslegung im Hüftaufprallbereich auf eine niedrigere Summenkraft abzielt.

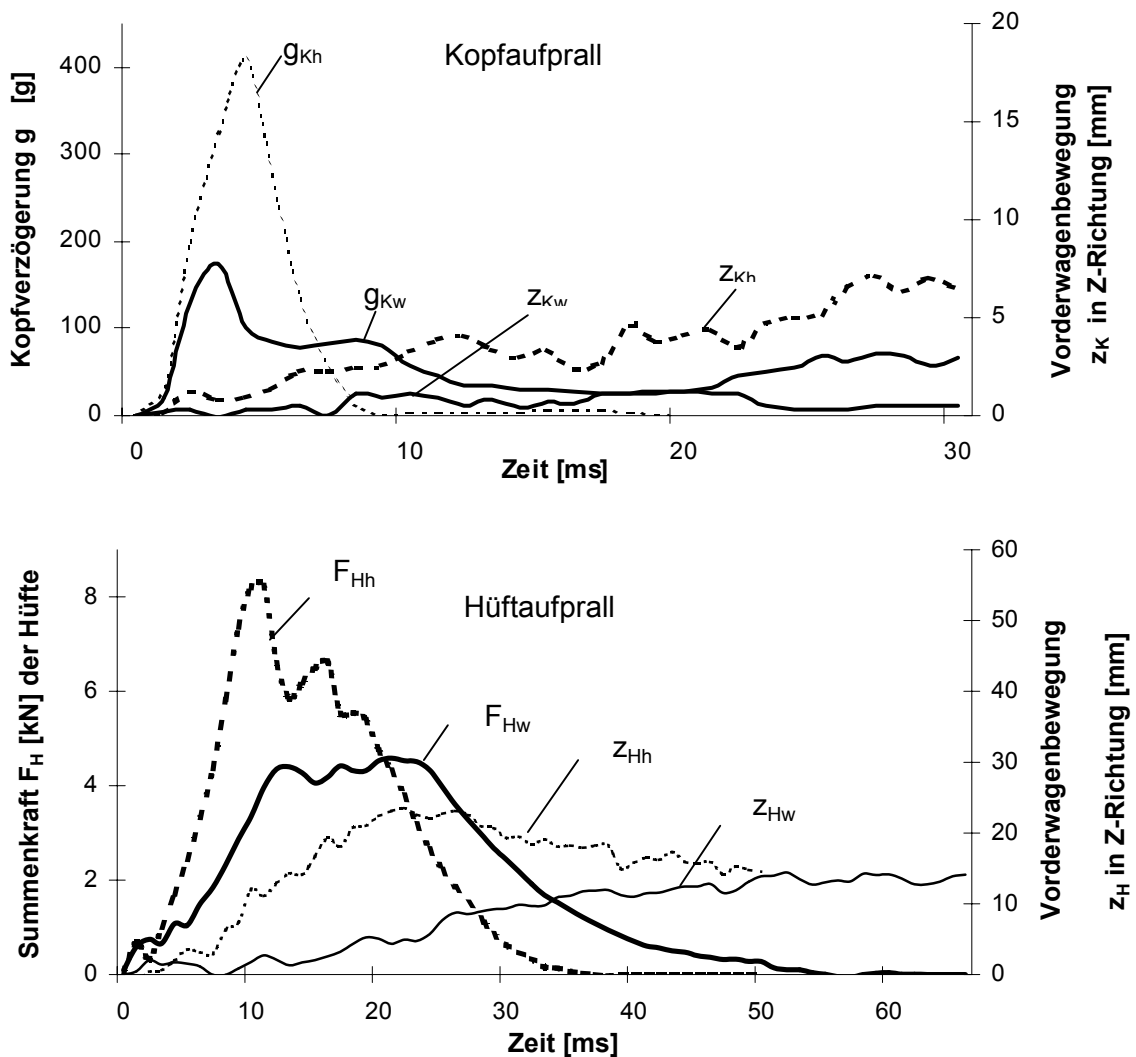


Abb. 7.3: Reaktionsbewegung des Pkw-Vorderwagens auf harten (h) sowie weichen (w) Hüft- und Kopfaufprall bezogen auf Hüftsummenkraft ( $F_H$ ) und Kopfverzögerung ( $g_K$ )

Im Gesamtfahrzeugversuch von Kopf- und Hütaufprall verhält sich der Vorderwagen ähnlich einer starren Testvorrichtung. Von einer Untersuchung für den Beinimpaktor kann abgesehen werden, da, basierend auf Filmanalysen, praktisch keine Reaktionsbewegung des Fahrzeugvorderwagens in X-Richtung beobachtet wird. Die konzeptionelle Verwendung einer starren Testvorrichtung ist gerechtfertigt und wird nach Ausführung in Hardware bestätigt (vgl. Kap.7.3).

## 7.2 Funktionsweise und Aufbau

Als Ausgangsbasis für die Testvorrichtung (Abb. 7.4) wird ein Fahrzeugbezugssystem gesucht, welches für verschiedene Fahrzeugtypen und -größen hinsichtlich Relativlage und Anschluss zum restlichen Fahrzeug weitestgehend identisch ist. Der vordere Stoßfängerquerträger bietet hierfür eine sehr gute Voraussetzung, da er aufgrund von Bagatellschadenanforderungen (ECE42, FMVSS581) eine vorgeschriebene Vertikalposition zur Bodenaufstandsfläche besitzt.

Bereich		Bezug zu Fahrzeugparameter
A	Endlos	Gesamte Vorderwagenbreite
B	$\pm 10^\circ$	Horizontaler Fahrzeugaufstandswinkel
C	$0 - 35^\circ$	Anbindungswinkel - oberer Querträger an Längsträger
D	$\pm 80\text{mm}$	Höhendifferenz - Kotflügelaufleger und Längsträger
E	$\pm 120\text{mm}$	Horizontalabstand – Kotflügelaufleger und unterer Querträger
F	$\pm 75\text{mm}$	Höhendifferenz – Kotflügel- bzw. Scharnieraufleger und Längsträger
G	430mm	Horizontale Verschiebung - Längsträger und Kotflügelauflegerung
H	$\pm 130\text{mm}$	Länge des Pkw-Vorderwagens

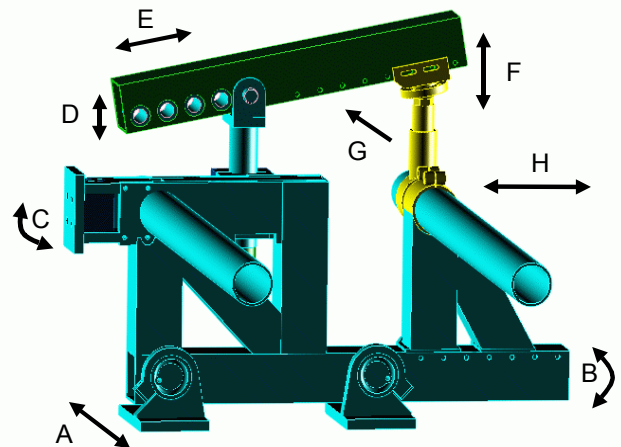
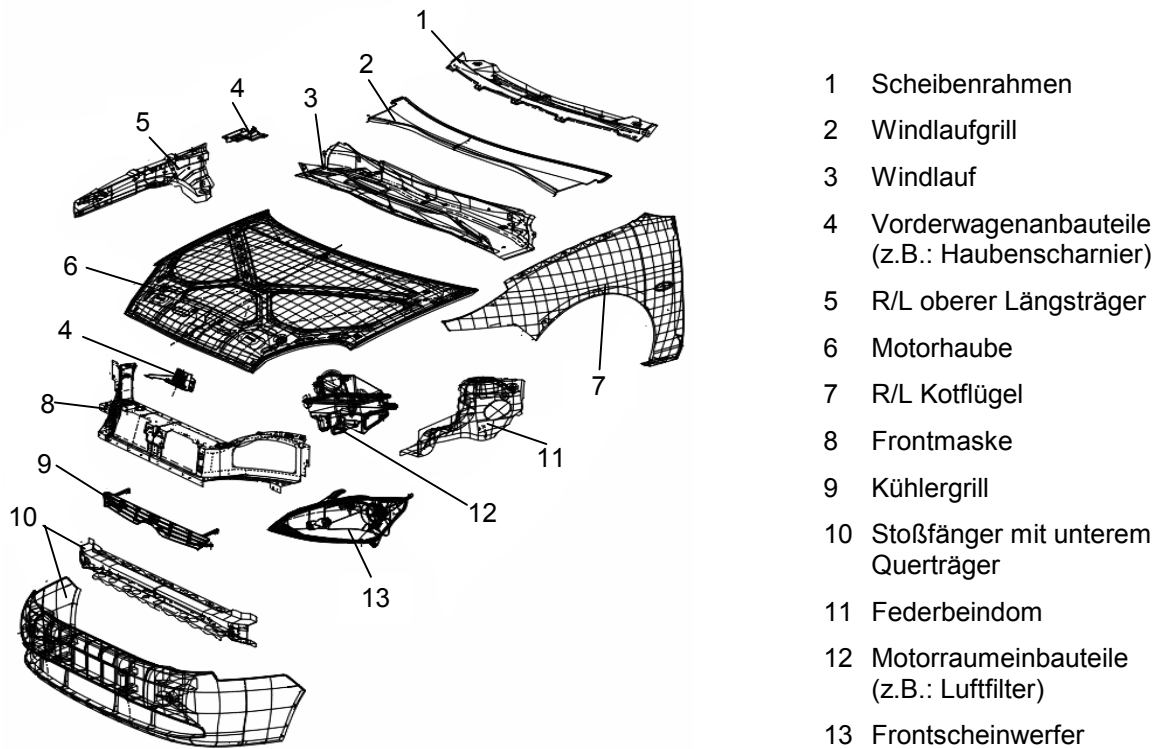


Abb. 7.4: Darstellung der halben Prüfvorrichtung mit allen Einstellbereichen

Um die Anwendung der Testvorrichtung für eine breite Pkw-Population zu gewährleisten, werden fünf Fahrzeugmodelle unterschiedlicher Fahrzeuggröße (Mikro-Kompaktwagen – Limousine der Oberklasse) für die Auslegung des Grundkonzeptes herangezogen. Es werden - ausgehend vom Stoßfängerquerträger - gemeinsame, charakteristische Bauteilagenbereiche ermittelt (z.B.: Kotflügel- und Haubenscharnierauflagen). Darauf aufbauend wird das Gesamtkonzept hinsichtlich fester sowie einstellbarer Baugruppen unterteilt. Um die Pkw-Vorderwagenanbauteile verschiedener Fahrzeugtypen sowie unterschiedlicher Bauteilkombinationen aufnehmen zu können, werden die verschiedenen Verstellbereiche festgelegt. Die einzelnen Verstellmechaniken werden so ausgelegt, dass sie sowohl vor, als auch nach der Montage einzelner oder mehrerer Fahrzeugbauteile bedient werden können. Das Maß an Variabilität dieser Testvorrichtung gestattet das Testen einzelner Bauteile sowie deren Kombination in fast beliebiger Zusammenstellung (Abb. 7.5).



- 1 Scheibenrahmen
- 2 Windlaufgrill
- 3 Windlauf
- 4 Vorderwagenanbauteile (z.B.: Haubenscharnier)
- 5 R/L oberer Längsträger
- 6 Motorhaube
- 7 R/L Kotflügel
- 8 Frontmaske
- 9 Kühlergrill
- 10 Stoßfänger mit unterem Querträger
- 11 Federbeindom
- 12 Motorraumeinbauteile (z.B.: Luftfilter)
- 13 Frontscheinwerfer

Abb. 7.5: Pkw-Vorderwagenbauteile zur Montage auf der Testvorrichtung

Die für den jeweiligen Testaufbau relevanten Anbauteile werden direkt an der Testvorrichtung befestigt und evtl. zusätzlich abgestützt. Für Untersuchungen von Motorraumeinbauteilen dienen die beiden quer montierten Trägerrohre als Montagebasis. Alle Bauteile werden entweder direkt oder über einfache Flach- oder Winkelbleche an den Hauptprofilen der Testvorrichtung montiert (vgl. auch Abb. 7.7) .

Durch die Wahl des vorderen Querträgers als Ausgangsbasis kann die Testvorrichtung für Stoßfängeruntersuchungen mit einem weiteren Modul, wie es beispielsweise in [STA98] vorgestellt wird, erweitert werden. In diesem Modul kann ein Stoßfängerspoiler sowohl horizontal als auch vertikal variabel montiert werden und somit in verschiedene Positionen zum Stoßfänger selbst gesetzt werden. Parameterstudien mit unterschiedlichen Stoßfängerkonfigurationen, unter Berücksichtigung der Vorderwagenparameter, lassen sich somit ebenfalls durchführen.

### 7.3 Validierung der Testvorrichtung

Für die Validierung von analytischen Aussagen soll nur noch in der Endphase der Entwicklung auf Gesamtfahrzeugtests zurückgegriffen werden (vgl. Abb. 7.1). Da in der Optimierungsphase Komponententests an Stelle von Fahrzeugtests für den Abgleich von CAE-Ergebnissen herangezogen werden, wird von einem Komponententestaufbau eine hohe Aussagequalität erwartet.

Auf der variablen Testvorrichtung durchgeführte Versuchsreihen für den Kopf-, Bein- und Hüftaufprall geben Aufschluss über die Vergleichbarkeit der Komponententestergebnisse mit Gesamtfahrzeugtests und entsprechenden CAE-Analysen. Abb. 7.6 zeigt die für den Vergleich festgelegten Impaktpositionen. Die Validierung erfolgt an einem Pkw der Kompaktkwagenklasse.

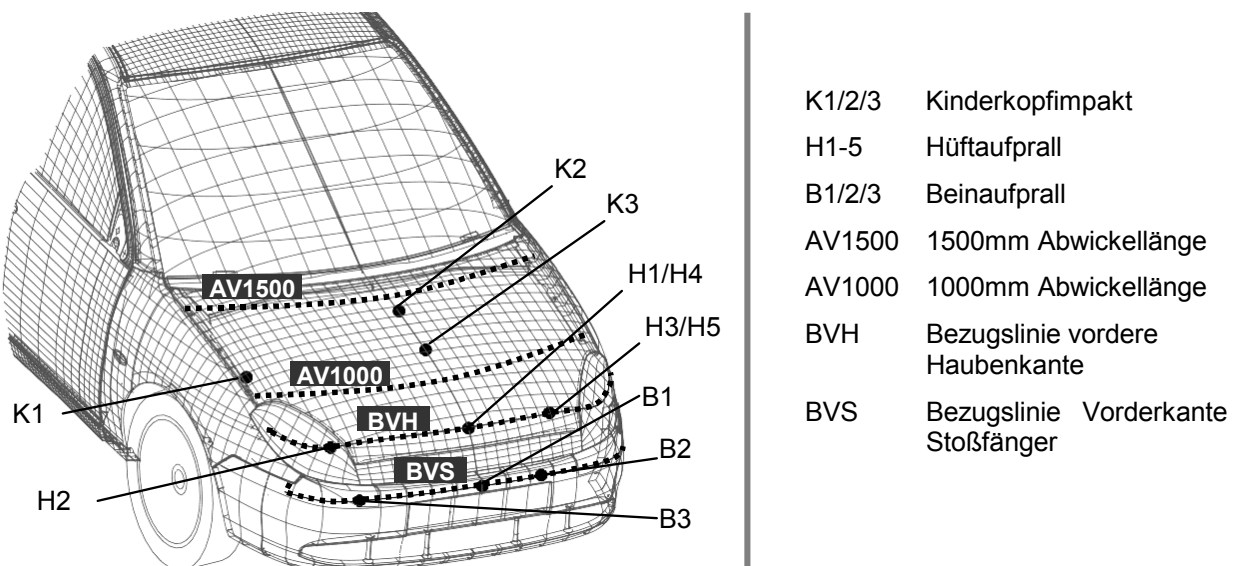


Abb 7.6: Impaktstellen zur Validierung der Testvorrichtung

Um Aussagen über die Vergleichbarkeit der Testergebnisse zu erhalten, werden gleiche Aufprallkoordinaten am Gesamtfahrzeug, bei Komponententests sowie im CAE-Modell ausgewählt. Für den Hüftaufprall werden zwei Testreihen an Bauteilgruppen unterschiedlicher Entwicklungsphasen durchgeführt, um die Aussagequalität sicherzustellen.

Für den Komponententestaufbau kommen folgende Pkw-Karosseriebaugruppen zum Einsatz:

- Kopfaufprall: Motorhaube, Haubenscharniere, Kotflügel, oberer Längsträger, Frontmaske, Haubenschloss, Haubendämpfer (Abb. 7.7)
- Hüftaufprall: Motorhaube, Haubenscharniere, Haubenschloss, Frontmaske, Lampen, Haubendämpfer, Stoßfänger, Stoßfängerquerträger
- Beinaufprall: Stoßfänger und -querträger, Abschlepphakenbefestigung, Motorhaube, Haubenscharniere, Haubenschloss, Frontmaske, Lampen, Haubendämpfer.

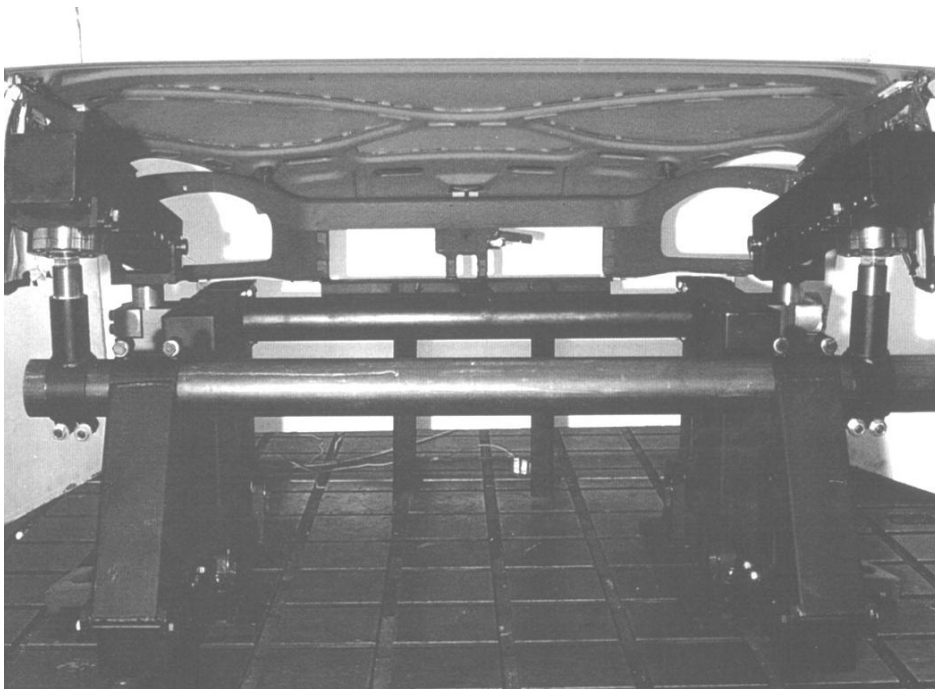


Abb. 7.7: Darstellung des Komponentenversuchsaufbaus für den Kopfaufprall (Rückansicht)

In Abb. 7.8 werden die Ergebnisse aus den Fahrzeugtests, den Komponententests sowie aus der CAE-Berechnung wiedergegeben. Die in Kap. 7.1.1 vorgestellten Teststreuungen werden als Bezugsgröße den Gesamtfahrzeugtests zugeordnet. Sowohl Komponententests als auch CAE-Analysen können bestenfalls im Rahmen der Teststeuerung von Gesamtfahrzeugtests liegen. Die Aufprallkurven sowie die Wertetabelle der gesamten Verifizierung sind in Anhang VII-A/B/C/D dargestellt.



Die Fahrzeugtests wie auch die Komponententests werden gemäß dem Richtlinienentwurf III/5021/96EN (vgl. Kap. 3.2.2 und Anhang II) in dem Testlabor von MIRA durchgeführt. Für die CAE-Analysen der Aufpralluntersuchungen werden der FEM-Code „Radioss“ Version 3.1 sowie verifizierte CAE-Impaktoren<sup>5</sup> verwendet.

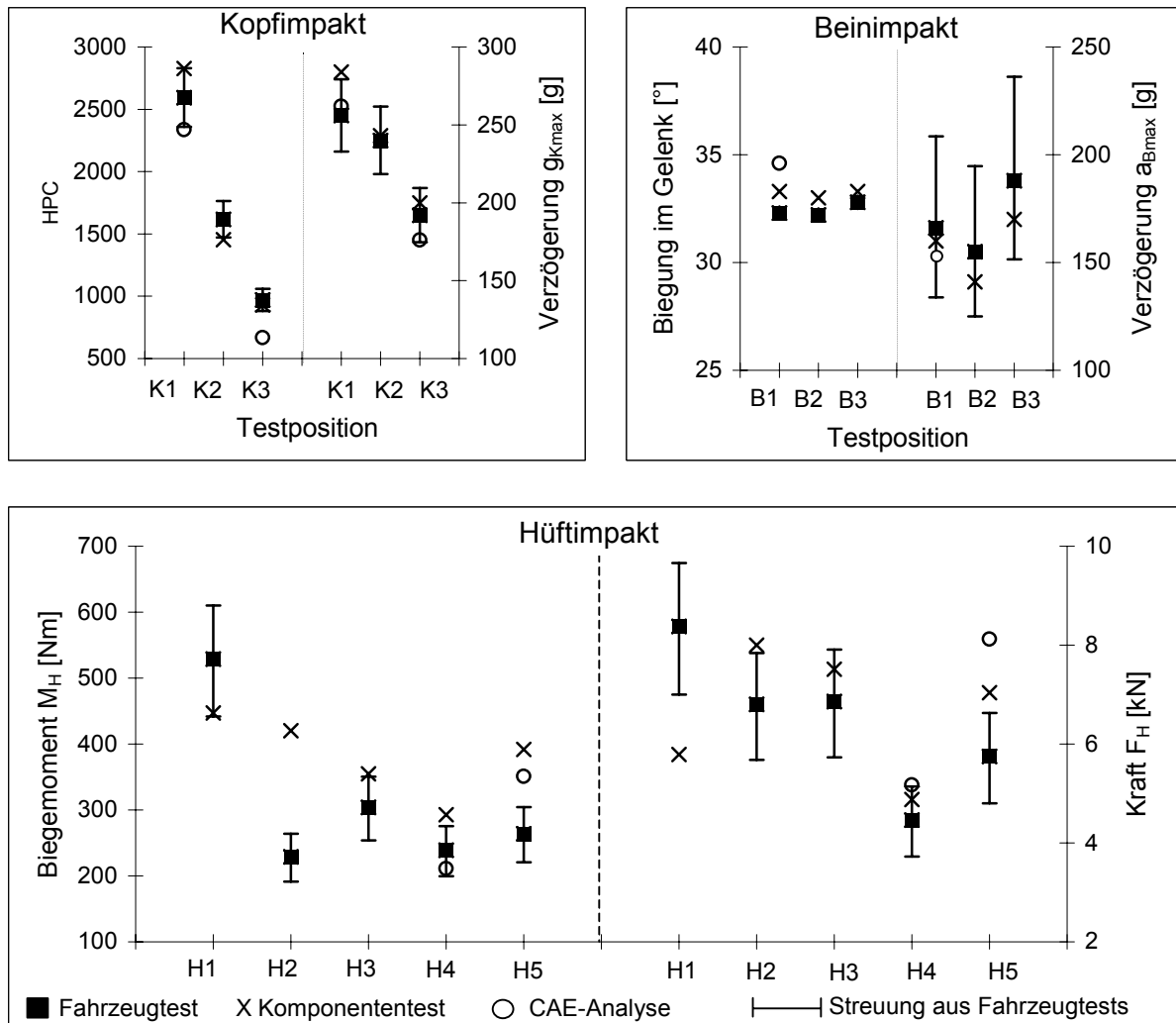


Abb. 7.8: Verifizierung der Komponententestvorrichtung für den Kopf-, Bein- und Hüftimpakt

Für den Kopfaufprall kann eine gute Übereinstimmung von Fahrzeug- und Komponententest für den HPC-Wert, den Verzögerungsmaximalwert und den charakteristischen Kurvenverlauf im Rahmen der erwarteten Teststreuung festgestellt werden. Das Abgleichen davon abweichender CAE-Ergebnisse (z.B. K3) ist durchführbar.

<sup>5</sup> Für diese Untersuchung wurden die offiziellen CAE-Impaktoren der Ford-Werke AG in Köln freigegebenen.

Es wird eine sehr gute Übereinstimmung des Beinaufpralls auf die Testvorrichtung und für das Gesamtfahrzeug beobachtet. Ebenfalls lassen sich die in Fahrzeugmitte durchgeführten FEM-Berechnungen sehr gut mit den Testergebnissen abstimmen.

Für den Hüftaufprall wird weder für die Biegemomente, die Summen- und Einzelkräfte noch für die Kurvenverläufe eine akzeptable Korrelation erzielt. Dieses gilt gleichermaßen für die Berechnung als auch die Komponententests. Aus diesem Grund werden zwei Testreihen (H1, H2, H3 sowie H4, H5) mit unterschiedlichen Pkw-Vorderwagen durchgeführt.

Die in Kap. 4.2 aufgeführten Unzulänglichkeiten der Hüftimpaktorprüfvorschrift werden durch die hier durchgeführten Testreihen bestätigt. Der effiziente Einsatz der Komponententestvorrichtung für Hüftaufpralluntersuchungen bedarf der Überarbeitung dieser Testvorschrift<sup>6</sup> sowie einer erneuten Verifizierung.

#### 7.4 Anwendung und Anwendungspotential

Aus der Testdurchführung mit dem „Ped Prot Testrig“ lassen sich folgende Anwendungsvorschriften ableiten:

- => Die Repräsentativität der zu testenden Bauteile muss sichergestellt werden.
- => Alle für das Deformationsverhalten notwendigen Bauteile müssen im Testaufbau berücksichtigt werden. Einzelne Bauteile können nur dann im Testaufbau vernachlässigt werden, wenn deren untergeordnete Rolle für das Gesamtdeformationsverhalten überprüft worden ist.
- => Zusätzliche Rahmenstrukturen als Befestigungshilfen müssen mit ausreichendem Abstand von den zu erwartenden Deformationsbereichen montiert werden.

Während der praktischen Erprobungsphase hat sich der „Ped Prot Testrig“ in seiner Bedienung - besonders durch die Vielfalt der Einstellmöglichkeiten - als weitestgehend problemloses Entwicklungswerkzeug bestätigt. Im Wesentlichen erscheint lediglich die Anbindung der Fahrzeugstrukturteile an die Testvorrichtung verbesserungswürdig. Die derzeitige Anbindung der Strukturteile durch Schweißoperationen an die oberen Träger muss als wenig vorteilhaft beurteilt werden.

---

<sup>6</sup> Die in WG17 (vgl. Kap.3.2.2) vorgestellten Änderungen der Hüftimpaktorvorschrift sind von dieser Untersuchung unberücksichtigt, da sie zum Zeitpunkt der Verifizierung der Testvorrichtung nicht bekannt waren.

Die Integration von Standardlochplatten oder Klemmvorrichtungen im oberen Träger zur einfacheren und flexibleren Montage von Fahrzeugkarosserieteilen kann die Effizienz der Testvorrichtung weiter erhöhen.

Neben dem geplanten Einsatzbereich in der Optimierungsphase zur Gestaltung „fußgängerfreundlicher“ Pkw-Vorderwagen sind weitere, vorteilhafte Anwendungsaspekte aufgefallen:

- => Grundsatzuntersuchungen im Bereich der Fußgängerkinematik mit unterschiedlichen Fahrzeugparametern
- => Alternative Komponententests (z.B.: Stoßfänger- oder Motorhaubentest)
- => Unterbringung von zusätzlichen Hochgeschwindigkeitskameras an üblicherweise unzugänglichen Stellen.

Der Einsatz der Komponententestvorrichtung für den Kopf- und Beinaufprall zeigt eine hohe Aussagequalität und Funktionalität. Es werden hierfür nur wenige Fahrzeugbauteile benötigt. Die Verifizierung von FEM-Berechnungen lassen sich effizient anhand von Komponenten durchführen. Da während der Entwicklung der Komponententestvorrichtung lediglich die unzulängliche Prüfvorschrift (vgl. Kap. 4.2) für den Hüftaufprall verfügbar war, kann die Komponententestvorrichtung hier ihren Nutzen nur bedingt unter Beweis stellen.

## 8 Ausblick - Zukunftsorientierter Entwicklungsprozess zur Gestaltung „fußgängerfreundlicher“ Pkw-Vorderwagen

Um zukünftig eine Entwicklung von „fußgängerfreundlichen“ Pkw-Vorderwagen zu unterstützen, lassen sich die in dieser Arbeit vorgestellten Werkzeuge und Methoden zu einem gesamtheitlichen Entwicklungsablauf kombinieren (Abb. 8.1). Hierbei haben einzelne Module bereits ihr Einsatzpotential unter Beweis gestellt und ein weiteres Zukunftspotential lässt sich abschätzen.

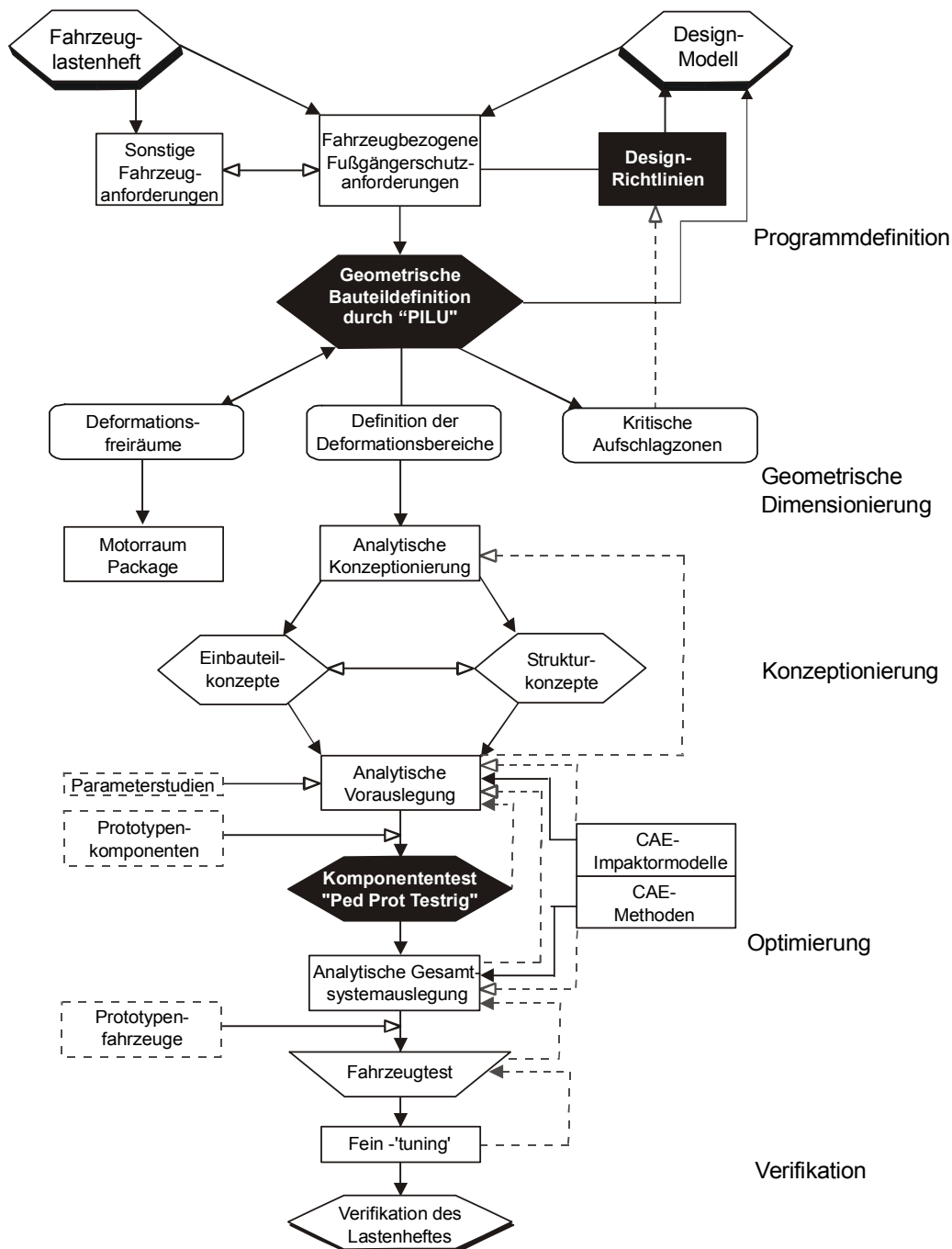


Abb. 8.1: Entwicklungsablauf zur Gestaltung „fußgängerfreundlicher“ Pkw-Vorderwagen

Während der Programmdefinition beschränkt sich das Zukunftspotential lediglich auf die sinnvolle Bereitstellung der Stylingrichtlinien in einem EPDM-System. Das weitaus höhere Potential liegt in der Phase der „geometrischen Dimensionierung“, in welcher PILU höhere Funktionalitäten zugeordnet werden können. Diese sind:

- Höhere Automatisierung der einzelnen Abläufe sowie Einbindung von PILU in eine integrierte CAD-Umgebung
- Integration der Design-Richtlinien in Form von interaktiver Mitteilung bei Verletzung der Richtlinien (alternativ: Vorschlägen verbesserter Designflächen)
- Bereitstellung von Deformationskurven mit parametrisierten, frei wählbaren Charakteristiken an Stelle von festen Werten (vgl. Abb. 6.9) für die Eindringung
- Individuelle Zuordnung von Deformationskurven (resp. festen Werten) für einzelne, typische Bereiche innerhalb einer Impaktzone (Abb. 8.2).

Durch die Vorgabe der Kurventypen mit entsprechenden Charakteristiken werden bereits in der frühen Phase der geometrischen Dimensionierung die abstrakten Angaben der Fußgängerschutzanforderungen in konkrete technische Vorgaben für die Konzeptionierung und Optimierung umgesetzt. Dieses kommt besonders für den Kopfaufprall zum Tragen.

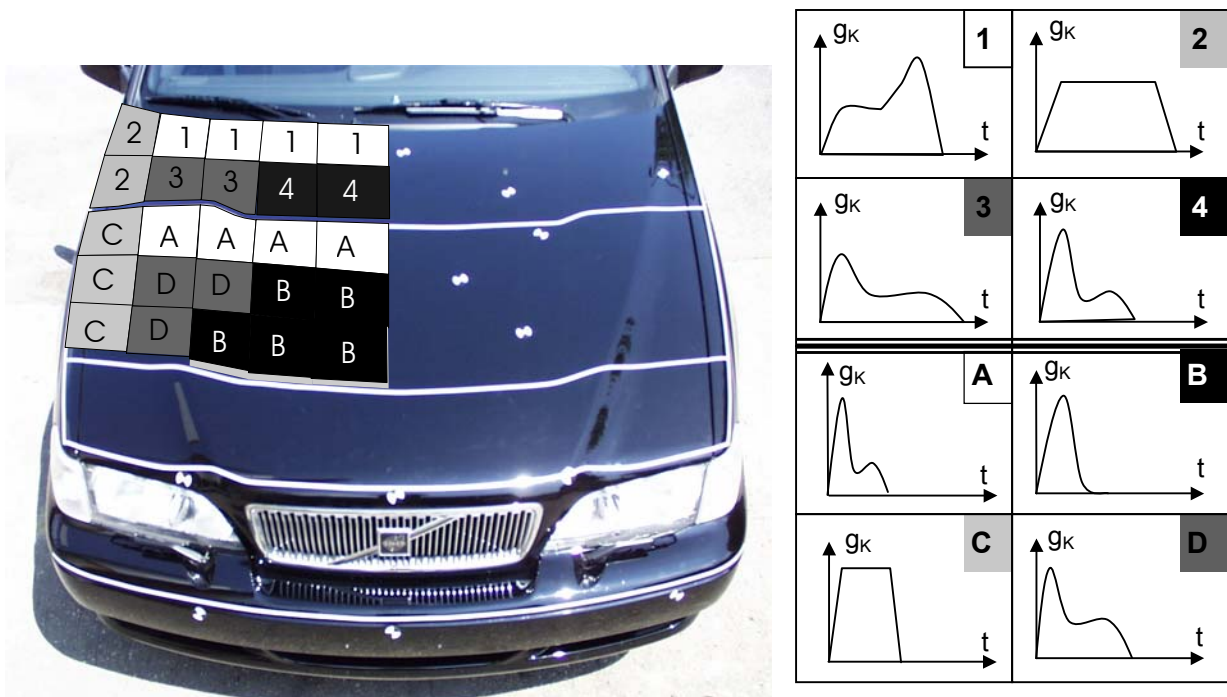


Abb. 8.2: Individualisierung der Impaktzonen durch Vorgabe von Kurvencharakteristiken innerhalb von PILU am Beispiel des Kopfaufpralls

Die Optimierung der einzelnen Bereiche mittels FEM erfolgt dann auf die typischen Kurven, bzw. auf deren Charakteristiken. Die Verwendung von Parameterstudien ist hierbei heute schon Stand der Technik. Die direkte Zuordnung der Kurvencharakteristiken zu Bauteil-konzepten oder Optimierungsvorschlägen lässt sich interaktiv gestalten. Deren Einbindung in eine sinnvolle Datenbankstruktur - bzw. in ein EPDM-System - erscheint dabei greifbar.

## 9 Zusammenfassung

In den westlichen Industrieländern nimmt die Anzahl verunglückter Fußgänger im Straßenverkehr ständig ab. Jedoch wird bei Verkehrsunfallarten ohne Beteiligung von Fußgängern ein noch schnellerer Rückgang verzeichnet. Daher ist für nationale, europäische wie auch weltweite Organisationen die Beurteilung der Fußgängeraufprallkompatibilität von Personenkraftwagen ins Rampenlicht gerückt. Federführend haben 1996 die Aktivitäten der EEVC („European Enhanced Vehicle-safety Committee) die detailliert ausgeführte Prüfvorschrift III/5021/96EN ins Leben gerufen. In diesem Richtlinienentwurf wird die Überprüfung der Kompatibilität von Pkw-Vorderwagen anhand von Einzelimpaktortests für den Kinderkopf-, Erwachsenenkopf-, Hüft- sowie Beinaufprall gefordert. Die Fahrzeugindustrie reagiert darauf mit einer Vielzahl von Lösungsansätzen für Fußgängerschutzmaßnahmen. Die Umsetzung in serientaugliche Detaillösungen ist dabei die große Herausforderung der Zukunft.

Ziel dieser Arbeit ist es, für die Produktentwicklungsbereiche, Werkzeuge und Methoden aufzuzeigen sowie fehlende Werkzeuge neu zu entwickeln, um eine zukünftige, serienorientierte Umsetzung von Fußgängerschutzmaßnahmen zu vereinfachen. Diese Werkzeuge und Methoden werden in einem strukturierten Entwicklungsablauf zur Verfügung gestellt.

So vielfältig die - in der Eigenbewegung uneingeschränkten - Formen des Fußgängeraufpralls auf den Pkw-Vorderwagen sind, so vielfältig sind auch die Lösungsansätze zur Verbesserung der Fußgängeraufprallkompatibilität bei Personenkraftwagen. Die Lösungsvarianten werden in dieser Arbeit in drei prinzipielle Gruppen strukturiert. Sowohl aktive, variable Systeme als auch passive, variable Systeme - beispielsweise Hauben-Airbags oder kinematisch geführte Motorhauben - fallen hierbei durch den hohen Aufwand an mechanischen und elektronischen Bauteilen auf. Permanente, starre Systeme hingegen werden durch Bauteile bzw. Bauteilgruppen gebildet, welche in ihrem Deformationsverhalten auf den Aufprall mit einem Fußgängerkörperteil abzielen. Eine zusätzliche Aktivierung ist nicht notwendig. Vor allem aufgrund der geringeren Teilekomplexität sowie der niedrigeren Kosten bergen die permanenten, starren Systeme (PSS) ein hohes Potential für den Einsatz im Serienfahrzeug. Sie liegen daher den folgenden Betrachtungen dieser Arbeit zugrunde.

Gesetzliche und kundenorientierte Anforderungen an die einzelnen Bauteile und Bauteilgruppen von Serienfahrzeugen stehen in einem hohen Zielkonflikt mit den Anforderungen an PSS. Die qualitative Beschreibung der Zielkonflikte verdeutlicht die hohe Notwendigkeit, den Umfang von Fußgängerschutzanforderungen genau festzulegen. Hierzu wird anhand von vier Erfüllungsstrategien sowie vier Erfüllungsstufen der prinzipielle Rahmen abgesteckt. Eine kritische Betrachtung der in III/5021/96EN vorgestellten Impaktorprüfvorschrift

sowie 75 nach Euro-NCAP öffentlich getestete Serienfahrzeuge bilden hierfür die Basis. Es werden für die einzelnen Fußgängerimpaktoren wesentliche Entwicklungsziele festgelegt.

Ein erweiterter Fahrzeugentwicklungsablauf zur Gestaltung „fußgängerfreundlicher“ Vorderwagen muss in der Lage sein, das Erreichen dieser Ziele zu unterstützen. Ausgehend von modernen Fahrzeugentwicklungen nach dem Prinzip der „Systementwicklung nach Zielsetzungen“ („Topdown“-Prinzip) werden die einzelnen Entwicklungsphasen analysiert und durch entsprechende Werkzeuge und Methoden für den passiven Fußgängerschutz ergänzt. Werkzeuge und Methoden, die im Lauf der letzten Jahre für die Entwicklung von Fußgängerschutzanforderungen bekannt geworden, sind sowie neue Werkzeuge für zwei ausbaufähige Entwicklungsphasen, lassen sich identifizieren. Für die Phase der Package- und Deformationszonenauslegung wird ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes CAE-Utility vorgestellt. Für die Phase der CAE-Komponentenverifizierung kommt es zur Entwicklung einer variablen Testvorrichtung.

Als Stand der Technik sind Design- und Konstruktionsrichtlinien sowie CAE-Impaktoren und CAE-Methoden hinreichend bekannt. Dabei lassen sich Designrichtlinien für den Fahrzeugvorbau in detailimmanente sowie formimmanente Designvorgaben unterscheiden. Die Designrichtlinien werden an einem Serienfahrzeug der Mittelklasse unter Aufzeigen der Zielkonflikte mit anderen Anforderungen angewendet. Des Weiteren werden konzeptionelle Konstruktionsrichtlinien für die Motorhaubenkonstruktion - basierend auf dem Patent des Autors (u.a.) - sowie für die deformationsoptimierte Gestaltung des Stoßfängers vorgestellt. Die Darstellung von CAE-Impaktoren sowie entsprechenden CAE-Methoden beschränkt sich in dieser Arbeit auf einen groben Überblick.

Das „Pedestrian Impactor Location Utility“ (PILU) ist ein CAE-Prognose-Werkzeug und unterstützt die frühe Phase der geometrischen Dimensionierung des Pkw-Vorderwagens. Während dieser Phase gilt es, Deformationsräume für die einzelnen Impaktoren, die geometrische Beschreibung und Position der Fahrzeugkomponenten sowie ein sich schnell änderndes Fahrzeugdesign in Einklang zu bringen. Aus der Analyse des Entwicklungsablaufes hat sich die Notwendigkeit herausgestellt, diesen Ablauf prinzipiell zu automatisieren sowie durch die Verwendung semi-empirischer Deformationszonen reproduzierbar zu machen. Es werden für die einzelnen Impaktoren auf semi-empirischem Weg die Deformationsräume bestimmt und als „Default“-Eingabeparameter dem Berechnungsmodul von PILU zur Verfügung gestellt. PILU selbst erzeugt die einzelnen Aufprallzonen und Eindringbereiche in mathematischer und graphischer Form. Die Anwendung sowie der Aufbau von PILU werden dargestellt und exemplarisch an einem Pkw-Vorderwagen der Mittelklasse getestet. Das Einsatzpotential von PILU wird an mehr als 15 Fahrzeugmodellen bestätigt. Es lässt sich darüber hinaus für PILU ein weitaus höheres Potential abschätzen. Neben der



weiteren Automatisierung von Abläufen - z.B. innerhalb einer virtuellen Entwicklungsumgebung – erscheint eine stärkere Interaktion zwischen Geometriebeschreibung der Fahrzeugkomponenten sowie der Charakterisierung von Deformationsbedingungen in der Zukunft sinnvoll.

Eine sehr wichtige Phase der Entwicklung von neuen Fußgängerschutzsystemen ist die Phase der analytischen Optimierung. Das sinnvolle Verifizieren von FEM-Analysen mit Testergebnissen liefert eine wichtige Basis für den kontinuierlichen Fortschritt in der Entwicklung. Der hierfür entwickelte Substitutionsprüfstand für Pkw-Vorderwagenkomponenten schafft die Möglichkeit, eine Vielzahl von einzelnen Bauteilkombinationen zu testen. Er zeichnet sich dabei durch eine hohe Variabilität aus. Es wird nachgewiesen, dass die Pkw-Vorderwagenstruktur zum größten Teil in Form einer starren Testvorrichtung dargestellt werden kann. Lediglich die direkt an der Deformation beteiligten realen Fahrzeugbauteile müssen an die variable Testvorrichtung montiert werden. Eine abschließende Verifizierung erfolgt anhand von Gesamtfahrzeugtests und wird durch FEM-Analysen gestützt. Für den Kopf- und Beinaufprall lässt sich der starre Substitutionsprüfstand sehr gut verifizieren. Die Verifizierung für den Hüftaufprall konnte nicht erbracht werden. Als ursächlich hierfür haben sich eine unzureichende Testvorschrift III/5021/96EN sowie Fehlkonstruktionen im Hüftimpaktor herausgestellt. Dieses wurde erst nach Abschluss der Untersuchungen auch in anderen Veröffentlichungen bestätigt [GRE98], [LAW98]. Entsprechende Verbesserungen in der Prüfvorschrift sowie in der Impaktorkonstruktion sind in letzter Zeit bekannt geworden.

Der integrative Ablauf der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Werkzeuge und Methoden wird im Ausblick behandelt. Er stellt den vernetzten Einsatz der Werkzeuge sowie Methoden in den einzelnen Entwicklungsphasen dar.

## 10 Literaturverzeichnis

- [AIS80] The Abbreviated Injury Scale (1980 Revision), Committee on Injury Scaling of the American Medical Association, AAAM and SAE, Morton Grove, Illinois, 1980
- [APH78] APPEL, H.: Kraftfahrzeug mit Einrichtung zum Dämpfen des Aufpralls eines Fußgängers, Offenlegungsschrift 2711339, Sep/1978
- [APP76] APPEL, H.; KÜHNEL, A.: Ein Sicherheitsfahrzeug für Fußgänger und Insassen - ein Widerspruch, 2. Jahrestagung VDI-Gesellschaft Fahrzeug-Technik, S.421-447, 1976
- [APP78] APPEL, H.: Kraftfahrzeug mit Einrichtung zum Dämpfen des Aufpralls eines Fußgängers, Offenlegungsschrift 2711338, Sep/1978
- [APP81] APPEL, H.: Das Sicherheitskonzept des Forschungs-Pkw UNI-CAR, VDI Bericht Nr. 418, S.123-130, 1981
- [APP83] APPEL, H.; KÜHNEL, A., et al: Realization of Pedestrian Protection Measures on Cars, P121, SAE 830051, Detroit (Mi), Feb/1983
- [APP84] APPEL, H.: Fußgängersicherheit - Fahrzeugtechnische Maßnahmen in Einzelfällen, FAT, Schriftenreihe Nr.42, S.43-69, Okt/1984
- [ASH78] ASHTON, S.J.: Cause, nature and severity of the injuries sustained by Pedestrian struck by the fronts of the cars or light goods vehicles, 'Thesis' der Universität Birmingham, 1978
- [ASH79] ASHTON, S.J.; MACKAY, M.: Car Design for Pedestrian Injury Minimisation, 7<sup>th</sup> ESV-Conference, Paris, 1979
- [ASH81] ASHTON, S.J.: Factors associated with pelvis and knee injuries in pedestrians struck by the fronts of cars, 25<sup>th</sup> Stapp Car Crash Conference, San Francisco (CA), Sept/1981
- [BAM94] BAMBERG, R.; ZELLMER, H.: Nutzen durch fahrzeugseitigen Fußgängerschutz, Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Fahrzeugtechnik, Heft 5, Apr/1994
- [BAS82] BASt (Bundesanstalt für Straßenwesen): Abschlußbericht - Erhebung am Unfallort, Forschungsprojekt 7263 / 7506, BASt, 1982

- [BEZ79] BEZ, U.; HOEFS, R.: The V-shaped Vehicle Front - Its Influence on Injury Severity in Pedestrian Accidents and Side Collisions, SAE 796048, 7<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Paris, Jun/1979
- [BEZ89] BEZ, U.; et al: Endeinheit, vorzugsweise Bugpartie eines Kraftfahrzeugs, Deutsches Patent DE 29 22 893, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Jan/1989
- [BRO86] BROOKS, D.; WIECHEL, J.: Reconstruction of Real World Pedestrian Impact, SAE Int. Congress and Exposition, Detroit, (Mi), SAE 860210, 1986
- [BRO98] BROWN, G.: Issues in the Development of Pedestrian Friendly Bumper Systems, Stoßfängersysteme von Kraftfahrzeugen – Visionen für die zukünftige Entwicklung, Tagung im Haus der Technik, Esslingen, Apr/1998
- [CES96] CESARI, D; FONTAINE, H.; LASSARE, S.: The Validity of the Proposed European Pedestrian Protection Procedure and its Expected Benefits, 15<sup>th</sup> ESV Conference, Melbourne, Australia, 1996
- [CHA96] CHANG, D.C.; et al: Role of Synthesis, Analysis & Simulation in Engineering a Complex System: The Automotive Vehicle Engineering Systems ASME, DSC-Vol.60, New York, S87 ff, 1996
- [CHN96] CHANG, D.C.; et al: Synthesis, Analysis & Simulation: A Key Enabler of Concurrent Product System Engineering, Auto Tech PSE '96 in Beijing, 1996
- [CON94] CONSTANTINO, C.; GILES, A.R.; GREEN, J.F.: Modelling of EECV Pedestrian Headform and Experience with Bonnet Impact Tests, Paper No S7 O 04, 1994
- [DAN79] DANNER, M.; LANGWIEDER, K.; E.G.: Injuries to Pedestrian in Real Accidents and their Relation to Collision and Car Characteristics, HUK Verband, 23rd Stapp Car Crash Conference, San Diego (CA), Okt/1979
- [DAV97] DAVIES, R.; CLEMO, K.: Study of Research into Pedestrian Protection, Cost and Benefits, Projekt Report No. 97- 456502, MIRA (The Motor Industry Research Association), Watling Street, Nuneaton, Warwickshire, England, 1997
- [DOE99] DÖDLBACHER, G.: Der Karosserieentwicklungsprozess – Status und Ausblick, Tag der Karosserie, Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen, Okt/1999
- [DOR02] DORE, E.S.: Stoßfängersystem für Kraftfahrzeuge, Deutsche Patentschrift, Nr. 134042, 1902

- [DOW91] DOWNING, A.J.: Pedestrian Safety in Developing Countries, Intern. Conf. on Traffic Safety, New Delhi, India, Jan/1991
- [EAM00] EATON, M.: Euro-NCAP Testergebnisse für Phase 1 bis 7; EuroNCAP Partnership, 50 Rue d'Arlon, B-1000 Bruxelles, Belgium, Aug/2000
- [ECE00] ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE, GENEVA: Statistics of Road Traffic Accidents in Europe and North America, Jahresbuch 2000 für das Ausland, ISBN 92-1-016344-3, 2000
- [EEV82] EUROPEAN EXPERIMENTAL VEHICLES COMMITTEE: Pedestrian Injury Accidents, SAE 826074; 9<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Kyoto, Japan, Dez/1982
- [EEV85] EUROPEAN EXPERIMENTAL VEHICLES COMMITTEE: Pedestrian Injury Protection by Car Design. SAE 856112, 10<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Oxford, England, 1985
- [EEV94] EUROPEAN EXPERIMENTAL VEHICLES COMMITTEE: EEVC Working Group 10 Report - Proposal for Methods to Evaluate Pedestrian Protection for Passenger Cars, Brüssel, Nov/1994
- [EUN00] [www.euroncap.com](http://www.euroncap.com): Homepage von Euro-NCAP, Dez/2000
- [EUR00] [www.europa.eu.int/comm/eurostat](http://www.europa.eu.int/comm/eurostat): Homepage von eurostat, Organisation für die Verwaltung europäischer Statistiken innerhalb der europäischen Union, Dez/2000
- [FBE97] BECKER, F.: Entwicklung eines Verfahrens zur Projektion des Richtlinienentwurfes der Working Group 10, ‚Pedestrian Protection‘ der EEVC auf einen Pkw-Vorderwagen anhand der CAD-Konturdaten, Studienarbeit der RWTH Aachen, S. 26 – 35, Okt/97
- [FIN74] FINCH, P.M.: Vehicle Compatibility in Car-to-Car Side Impacts and Pedestrian-to-Car Frontal Impacts, SAE 746057, 5<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, London, GB, Dez/1974
- [FOR98] FORET-BRUNO, J.-Y.; RAVERJON, G.; et al: Injury Pattern of Pedestrians Hit by Cars of Recent Design, 16<sup>th</sup> International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, S. 2122 – 2130, SAE 98-S10-O-02, Jun/1998
- [FRE00] FRIEDEL, B.; KALLISKE, I.: Schutz von Fußgängern bei Kollisionen mit Fahrzeugen, Verkehrssicherheit, Band 41, Heft 7/8, S.35-37, 2000

- [FRI99] FRIESEN, F.; PHILLIPS, M.: Untersuchungen zum Fußgängerschutz und Optimierung von Kraftfahrzeugen im Rahmen des Testverfahrens der EEVC-WG10, VDI Bericht 1471, S. 43-61, VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik, Tagung Berlin, Okt/1999
- [FRI00] FRIESEN, F.: Fußgängerschutz – Anforderung an die Kompatibilität von Kraftfahrzeugen, VDI Nachrichten Konferenz „Sicherheit im Automobil“, 7./8. November 2000 in Bamberg, Nov/2000
- [GEA79] GEAGAUF, E.M.; NIGGLI, E.: Das Fußgängerunfallgeschehen in der Stadt Zürich 1978/79, Zürich, Jun/1978
- [GER91] GERONDEAU: Report on the High Level Expert Group for an European Policy for Road Safety, EEC Brüssel, Feb/1991
- [GLA95] GLAESER, K.P.: Der Anprall des Kopfes auf die Fronthaube von Pkw beim Fußgängerunfall, Dissertation, Herausgeber: BASt, Fahrzeugtechnik Heft F4, 1995
- [GRE89] GROESCH, L.: Experimental Simulation of Car/Pedestrian and Car/Cyclist Collision and Application of Findings in Safety Features on the Vehicle, SAE International Congress and Exposition, Detroit (Mi), SAE 890751, 1989
- [GRE98] GREEN, J.: A Technical Evaluation of the EEVC Proposal on Pedestrian Protection Test Methodology, 16<sup>th</sup> International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, S. 2145 – 2151, SAE 98-S10-O-04, Jun/1998
- [GRI99] GRIBOV, I.: Fahrzeug mit Luftkissen oder Luftsack, Offenlegungsschrift DE19744817 A1, Apr/1999
- [GRO89] GROESCH, L.: Bumper Configurations for conflicting requirements - Existing Performance versus Pedestrian Protection, SAE 896152, 11<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Goteborg (S), 1989
- [GUM98] GUMERY, X.: Procédé de protection des piétons en cas de choc frontal avec un véhicule automobile et dispositif de mise en œuvre du procédé, Europäisches Patent EP 0926018 A1, Peugeot, Nov/1998
- [HA85] HARRIS, J.: Simplified Test Recommendations for Pedestrian Protection. 10<sup>th</sup> International Congress on Experimental Safety Vehicles, Oxford (GB), SAE 856119, Dez/1985
- [HAA76] HAAR, R.: Sicherheitseinrichtung am Fahrzeug zum Schutz von Fußgängern, Offenlegungsschrift 24 54 389, Volkswagen AG, Mai/1976

- [HAP99] HAPPEE, R.; KANT, A.R.; et al: Passenger Car Pedestrian Friendliness. Evaluation of Proposed EEVC Subsystem Test Procedures by Mathematical Simulation, Bericht-Nr. 98.OV.BV.033.1/RHA; TNO Road-Vehicle Research Institute, Schoemakerstraat 97, 2600 JA Delft, Niederland, Feb/1999
- [HAR76] HARRIS, J.: Research and Development towards Improved Protection for Pedestrian Struck by Cars, 6<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Washington, D.C., SAE 766068, 1976
- [HAR82] HARRIS, J.; FOWLER, J.E.: Practical Vehicle Design for Pedestrian Protection, 9<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Kyoto, Japan, SAE 826030, 1982
- [HAR85] HARRIS, J.: The Influence of Car Design on Pedestrian Protection, 10<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Oxford, England, SAE 856116, 1985
- [HAR89] HARRIS, J.: A Study of Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection for Cars, 12<sup>th</sup> International Technical Congress on Experimental Safety Vehicles, Göteborg (S), SAE 896146, Dez/1989
- [HEG81] HEGER, A.; APPEL, H.: Reconstruction of Pedestrian Accidents with Dummies and Cadavers, 8<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Washington, DC, DOT HS-805555, 1981
- [HEL90] HELLHAKE, F.; RIECHERS, J.: Stoßschutzvorrichtung für Fahrzeuge, Patentschrift DE 30 035 68 C2, Daimler-Benz AG, Dez/1990
- [HNS00] HNSO: Road Accidents Great Britain 1999 - The Casualty Report, DOT, 2000
- [HOB85] HOBBS, C.A.; LAWRENCE, G.J.L.; et al: PSC1 - a Demonstration Car with Improved Pedestrian Protection, SAE 856011, 10<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Oxford, England, 1985
- [HOE92] HÖHN, B.-R.: Sicherheitseinrichtung für ein Kraftfahrzeug, Offenlegungsschrift DE 4114016, Nov/1992
- [HOM99] HOWARD, M; THOMAS, A.: Eine integrierte Methode für wirklichkeitsgetreue Forschung im Bereich Fußgängerschutz, Aachener Kolloquium – Fahrzeug- und Motorentchnik Vol.2, S. 1051-1060, Okt/1999
- [HOW78] HOWARD, B.; PRITZ, H.: Comparison of the Dynamik Response of Antropometric Test Devices and Human Anatomic Specimens in Experimental Pedestrian Impact, SAE 780894, P-77, 1978

- [HOW92] HOWARD, M.; et al: Vehicle Bonnets, europäisches Patent EP 0 509 690 A1, Jaguar Cars Limited, Okt/1992
- [HOW96] HOWARD, M.: Vehicle Bonnets, europäisches Patent EP 0 630 801 B1, Jaguar Cars Limited, Nov/1996
- [HUL00] HULAND, K.-W.: PUR-Stoßfängerkonzept zum Fußgängerschutz, S. 18-20, mobiles, Fachzeitschrift der FH Hamburg, Nr. 25, Jubiläumsausgabe, 2000
- [ISH91] ISHIKAWA, H.; YAMAZAKI, K.: Current situation of pedestrian accident and research into pedestrian protection in Japan. 13th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Paris, France, SAE 916037, Nov/1991
- [ISO97] ISO – INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION: Passenger cars and light commercial vehicles - Pedestrian protection - Impact test method for pedestrian leg and knee, ISO/SC10/WG2, Draft #12, Mrz/1997
- [ISO98] ISO – INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION: Passenger cars and light commercial vehicles - Pedestrian protection - Impact test method for head, ISO/SC10/WG2, Draft, Jan/1998
- [ITA00] ITARDA: Institute for Accident Research and Data Analysis of Japan; Traffic Accident Statistics Annual Report 1999, ITARDA, 2000
- [JEW96] JEWETT, D.: Auto Makers Nearing Goal of 2 Years Car, Automotive News 10/98, S.41ff, Okt/1996
- [KAL99] KALLISKE, I.: Das EEVC-Prüfverfahren für den Fußgängerschutz und dessen praktische Anwendung, S.1033-S.1051, Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik, Aachen 4.-6./Okt/1999
- [KAW99] KAWAI, A.; KOMATSU, M.; et al: Car Body Structure, United States Patent 5.927.786, Jul/1999
- [KEG85] KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINDE: Frontal Surfaces in the Event of Impact with a Vulnerable Road User. Ad-hoc Working Group ERGA Passive Safety, document ERGA S/60, Brüssel, 1985
- [KEG96] KOMMISSION DER EUROPÄISCHEN GEMEINDE: III / 5021 / 96 EN - Proposal for a European Parliament and Council Directive, Relating to the Protection of Pedestrian and Other Road Users in the Event of a Collision with a Motor Vehicle and Amending Directive 70/156/EEC, Brüssel, Feb/1996
- [KEL98] KELLER, S.; WOLF, J.: Energieabsorbierende Schaumstruktur, Deutsche Offenlegungsschrift DE19810871 A1, 1998

- [KES87] KESSLER, J.W.: Development of a Countermeasures to Reduce Pedestrian Head Injury. SAE Paper 876102, 11<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Göteborg (S), Dez/1987
- [KLI90] KLIE, W.; et al: Stoßfänger für ein Kraftfahrzeug, Deutsche Patentschrift DE 36 39 195 C2, Daimler-Benz AG, Apr/1990
- [KON00] KONOSU, A.; ISHIKAWA, H.; KANT, R.: Development of Computer Simulation Models for Pedestrian Subsystem Impact Tests, JSAE Review 21 (2000), S.109-115, JSAE20004024, 2000
- [KON71] KONDO, M.; HIGUCHI, K.; E.G.: Some Results of Vehicle-Pedestrian (Dummy) Collision Test Made Recently in JARI, JARI Technical Memorandum No.3, 1971
- [KRA77] KRAMER, M.: Berechnung der Verletzungsschwere in Fußgänger-Fahrzeug-Unfällen, der Verkehrsunfall, Heft 6, S.117 ff, Jun/1977
- [KRA81] KRAMER, M.: Verbesserter Fußgängerschutz - Verringerung der Schwere des Kopfaufschlages gegen die Fronthaube von Audi 100-Fahrzeugen, Automobiltechnische Zeitung (ATZ), Heft 83, S. 61 ff., 1981
- [KUE75] KUEHNEL, A.: Die Beeinflussung des Fahrzeug - und Straßenaufpralls eines Fußgängers beim Zusammenstoß Fahrzeug - Fußgänger durch konstruktive Maßnahmen am Kraftfahrzeug - Zusammenfassung, Saopstenja Nauka i Motorna Vozila, Belgrad, Vol. 2, S.201 ff, 1975
- [LAW87] LAWRENCE, G.J.L.; HARRIS, J.: Car to Pedestrian Impact and there Application to Sub-System Testing, 11<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Washington DC, SAE 876103, 1987
- [LAW89] LAWRENCE, G.J.L.: The Influence of Car Shape on Pedestrian Impact Energies and its Application to Sub-System Tests, 12<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Goteborg, (S), SAE 896151, 1989
- [LAW93] LAWRENCE, G.J.L; HARDY, B.J.; E.G.: Cost and Benefits of the EEVC Pedestrian Impact Requirement, Project Report 19, Transport Research Laboratory (TRL), Crowthorne, Berkshire, RG11 6AU, GB, 1993
- [LOJ93] LOWELL, JON: Big Three Product Development: The Game has changed. Faster Cycle Times, Improved Efficiency and Quality are the Goals. Wards Auto World, S. 79 ff, Jul/1993



- [LAW98] LAWRENCE, G.J.L.; HARDY, B.: Pedestrian Safety Testing Using The EEVC Pedestrian Impactors, 16<sup>th</sup> International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, S. 2131 – 2144, SAE 98-S10-O-03, Jun/1998
- [LUC81] LUCCHINI, E.; WEISSNER, R.: Unterschiede in Bewegungsablauf und Belastung zwischen angefahrenen Erwachsenen und Kindern; Ergebnisse von Dummy-Versuchen, der Verkehrsunfall, Heft 6, Jul/1981
- [MAE85] MAEDA, K.; ISOBE, H.: Research Concentrated on an Experimental Method for Protecting Pedestrians, 10<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Oxford, England, SAE 856115, 1985
- [MAL87] MACLAUGHLIN, T.F.: NHTSA's Advanced Pedestrian Protection Program. SAE 876100, 11<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Washington DC, USA, 1987
- [MAL90] MACLAUGHLIN, T.F.: Pedestrian Head Impact against the Central Hood of Motor Vehicles - Test Procedure and Results. SAE 902315, P-236, Orlando (Florida), Nov/1990
- [MAR73] MARUMO, N.; MEADA, T.: Outline of the Nissan ESV, Report on the 4<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Kyoto, Japan, Mrz/1973
- [MAS85] MAESTRIPIERI, L.: Experimental Research on Pedestrian using a Mobile Deformable Barrier, 10<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Oxford, England, SAE856114, 1985,
- [MAT76] MATSUMOTO, R.; et al: Protection of Pedestrian, 16<sup>th</sup> International Congress of FISITA, Tokyo, Japan, SAE 765041, Mai/1976
- [MAT98] MATSUI, Y.; ISHIKAWA, H.; et al: Validation of Pedestrian Upper Legform Impact Test – Reconstruction of Pedestrian Accidents, 16<sup>th</sup> Int. Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, S. 2152 – 2167, SAE 98-S10-O-05, 1998
- [MAT99] MATSUI, Y.; ISHIKAWA, H.; et al: Pedestrian Injuries Induced by the Bonnet Leading Edge in Current Car-Pedestrian Accidents, SAE 1999-01-0713, SP-1432, Occupant Protection, 1999
- [MEI86] MEIXNER, R.: Kraftfahrzeugdach, insbesondere für Personenkraftwagen, Offenlegungsschrift DE3441602 A1, Mrz/1986
- [MOR98] MAROUS, J.R.; et al.: Development of a Non-frangible Pedestrian Legform Impactor, 98-S10-O-06, 16<sup>th</sup> International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Windsor, Canada, Jun/1998

- [MYU97] MYUNGEUN, C.: System for Minimizing Automobile Collision Damage, United States Patent 5646613, Jul/1998
- [NHS00] NHTSA: FARS (Fatal Accident Reporting System), Data Collectors der NHTSA, 400 Seventh Street, S.W. Washington, D.C. 20590, Aug/2000
- [NHT00] NHTSA: GES (General Estimates System), Data Collectors der NHTSA, 400 Seventh Street, S.W. Washington, D.C. 20590, Aug/2000
- [OKA94] OKAMOTO, Y.; E. G.: Concept of hood design for possible Reduction in Pedestrian Head Injury, 14<sup>th</sup> International Technical Conference On the Enhanced Safety Vehicles, SAE No. 94-S7-W14, München, Mai/1994
- [OTA97] OTANI, A.: Emergency Air-Bag Device for Automobile, Japanische Patent Publikationsnr. 09164906, B60R 21/34, B60R 19/20, Jun/97
- [OTT84] OTTE, D.; SUREN, E.G.: Der Fußgängerunfall aus statistisch-verkehrsmedizinischer Sicht, FAT, Schriftenreihe Nr.42, S.43 ff, Okt/1984
- [OTT90] OTTE, D.: Unterschiede im Verletzungsbild verunfallter Fußgänger zwischen Einscheiben- und Verbundsicherheitsglas, i.A. der BAST, MMH Hannover, 1990
- [OTT91] OTTE, D.: Die Bedeutung des Beulenversatzes am Pkw in der Rekonstruktion des Fußgängerunfalls, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Heft 7/8, S.21 ff, Aug/1991
- [OTT95] OTTE, D.: Influence of the Fronthood Length for the Safety of Pedestrian in Car Accidents and Demands to the Safety of Small Vehicles, 38th Stapp Car Crash Conference Proceedings, SAE 942232 (P-279), 1995
- [OTT96] OTTE, D.: Einfluß der Fahrzeugfrontgeometrie auf die Verletzungssituation von verunfallten Fußgängern - eine Auswertung aus Erhebungen am Unfallort, MMH Hannover i. A. der BAST, Apr/1989
- [OTU98] OTUBUSHIN, A.; GREEN, J.: An Analytical Assessment of Pedestrian Head Impact Protection, 98-S10-W-17, 16<sup>th</sup> International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Windsor, Canada, Jun/1998
- [OTU99] OTUBUSHIN, A.; HUGHES, D.: Analysis of Pedestrian Head Impacts to the Bonnets of European Vehicles, International Journal of Crashworthiness, Vol 4 No 2, S. 159-174, 1999
- [PDG95] PDGS: Product Design Grafic System, Users Manual, Ford Werke AG Köln, Jan/1995

- [PHI99] PHILIPPS, M.; HOWARD, M.: FE-Simulation von Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen, Automobiltechnische Zeitung (ATZ) 101 7/8, S.506-509, 1999
- [PHL99] PHILIPPS, M.; FRIESEN, F.: Versuch und FE-Simulation zur Optimierung von Fahrzeugfronten hinsichtlich Fußgänger-Kollisionen, Aachener Kolloquium – Fahrzeug- und Motorentechnik Vol.2, S. 1061-1077, Okt/1999
- [POR75] PORSCHE: Ausfahrbare Fangvorrichtung für Fußgänger, Patentschrift P 2514 952.4/951.3, Dr. Ing.h.c. F.Porsche AG, Mai/1975
- [PRE83] PRITZ, H.B.: Experimental Investigation of Pedestrian Head Impacts on Hoods and fenders of Production Cars, SAE 830055 (P-121), SAE Kongress, Detroit, 1983
- [PRI79] PRITZ, H.B.: Vehicle Design for Pedestrian Protection, SAE 796063, 7<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Paris, France, Jun/1979
- [PRI83] PRITZ, H.P.; PREIRA, J.M.: Pedestrian Hip Impactor Development and Hood Edge Location, 27th Stapp Car Crash Conference, San Diego, CA, USA, SAE 831627 (P-134), 1983
- [PRI97] PRITZ, H.B. (NHTSA): Persönliche Kommunikation, Nov/1997
- [PRO76] PROTZE, D.: OFFENLEGUNGSSCHRIFT: Sicherheitseinrichtung am Fahrzeug zum Schutz von Fußgängern, Offenlegungsschrift 24 55 258, Volkswagen AG, Mai/1976
- [REI96] REITZ, J.: Konstruktive Maßnahmen an der Fahrzeugfront eines Personenkraftwagens zur Verbesserung des Fußgängerschutzes, Diplomarbeit der RWTH Aachen, Jul/1996
- [REJ87] REINER, J.; DAHM, H.: Frontscheinwerfer für Kraftfahrzeuge, Patentschrift DE3728752C1, Aug/1987
- [RIC80] RICHARDSON, F.G.: Pedestrian Protection and Damageability and the Calspan Research Safety Vehicle, SAE 806071, 8. International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Wolfsburg, 1980
- [ROD88] RODEWALD, H.-L.: Technologie eines weichen, leichten, serienfähigen Frontends für PKW, Kunststoffe, Heft 78, S.237 ff, 1988
- [ROT97] ROETH, T.: Bestimmen eines Fußgängeraufpralls auf ein Fahrzeug, Deutsche Patentschrift DE 197 18 803 C1, Ford Werke AG, Mai/97

- [ROT99] ROETH, T.; et al: Motorhaube für Kraftfahrzeuge zum Schutze von Fußgängern, Europäisches Patent, 99121009.7-2306, Ford Werke AG, Okt/1999
- [SAK93] SAKURAI, M., et al.: Experimental Consideration on Headform Impact Test for Pedestrian Protection. SAE 930095 (SP-945), SAE Kongress, Detroit, Mrz/1993
- [SAK94] SAKURAI, M., et al.: Evaluation of Pedestrian Protection Test Procedure in Japan. 94-S7-O-01, 14<sup>th</sup> International Technical Conference on Enhanced Safety of Vehicles, München, Mai/1994
- [SAK98] SAKAI, A.; YOSHIOKA, M.: Front Upper Structure of Automotive Vehicle, United States Patent 5.706.908, Jan/1998
- [SBS88] SCHULLER E.; BEIER, G.; SPANN, W.: Kriterien für die Prüfung von Schutzhelmen für motorisierte Zweiradfahrer, Bast Bericht, FP 2.8718,1988
- [SBU00] STATISTISCHES BUNDESAMT: Verkehr, Fachserie 8, Reihe 7, Verkehrsunfälle 1999, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, Sep/2000
- [SCH00] SCHREIBER, H.; MEER, O.: Maßsynthese vier-, sechs-, und achtgliedriger ebener Kurbelgetriebe – Anwendungen in Kfz-Karosserien, VDI-Bericht Nr. 1567, S.277-297, VDI-Getriebetagung Kurvengetriebe, Koppelgetriebe, gesteuerte Antriebe, Jul/2000
- [SCH95] SCHÖNEKÄS, A.; HEINE, S.: Literatur- und Versuchsauswertung zur rechnerischen Simulation von Fußgängerunfällen - Rechnerische Simulation von Fußgängerunfällen, Studienarbeit Nr. 1/95 und 2/95 (FG7) der TU Berlin, Aug/1995
- [SCH98] SCHÖNPFLUG, M: Anordnung einer Frontklappe an einem Fahrzeug, Offenlegungsschrift DE19712961 A1, BMW AG, München, Okt/1998
- [SCH99] SCHÖNPFLUG, M.: Windschutzscheibenrahmen mit einer Sicherheitseinrichtung, Offenlegungsschrift DE19803165A1, BMW AG, München, Jul/1999
- [SCI00] SCHILLING, R.; PAAS, M.; et al: Numerische Analysen zum Einsatz neuer Werkstoffe in der passiven Sicherheit, VDI Bericht Nr. 1559, Tagung „Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau“, S.318-320, Sep/2000
- [SCM93] SCHMIDT, W.: Kraftfahrzeug, insbesondere Personenkraftwagen, mit nachgiebigen Karosseriefrontteilen, Offenlegungsschrift DE 29 34 060 A1, Daimler-Benz AG, Mrz/1993
- [SCN95] SCHNEPPENHEIM, J.: Fußgängerschutz durch konstruktive Maßnahmen am PKW, Diplomarbeit, FH Köln, Bereich „Fahrzeugtechnik“, Aug/1995

- [SCW89] SCHWUCHOW, N.; et al: Kraftfahrzeug, insbesondere Personenkraftwagen, Deutsche Patentschrift DE 30 47 969 C2, Mercedes-Benz AG, Jan/1989
- [SCW95] SCHWUCHOW, N.; et al: Kraftfahrzeugvorbau, Deutsches Patent DE 42 27 529 C1, Mercedes-Benz AG, Mrz/1995
- [SIN24] SINGER, J.; WORTMANN, B.: Fangvorrichtung an Kraftfahrzeugen, Deutsche Patentschrift, Nr. 422259, Mai/1924
- [SIN95] SINNHUBER, R.: Geplantes europäisches Gesetz zum Fußgängerschutz, Haus der Technik, Essen, Tagungs-Nr. E-30-945-056-5, Nov/1995
- [SIN99] SINNHUBER, R.: Airbageinrichtung für ein Kraftfahrzeug, Offenlegungsschrift DE19745873A1, Apr/1999
- [STA98] STAINES, B.; SCHUSTER, P.: Determination of Bumper Styling and Engineering Parameters to Reduce Pedestrian Leg Injuries, SAE 980361, 1998
- [STC79] STCHERBATCHEFF, G.: Pedestrian Protection - Special Features of the Renault E.P.U.R.E., SAE 796060, 7<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Paris, Jun/1979
- [STG76] STÜRTZ, G.; SUREN, E.G.: Kopfverletzungen und Todesursache äußerer Verkehrsteilnehmer, der Verkehrsunfall, Heft 2, Feb/1976
- [STG87] STÜRTZ, G.; REINER, J.; et al: Lamp Unit for Vehicles, United States Patent 4.644.477; Feb/1987
- [STR99] STRIDE, K.J.: Pedestrian Impact Sensor System, Internationales Patent EP 0952046A2 Apr/1999
- [TNO94] TNO: Headform Impactors User Documentation, TNO Crash Safety Research Centre, Schoemakerstraat 97, P.O. Box 6033, 2699JA Delft, Netherlands, Jan/1994
- [WG1798] EEVC WORK GROUP 17: Improved Test Methods to Evaluate Pedestrian Protection Afforded by Passenger Cars, Abschlussbericht der EEVC WG17, Dez/1998
- [WIS89] WISSUSSEK, D.; MORAWSKI, J.: Verzögerungseinrichtung mit Hohlprofilen für Schlittenaufprallversuche, ATZ – Automobiltechnische Zeitschrift, 91(1989) Nr.4, S.199-204, 1989
- [WIS94] WISSUSSEK, D.: Recyclinggerechtes Konstruieren im Pkw-Bau, TM -Technische Mitteilungen 87 (1994) Heft 3, S.135 – 142, 1994

- [WIS97] WISSUSSEK, D.: Recyclinggerechtes Konstruieren am Beispiel eines Pkw-Stoßfängersystems, TM -Technische Mitteilungen 90 (1997) Heft 3, S.118-127, 1997
- [WOO88] WOOD, D.: Impact and Movement of Pedestrians in Frontal Collision with Vehicles, Proc. Inst. Mech. Eng., D 202, Vol. 2, S.101 ff, 1988
- [YM99] YASUHIRO, M.; ISHIKAWA, H.: Pedestrian Injuries Induced by the Bonnet Leading Edge in Current Car-Pedestrian Accidents, International Congress and Exposition, Detroit, Michigan, SAE 1999-01-0713, 1999
- [YOS99] YOSHIDA, S.; IGARASHI, N.; et al: Development of a Vehicle Structure with Protective Features for Pedestrians, SAE 1999-01-0075, SP-1442, Mrz/1999
- [ZEL94] ZELLMER, H.; GLAESER, K.-P.: The EEVC-WG 10 Head Impact Test Procedure in Practical Use, 14<sup>th</sup> International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, München, 1994, SAE, 94S7003, Mai/1994

## 11 Formelverzeichnis

$\alpha_{Bmax}$	Maximale Biegung im Gelenk in °
$\beta_H$	Impaktoraufprallwinkel der Hüfte in °
$\beta_{Kx}$	Impaktoraufprallwinkel für den Kopf in ° (x=K: Kinderkopf; x=E: Erwachsenenkopf)
$\varepsilon$	Böschungswinkel in °
$\lambda$	Haubenneigungswinkel in °
$\psi$	Sichtfeldwinkel in °
$a_B$	Beinverzögerung in g (Erdbeschleunigung)
$a_{B1/2}$	1. und 2. Verzögerungspeak während Beinaufprall in g
$a_{Bmax}$	Maximale Beinverzögerung in g (Erdbeschleunigung)
$AV$	Abwickellänge des Vorderwagens in mm
$AV_{EK}$	Abwickellänge des Vorderwagens „Erwachsenenkopf“ in mm
$AV_{KK}$	Abwickellänge des Vorderwagens „Kinderkopf“ in mm
$E_{eff}$	Energieeffizienz
$E_H$	Aufprallenergie Hüftimpaktor in J
$E_U$	Energiedissipation durch Hüftimpaktor in J
$Z_{1...x}$	Deformationsbauteile
$F_{1...x}$	Deformationscharakteristiken 1,2,...,x
$F_B$	Reaktionskraft auf Beinimpaktor in kN
$F_H$	Reaktionskraft auf Hüftimpaktor in kN
$F_{Hh/w}$	Hüft-Summenkraft für harten / weichen Aufprall in kN
$F_{Hmax}$	Maximale Summenkraft Hüftimpaktor in kN
$g_K$	Kopfverzögerung in g
$g_{Kh/w}$	Kopfverzögerung für harten / weichen Aufprall in g
$g_{Kmax}$	Maximaler, erster Verzögerungspeak in g für den Kopfaufprall
$HK_H$	Haubenkantenhöhe in mm
$HK_R$	Haubenkantenrückversatz in mm
$K_o$	Kühleröffnung oben in mm
$K_u$	Kühleröffnung unten in mm
$m_B$	Masse des Beinimpaktors in kg
$m_{EK}$	Masse Erwachsenenkopfimpaktor in kg
$m_{KK}$	Masse Kinderkopfimpaktor in kg
$m_H$	Masse des Hüftimpaktors in kg
$m_{HV}$	Vor den Kraftaufnehmern montierte Hüftimpaktorteilmasse in kg
$M_H$	Biegemoment des Hüftimpaktors in Nm
$M_{Hmax}$	Maximales Biegemoment des Hüftimpaktor in Nm
$P_{o/u}$	Pendelschlagüberlappungen oben/unten in mm

$r_{g_{Kmax}}$	Toleranzband für $g_{Kmax}$
$r_{HPC}$	Toleranzband HPC-Wert
$S_B$	Beineindringung in mm
$S_H$	Hüfteindringung in mm
$S_k$	Kopfeindringung in mm
$S_H$	Stoßstangenhöhe in mm
$SP_H$	Spoilerhöhe in mm
$SP_R$	Spoilerrückversatz in mm
$t_{max}$	Zeitpunkt zu dem $g_{Kmax}$ auftritt [ms]
$U_{Bmax}$	Maximale Knieverschiebung in mm
$V_B$	Beinaufprallgeschwindigkeit in km/h
$V_H$	Hüftaufprallgeschwindigkeit in km/h
$V_K$	Kopfaufprallgeschwindigkeit in km/h
$X_{KE}$	Deformationsfreiraum für Erwachsenenkopf in mm
$X_{KK}$	Deformationsfreiraum für Kinderkopf in mm
$Z_{Hh/w}$	Vorderwagenbewegung in z-Richtung für harten / weichen Hüftaufprall [mm]
$Z_{Kh/w}$	Vorderwagenbewegung in z-Richtung für harten / weichen Kopfaufprall [mm]



## 12 Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ACEA	Verband der europäischen Automobilindustrie
AIS	Abbreviated Injury Scale
ASV	Advanced Safety Vehicle
AV	Abwickellänge
AVS	Aktive, variable Systeme
B <sub>1,2,...x</sub>	Beinaufprallstelle
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen Deutschland
BSH	Bezugslinie seitliche Haubenkante
Buck	Teilkarosserie
BVH	Bezugslinie vordere Haubenkante
BVS	Bezugslinie Vorderkante Stoßfänger
CAD	Computer Added Design
CAE	Computer Added Engineering
C <sub>w</sub>	C <sub>w</sub> -Wert = Luftwiderstandsbeiwert
D	Deutschland
D <sub>1,2,3</sub>	Deformationskonzept für Spoiler
EA	Energieabsorbierender Schaum
ECE	Economie Commission for Europe
EEVC	European Enhanced Vehicle-safety Committee
EG	Europäische Gemeinschaft
EPDM	Electronic Product Data Management
Erw.	Erwachsener
ESV	Experimental Safety Vehicle
EU	Europäische Union
Euro-NCAP	Euro - New Car Assessment Program
EVH	Endpunkte vordere Haubenkante
EVS	Endpunkte Vorderkante Stoßfänger
F	Frankreich
FARS	Fatal Accident Reporting System
FEM	Finite Element Methode
FFF	Modifiziertes „fußgängerfreundliches“ Fahrzeug
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standard
FORS	Office of Road Safety / Australien
Fzg.	Fahrzeug
GB	Großbritannien
GES	General Estimates System
H <sub>1,2,...x</sub>	Hüftaufprallstelle
HIC	Head Injury Criterion
HPC	Head Performance Criterion
I	Italien

I/O	In / Out
IHRA	International Harmonised Research Activity
ILP	Impactor Location Program
ILU	Impactor Location Utility
INRETS	Institut National de Recherche sur le Transports, et Leur Sécurité, Frankreich
ISO	International Organisation for Standardization
J1	Job1 / Serienproduktionsstart
JAMA	Verband der Japanischen Autoindustrie
JARI	Japan Automobile Research Institute
JSAE	Society of Automotive Engineers of Japan
K <sub>1,2,...,x</sub>	Kopfaufprallstelle
LAB	Labor
MAIS	Major Abbreviated Injury Scale
max	Maximal
MIRA	Motor Industry Research Association / Testlabor in GB
Mrd	Milliarden
n.e.	Nicht existent
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
NL	Niederlande
o.G.St.	Obere Grenzstreuung
OF	Originalfahrzeug
PB	Programmbestätigung
PDGS	Product Design Graphic System
Ped Prot	Pedestrian Protection (Fußgängerschutz)
PF	Programmfestlegung
PILU	Pedestrian Impactor Location Utility
Pkw	Personenkraftwagen
PSA	Peugeot – Citroén Unternehmensgruppe
PSS	Permanente, starre Systeme
PV	Programm Vorbereitung
PVS	Passive, variable Systeme
PZ	Prototypenzulassung
r / l	Rechts / links
resp.	Respektive
RSV	Research Safety Vehicle
S	Schweden
SAE	Society of American Engineers
SM24	Corporate North American Bumper Standard
SO	„Sign Off“
TE	Themenentscheidung

---

TNO	Niederländische Organisation für angewandte, wissenschaftliche Forschung
TRL	Transport Road Research Laboratory – Großbritannien
Tsd	Tausend
u.G.St.	Untere Grenzstreuung
u.U.	Unter Umständen
UK	Vereinigtes Königreich
vgl.	Vergleiche
W+WR	Windschutzscheibe und Windschutzscheibenrahmen
WG	Working Group

		Fußgänger				Personen		Pkw		Einwohner (x1000)
		durch Pkw		im Straßenverkehr		im Straßenverkehr		Bestand (x1000)	gefahrte km pro Jahr	
		getötet	verletzt	getötet	verletzt	getötet	verletzt			
Deutschland	1999	574	27.545	983	39.312	7.772	521.127	42.324	12.600	82.000
	1995	823	30.061	1.336	42.453	9.454	512.141	40.404	12.733	81.539
	1980	2.068	40.897	3.720	64.089	15.050	540.916	25.869	11.496	78.306
GB	1999	543	33.180	771	39.674	2.553	277.422	25.212	15.076	57.800
	1995	763	39.172	1.038	45.991	3.621	306.885	22.505	14.925	56.800
	1980	1.217	44.952	1.941	61.358	6.010	322.590	14.722	14.604	54.400
USA	1999	2.441	57.000	4.906	85.000	41.611	3.236.000	126.869	19.873	272.691
	1995	3.126	65.000	5.585	84.000	41.798	3.232.000	123.242	19.500	264.349
	1988	4.267	90.000	6.870	110.000	47.087	3.416.000	121.519	16.672	245.785
Japan	1999	1.461	51.358	2.571	80.808	9.006	1.050.397	51.401	8.320	126.686
	1995	1.646	48.199	2.987	81.068	10.679	922.677	44.923	9.060	125.034
	1980	1.404	53.220	2.767	96.174	8.760	598.719	23.660	10.107	117.060

		Getötete Fußgänger durch Pkw				Verletzte Fußgänger durch Pkw			
		pro 100Tsd. Einwohner	pro 1Mrd. km	pro 100Tsd. Pkw	pro getötete Verkehrsteiln. [%]	pro 100Tsd. Einwohner	pro 1Mrd. km	pro 100Tsd. Pkw	pro verletzte Verkehrsteiln. [%]
Deutschland	1999	0,7	1,08	1,36	7,39	33,59	51,65	65,08	5,29
	1995	1,01	1,60	2,04	8,71	36,87	58,43	74,40	5,87
	1980	2,64	6,95	7,99	13,74	52,23	137,52	158,09	7,56
GB	1999	0,94	1,43	2,15	21,27	57,40	87,29	131,60	11,96
	1995	1,34	2,27	3,39	21,07	68,96	116,62	191,04	12,76
	1980	2,24	5,66	8,27	20,25	82,63	209,08	305,34	13,93
USA	1999	0,89	0,97	1,92	5,87	20,90	22,64	44,93	1,76
	1995	1,18	1,32	2,54	7,48	24,59	27,30	52,74	2,01
	1988	1,74	2,11	3,51	9,06	36,62	44,43	74,06	2,63
Japan	1999	1,15	3,42	2,84	16,2	40,54	120,09	99,92	4,89
	1995	1,32	4,04	3,66	15,41	38,55	118,42	107,29	5,22
	1980	1,20	5,87	5,93	16,03	45,46	222,56	224,94	8,89

Abb. A-1: Fußgängerunfallstatistik für Deutschland, Großbritannien, USA und Japan [SBU00], [HNS00], [NHT00], [NHS00], [ITA00]

## Anhang II-A

### Referenzlinien und Aufprallbereiche für die einzelnen Impaktoren

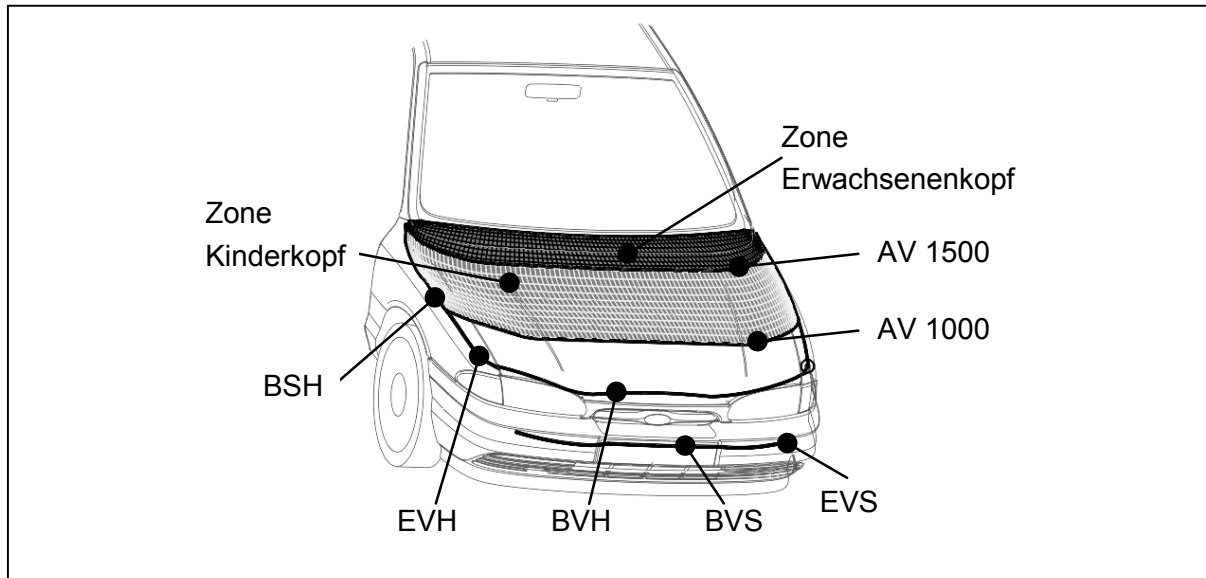


Abb. A-2: Referenzlinien und Aufprallbereiche

#### Beinaufprall :

BVS von linkem EVS zum rechten EVS

#### Hütaufprall :

BVM von linkem EVM zu rechtem EVM

#### Zone für den Kinderkopfaufprall :

=> AV 1000m bis AV 1500m

=> Linke BSH bis rechte BSH

#### Zone für den Erwachsenenkopfaufprall :

=> AV 1500m bis AV 2100m (bzw. bis maximal hintere, untere Scheibenrahmenkante)

=> Linke BSH bis rechte BSH

#### Anmerkungen:

- Für BVS / EVS / BVH / BSH / EVH werden Messlatten mit vorgegebener Länge an der Außenkontur der Karosserie entlanggeführt.

- Zur Bestimmung der Abwicklungslänge ( AV ) wird ein flexibles Maßband entlang verschiedener, konstanter Längskoordinaten des Vorderwagens gespannt.

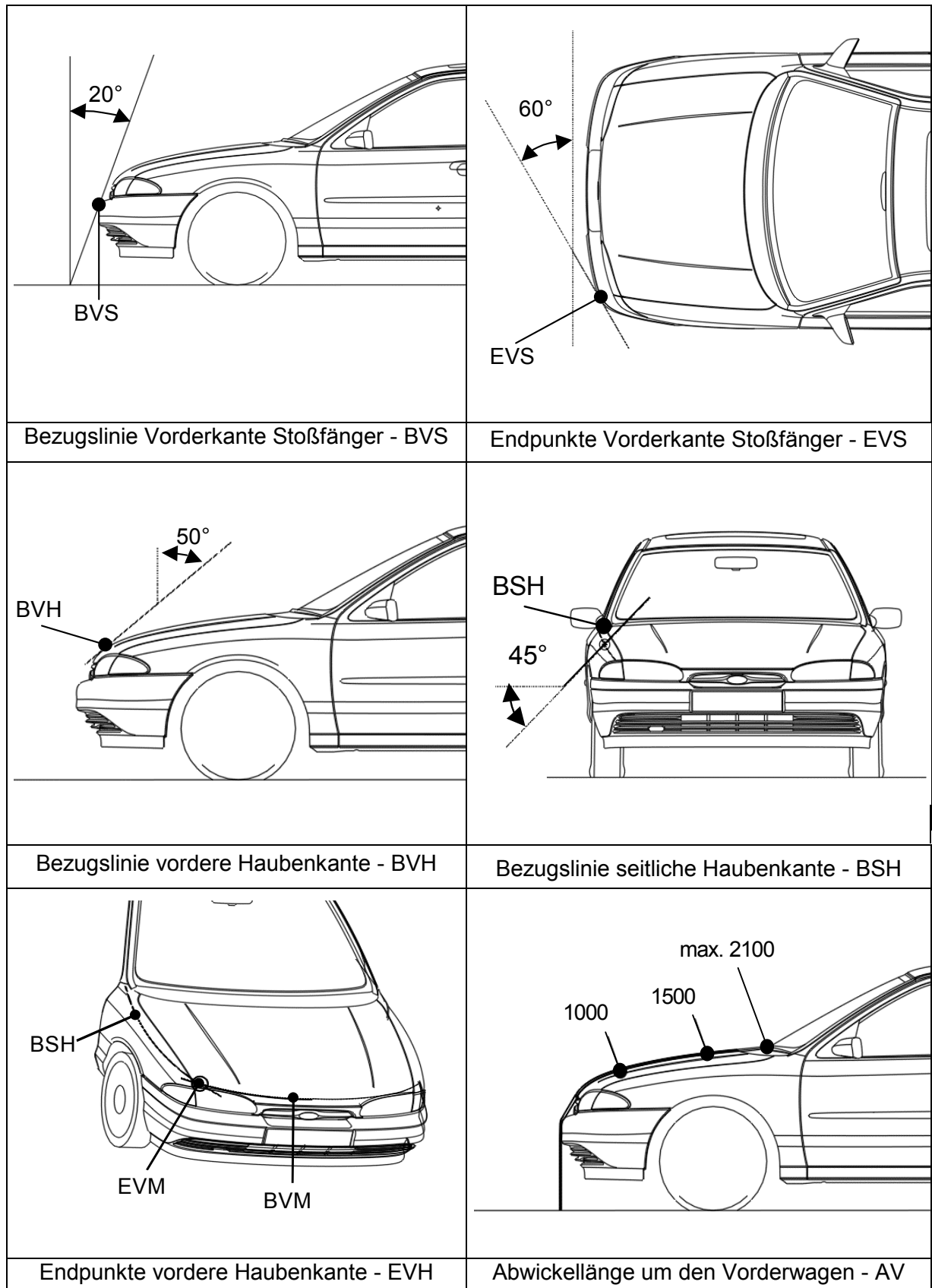


Abb. A-3: Geometrische Bestimmung der Referenzlinien [KEG96], [WG1798]

## Anhang II-B

### Aufbau der Fußgängerimpaktoren

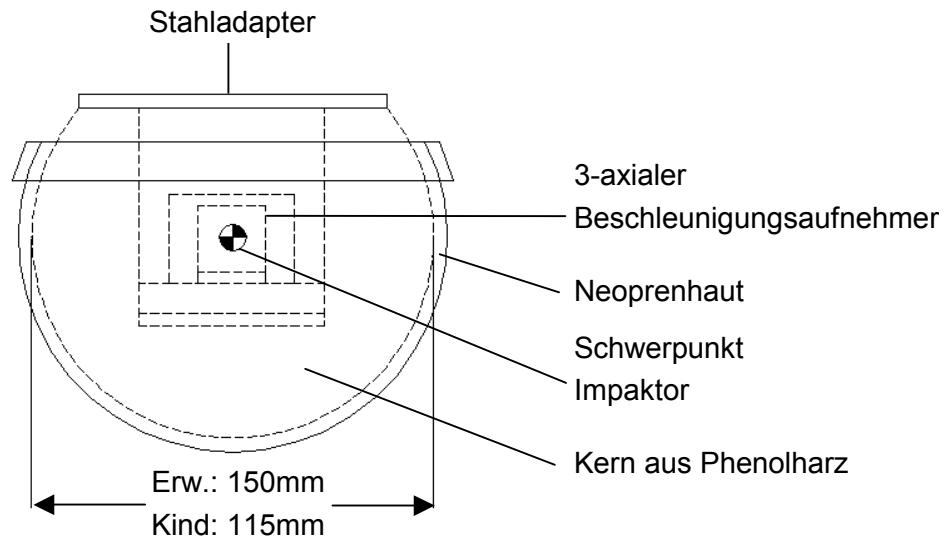


Abb. A-4: Konstruktion des Kopfimpaktors gemäß III/5021/96 EN [TNO94]

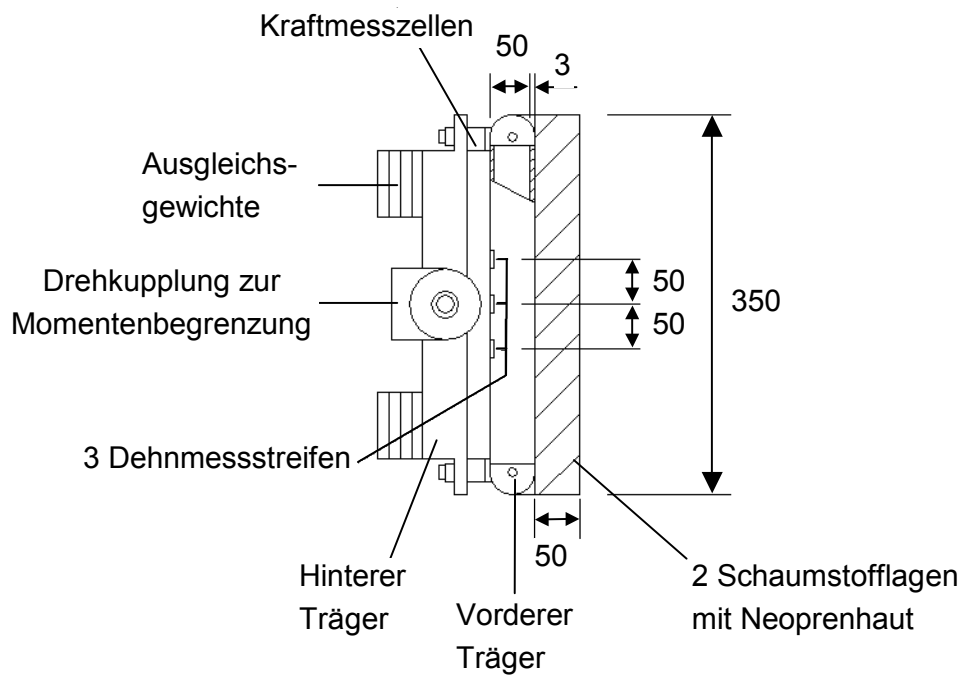


Abb. A-5: Konstruktion des Hüftimpaktors gemäß III/5021/96 EN

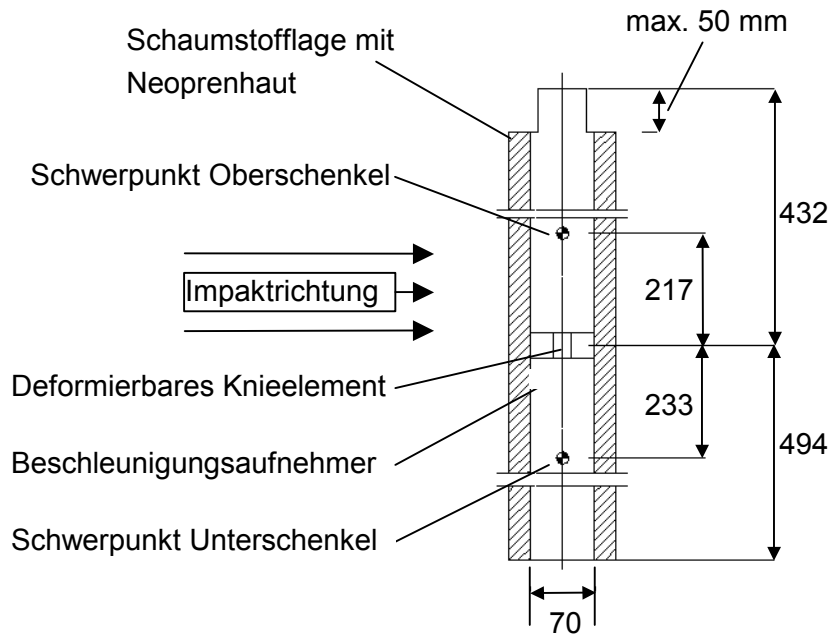


Abb. A-6: Konstruktion des Beinimpaktors gemäß III/5021/96 EN



**Anhang II-C: Abhängigkeit des Hüftaufpralls von der Fahrzeuggeometrie**

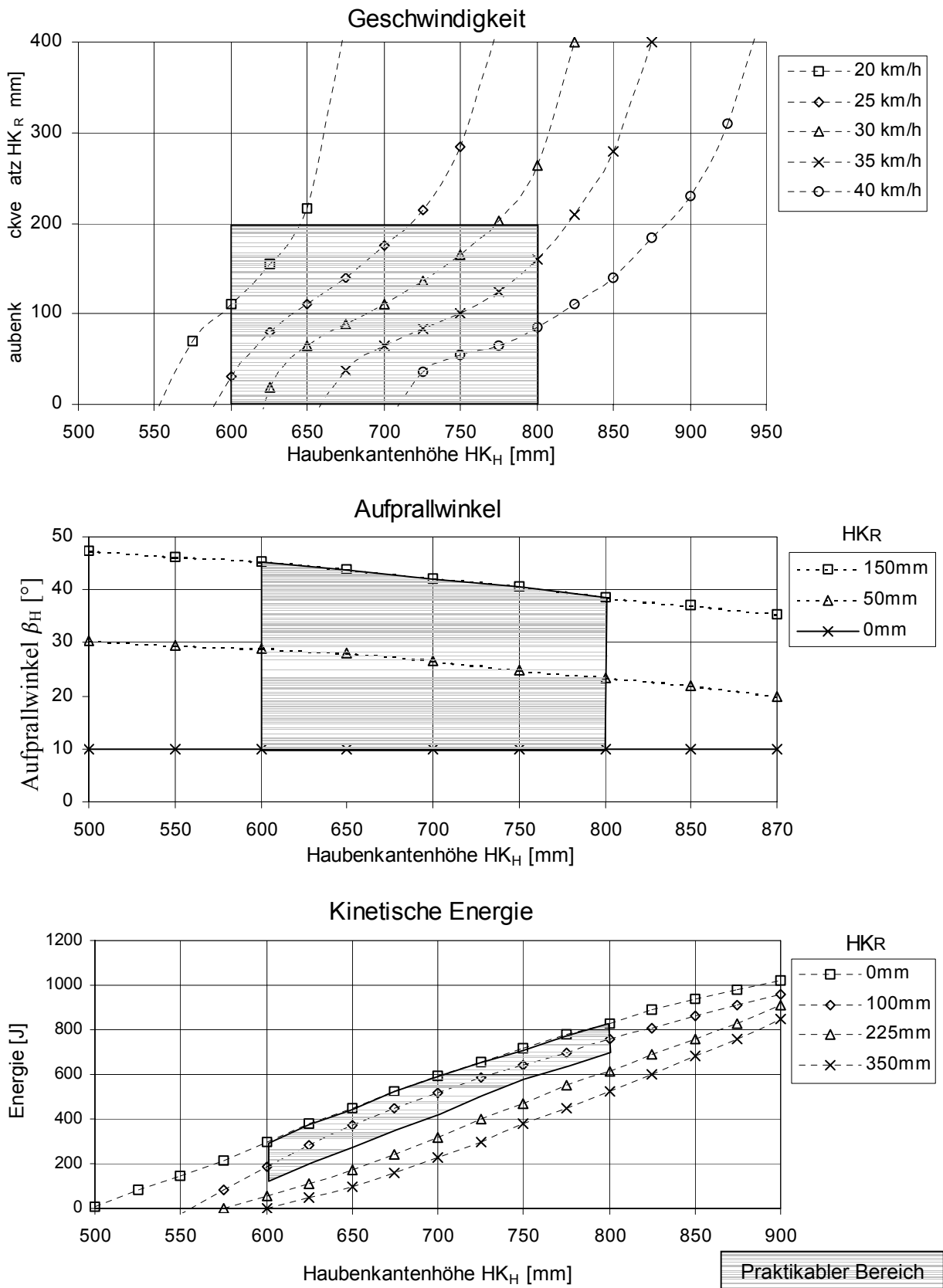


Abb. A-7: Aufprallgeschwindigkeit, -winkel und -masse des Hüftimpaktors in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeometrie (HK<sub>H</sub> und HK<sub>R</sub>)

## Anhang VI-A: Ablaufdiagramm für PILU

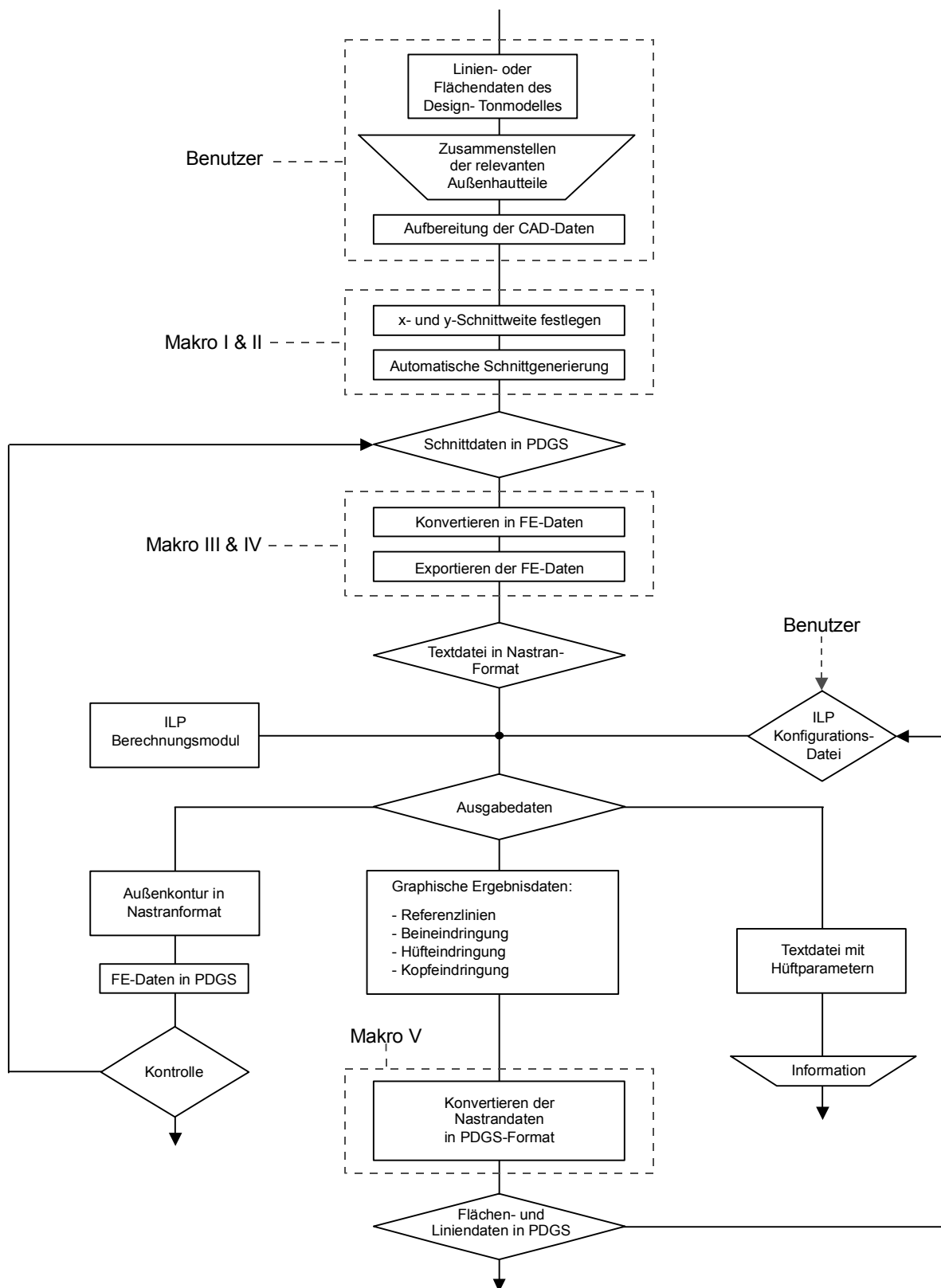


Abb. A-8: Ablaufdiagramm für PILU

## Anhang VI-B: Konfigurationsdatei von PILU

```

*****
***      PEDESTRIAN-PROTECTION PARAMETER      ***
*****

Corner-of-Bumper: Angle [degrees] = 60.0
Bumper-Reference-Line: Angle [degrees] = 20.0
Bumper-Reference-Line: Minimum height [mm] = 0.0
Bumper-Reference-Line: Length of straight edge [mm] = 700.0

Bonnet-Reference-Line: Angle [degrees] = 50.0
Bonnet-Reference-Line: Minimum height [mm] = 600.0
Bonnet-Reference-Line: Length of straight edge [mm] = 1000.0

Side-Reference-Line: Angle [degrees] = 45.0
1. Wrap around distance [mm] = 1000.0
2. Wrap around distance [mm] = 1500.0
3. Wrap around distance [mm] = 2100.0

Legform impactor: Height [mm] = 926.0
Legform impactor: Radius [mm] = 66.0

Upper-Legform impactor: Length [mm] = 350.0
Upper-Legform impactor: Radius [mm] = 75.0
Upper-Legform impactor: Min. mass [kg] = 9.5
Upper-Legform impactor: Max. mass [kg] = 17.7

Child-Headform impactor: Diameter [mm] = 130.0
Adult-Headform impactor: Diameter [mm] = 165.0
Child-Headform impactor: Angle [degrees] = 50.0
Adult-Headform impactor: Angle [degrees] = 65.0

file extention 'Contour' = „_Contour“
file extention 'Reference lines' = „_RefLines“
file extention 'Bumper offset' = „_BumperOffset“
file extention 'Hip offset' = „_HipOffset“
file extention 'Bonnet offset' = „_BonnetOffset“

----- User defined values -----

Energy Efficiency for leg impactor [%] = 70.0
Limit for leg impactor deceleration [g] = 150
Energy Efficiency for hip impact [%] =75.0
Limit for hipp impactor force [kN] = 4.0
Intrusion of child head impactor [mm] = 50.0
Intrusion for adult head impactor [mm] = 70.0

Ground-Reference-Level: X1 [mm] = 1747.0
Ground-Reference-Level: Z1 [mm] = 206.0
Ground-Reference-Level: X2 [mm] = 4451.0
Ground-Reference-Level: Z2 [mm] = 190.0

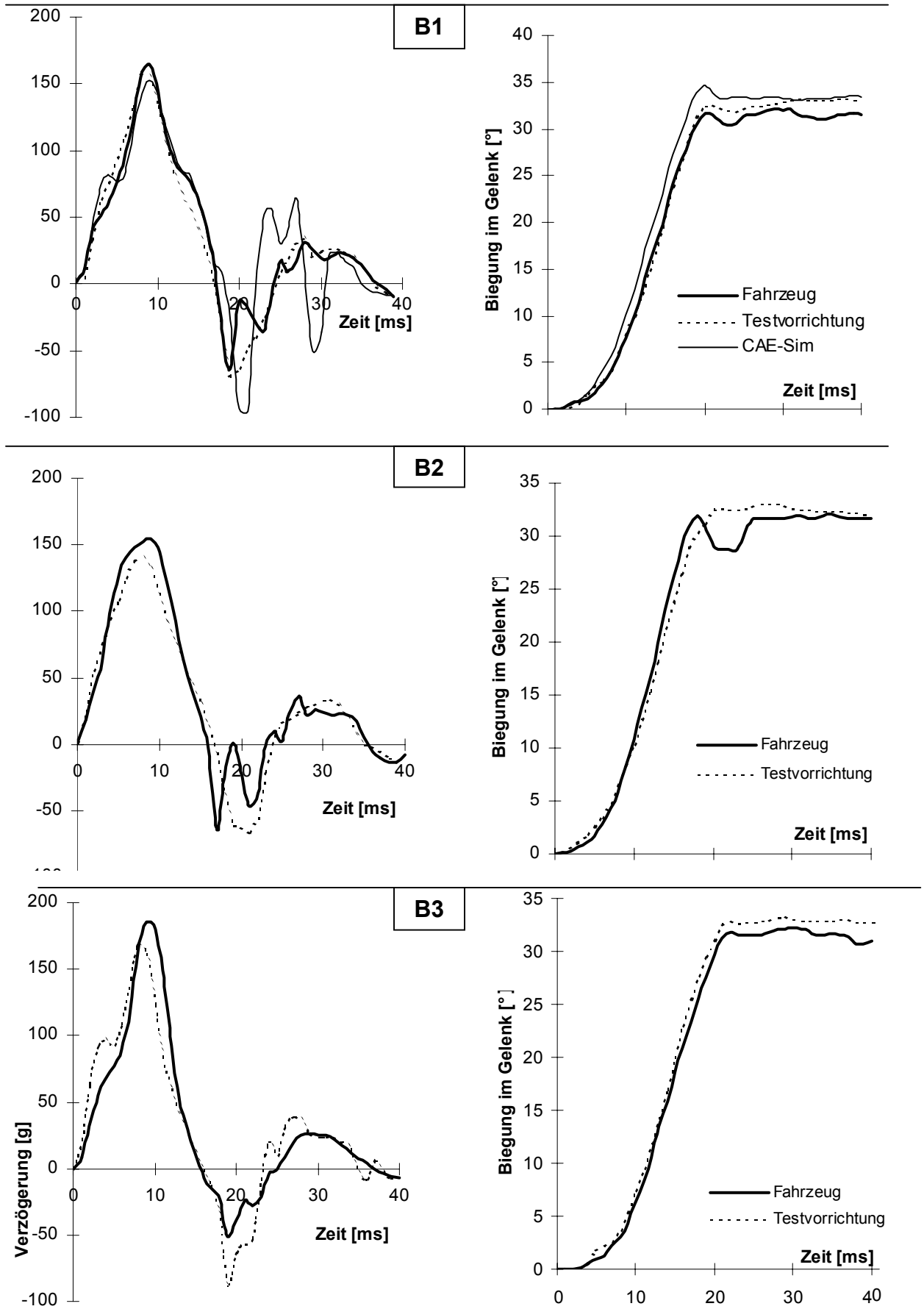
Create zero-Y-cut [0 or 1] = 0
Input path = „../E1/“
Input file 'X-cuts' = „E1“
Input file 'Y-cuts' = „E1“

Output path = „../E1/“
Output file = „E1“

```

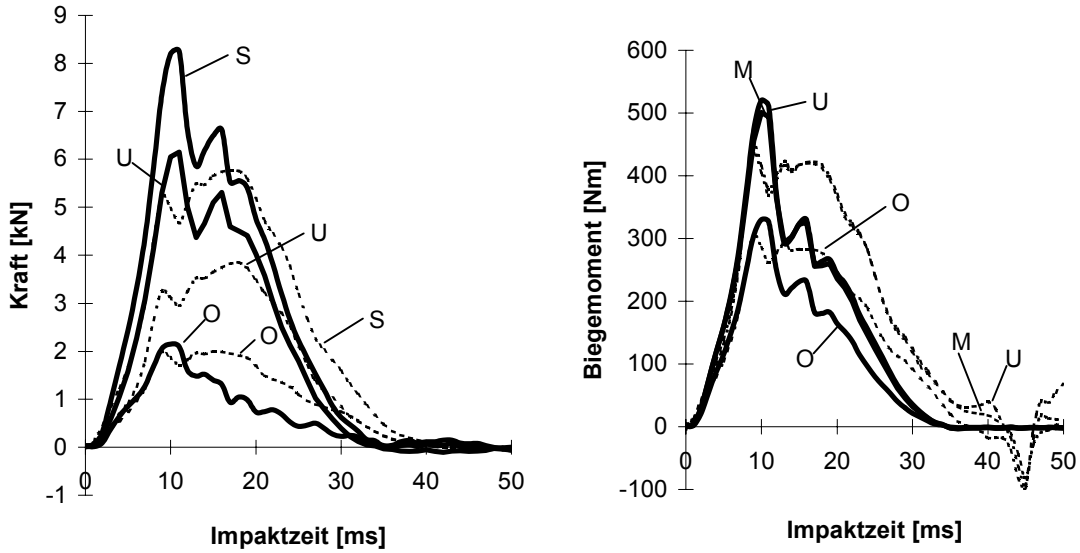
Abb. A-9: Konfigurationsdatei von PILU für ein Fahrzeug der Mittelklasse

**Anhang VII-A: Verifizierungstests für den Beinimpakt**

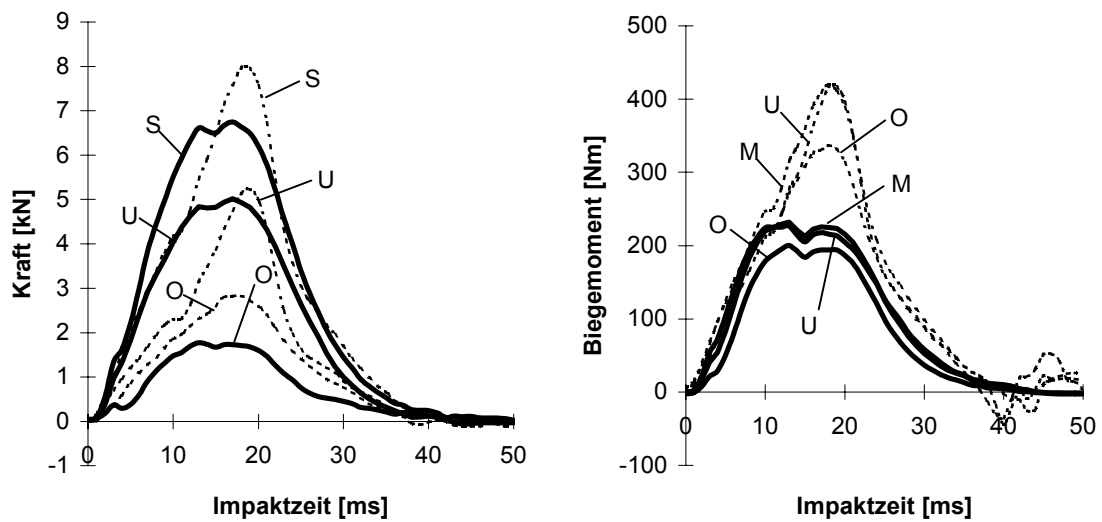


Anhang VII-B: Verifizierungstests für den Hüftimpakt

H1

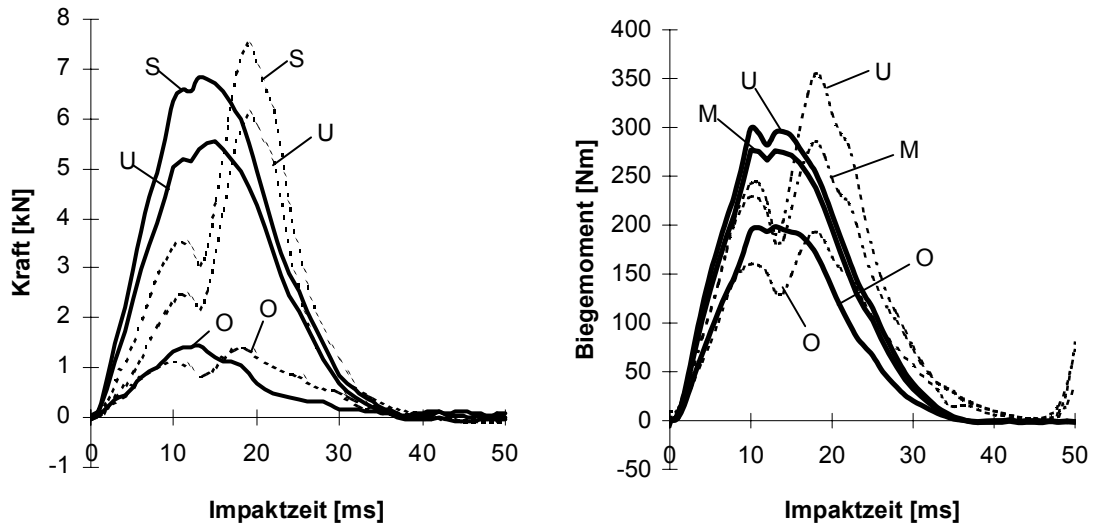


H2

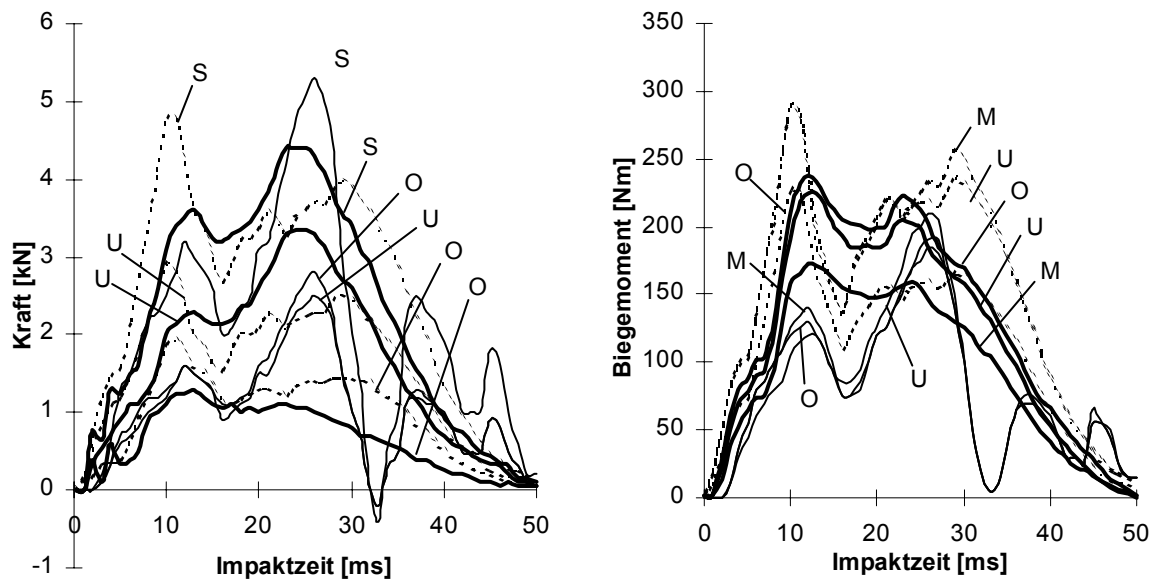


<b>—</b> Fahrzeug	<b>-----</b> Testvorrichtung	<b>—</b> CAE
S = Summenkraft	O = Oben	U = Unten
		M = Mitte

H3

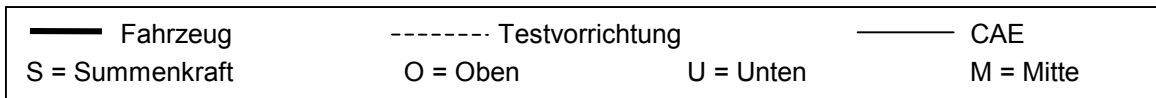
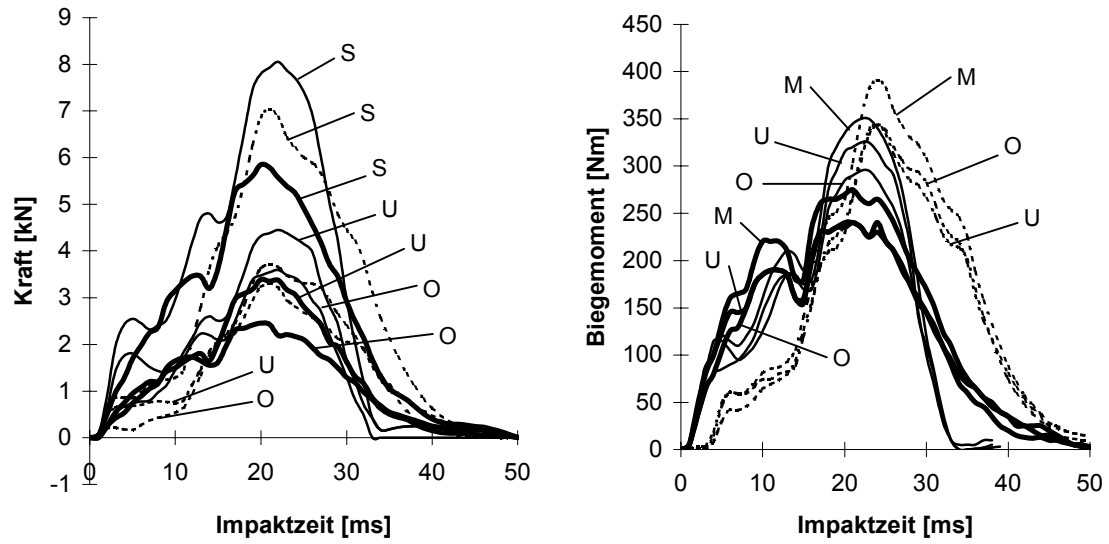


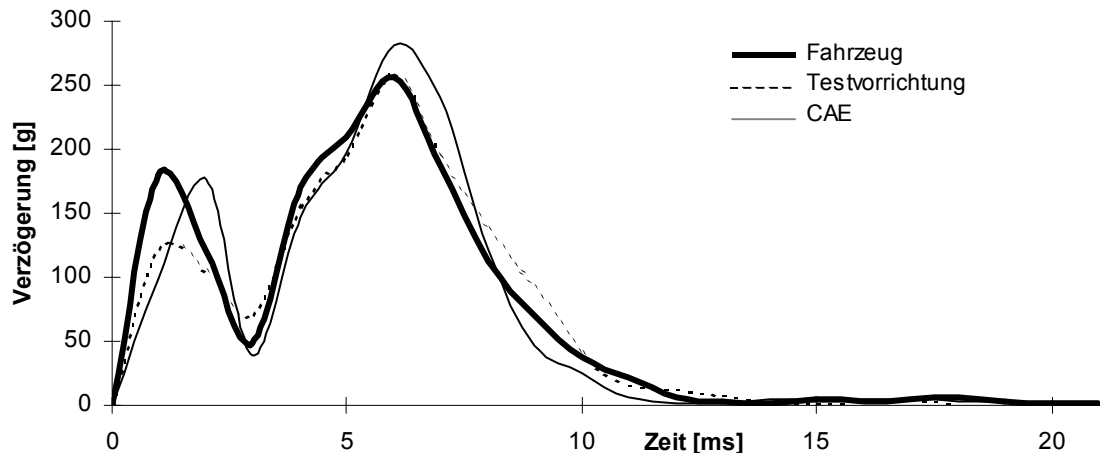
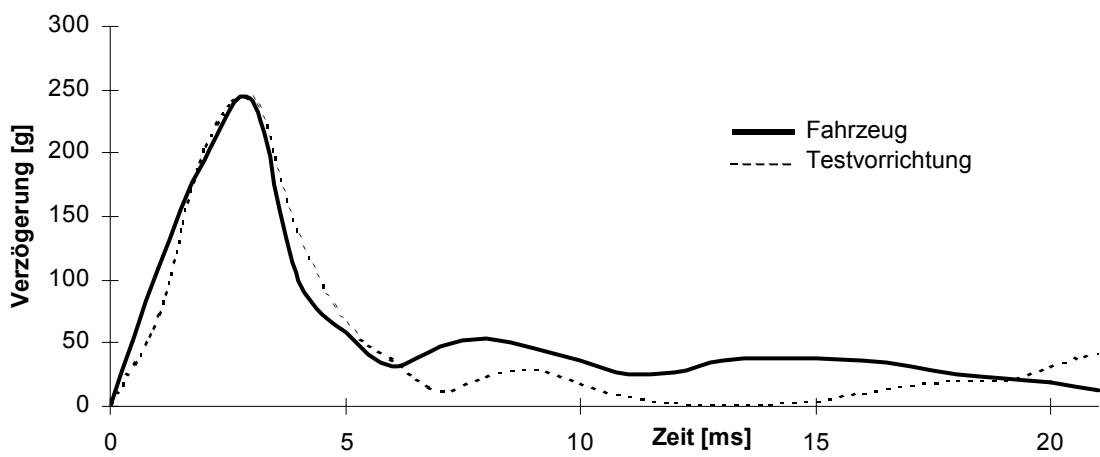
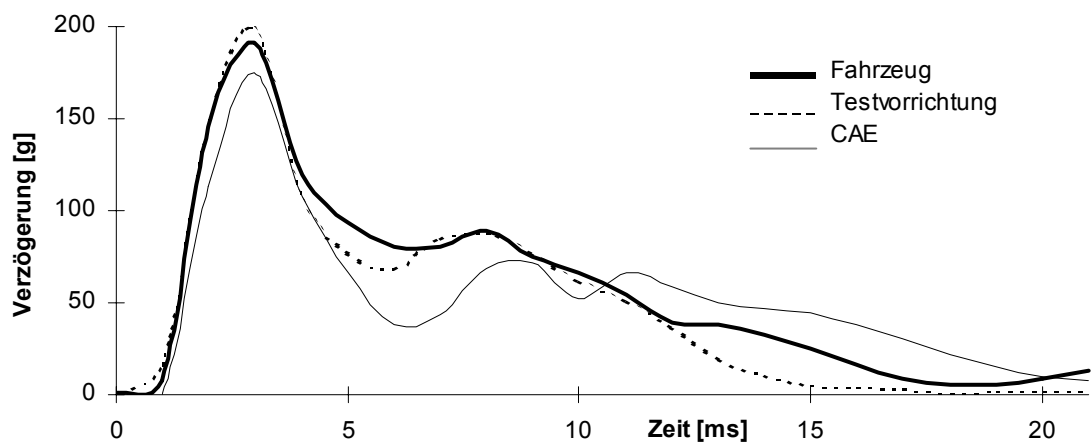
H4



<b>—</b> Fahrzeug	<b>- - - - -</b> Testvorrichtung	<b>—</b> CAE
S = Summenkraft	O = Oben	U = Unten
		M = Mitte

## H5



**Anhang VII-C: Verifizierungstests für den Kopfimpakt****K1****K2****K3**



## Anhang VII-D: Wertetabelle der Verifizierungstests

Kopfaufprall		HPC			Verzögerung $g_{Kmax}$ [g]						
		K1	K2	K3	K1	K2	K3				
Ergebnisse	Fahrzeug	2592	1616	942	256	242	192				
	Testrig	2826	1453	930	284	243	200				
	CAE	2337	n.e.	667	262	n.e.	176				
Streuung [in %]	Testrig/Fahrzeug	9,0	-10,1	-1,3	10,9	0,4	4,2				
	CAE/Fahrzeug	-9,8	n.e.	-29,2	2,3	n.e.	-8,3				
Hüftaufprall		Max. Biegem. $M_{Hmax}$ [Nm]					Summenkraft $F_{Hmax}$ [kN]				
		H1	H2	H3	H4	H5	H1	H2	H3	H4	H5
Ergebnisse	Fahrzeug	529	229	304	239	264	8,38	6,80	6,86	4,46	5,75
	Testrig	447	420	355	293	392	5,79	8,00	7,51	4,88	7,04
	CAE	n.e.	n.e.	n.e.	211	351	n.e.	n.e.	n.e.	5,17	8,12
Streuung [in %]	Testrig/Fahrzeug	-15,5	83,4	16,8	22,6	48,5	-30,9	17,6	9,5	9,4	22,4
	CAE/Fahrzeug	n.e.	n.e.	n.e.	-11,7	33,0	n.e.	n.e.	n.e.	15,9	41,2
Beinaufprall		Biegung im Gelenk [°]			Verzögerung $a_{Bmax}$ [g]						
		B1	B2	B3	B1	B2	B3				
Ergebnisse	Fahrzeug	32,3	32,2	32,8	166	155	188				
	Testrig	33,3	33,0	33,3	160,0	141,0	170,0				
	CAE	34,6	n.e.	n.e.	152,3	n.e.	n.e.				
Streuung [in %]	Testrig/Fahrzeug	3,1	2,5	1,5	-3,6	-9,0	-9,6				
	CAE/Fahrzeug	7,1	n.e.	n.e.	-8,3	n.e.	n.e.				



Zeitungskarikatur aus dem Jahre 1847 „Bekleidung gegen Eisenbahnunfälle“