Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
Fakultät für Maschinenwesen

Institut für Kraftfahrwesen Aachen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Henning Wallentowitz

Studienarbeit

Konstruktionsrichtlinien zur Gestaltung von Fahrzeugfronten hinsichtlich des Fußgängerschutzes

vorgelegt von:

cand. ing. Bruno Gnörich

Matr.-Nr.: 19 55 75

betreut von:

Dipl.-Ing. Flavio Friesen

Aachen, Mai 1999

Inhalt

1 Einleitung 5

2 Fußgängerunfälle 7

2.1 Unfallstatistik 7

2.2 Kinematik des Fußgängerunfalls 11

2.3 Bewertungskriterien der Verletzungsschwere 15

3 EEVC-Testverfahren 22

4 Konstruktionskriterien 25

4.1 Stoßfänger 27

4.1.1 Form 27

4.1.2 Steifigkeit 28

4.2 Haubenvorderkante 33

4.2.1 Form 33

4.2.2 Steifigkeit 35

4.3 Haube 35

4.3.1 Form 36

4.3.2 Steifigkeit 37

4.3.2.1 Verwendung mehrschichtiger Hauben 39

4.3.2.2 Absenken der Aggregate 42

4.3.2.3 Mechanismus zum Anheben der Haube im Falle eines Unfalls 46

4.4 Windschutzscheibe 47

4.4.1 Form 47

4.4.2 Steifigkeit 48

5 Bewertung der Maßnahmen am Volkswagen Golf 51

6 Zusammenfassung und Ausblick 56

7 Literatur 58

1 Einleitung

Seit über einem halben Jahrhundert ist die passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen ein fester Bestandteil der Automobilentwicklung. Die Erfindung der Sicherheitsfahrgastzelle von Béla Barényi im Jahr 1951 bildet die Grundlage für die passive Sicherheit im Fahrzeugbau. Weitere Entwicklungen im Laufe der Jahrzehnte haben zu Rückhaltesystemen wie dem Dreipunkt-Sicherheitsgurt oder dem Airbag geführt, parallel dazu sind Systeme zur Erhöhung der aktiven Sicherheit zur Serienreife gebracht worden. Bekannte Beispiele sind Allradantriebe sowie das Anti-Blockier-System (ABS). Doch erst seit Beginn der 70er Jahre gibt es nennenswerte Bemühungen, im Rahmen des sogenannten Partnerschutzes bei Verkehrsunfällen, insbesondere bei Unfällen mit Fußgängern, die Folgen für den schwächeren Unfallgegner zu verringern.

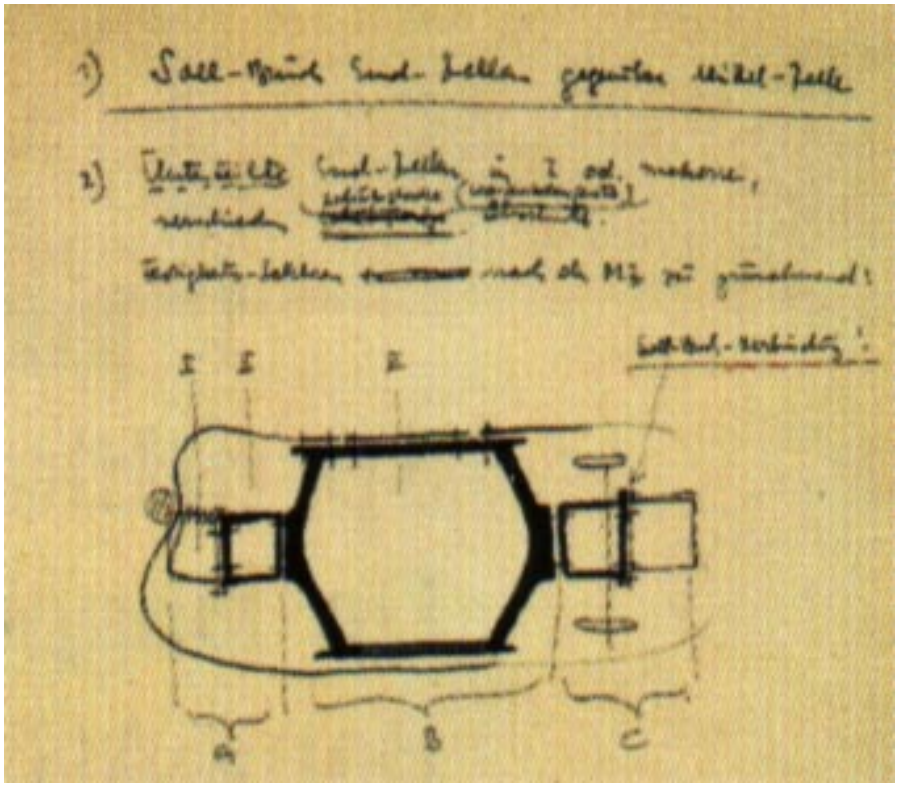


Abb. 1-1: Skizze zur Erfindung der Sicherheitsfahrgastzelle [BAR51]

Zahlreiche Untersuchungen zur Problematik des Fußgängerschutzes im Straßenverkehr und der technische Fortschritt in der Automobilentwicklung haben schließlich im Jahr 1987 zur Bildung einer Arbeitsgruppe geführt, die im Auftrag der Europäischen Gemeinschaft und ihrer Mitgliedsstaaten ein Testverfahren zur Fußgängersicherheit von Kraftfahrzeugen entwickelt hat. Unter der Bezeichnung EEVC-WG10 (European Enhanced Vehicle-safety Committee – Workgroup 10) sind seit 1994 die Methodik und die technischen Voraussetzungen geklärt, und das Prüfverfahren steht inzwischen kurz davor, Bestandteil der Europäischen Typgenehmigung zu werden.

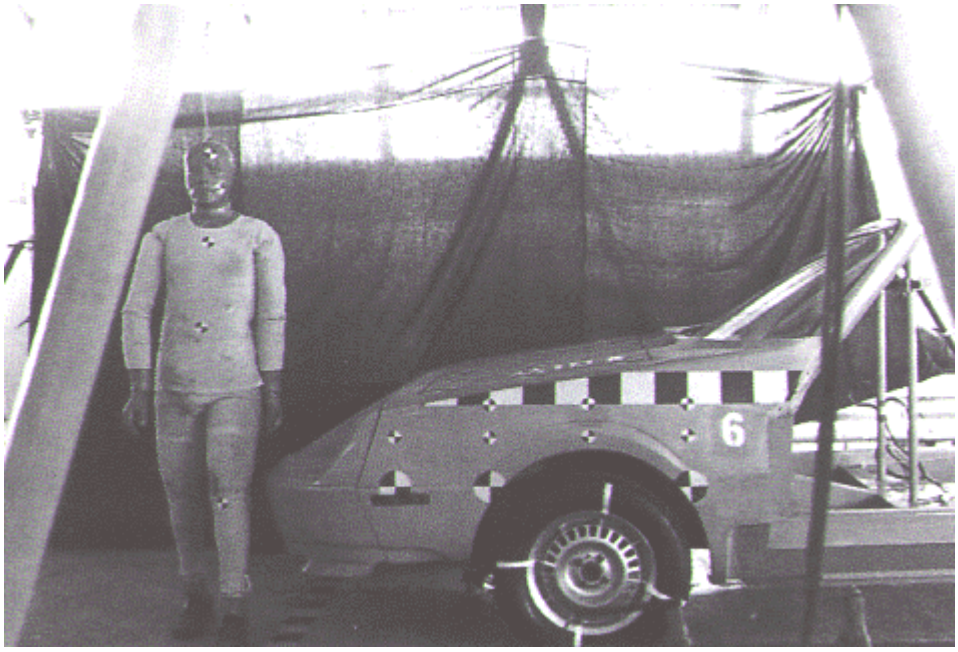


Abb. 1-2: Unfallversuch mit einem Fußgänger-Dummy

Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit den fahrzeugseitigen Einflüssen auf den Fußgängerschutz. Nach einer Zusammenstellung von Unfallstatistiken und der Darlegung der Kinematik des Fußgängerunfalls sowie von Bewertungskriterien der Verletzungen in Kapitel 2 wird in Kapitel 3 auf das bereits angesprochene EEVC-Testverfahren eingegangen.

Das Kapitel 4 ist den Konstruktionskriterien für fußgängerfreundliche Kraftfahrzeuge gewidmet. Ausgehend von generellen Anforderungen an ein Kraftfahrzeug werden nacheinander Kriterien für den Stoßfänger, die Haubenvorderkante, die Haube und die Windschutzscheibe formuliert. Dabei stehen die Potentiale von Konstruktion, Design und von Werkstoffen im Vordergrund.

Abschließend werden in Kapitel 5 am Beispiel eines VW Golf III der momentane Stand des Partnerschutzes ermittelt und in Vorbereitung für einen Crashversuch nach dem EEVC-Verfahren gefährliche Stellen des Vorderwagens benannt.

Kapitel 6 faßt die gesammelten Erkenntnisse zusammen und soll als Ausblick für zukünftige Tätigkeiten auf dem Gebiet des Fußgängerschutzes im Straßenverkehr dienen.

2 Fußgängerunfälle

2.1 Unfallstatistik

Im Jahr 1996 verunglückten im Straßenverkehr in Deutschland über eine halbe Millionen Menschen, davon waren knapp 42.000 Fußgänger. Über 90 % von diesen Fußgängern verunglückten innerhalb von Ortschaften. Damit sind sie dort noch gefährdeter als Zweiradfahrer, von denen etwa 80 % innerorts verletzt oder getötet wurden. In Abb. 2-1 sind die genauen Daten dargestellt.

Jahr	Insgesamt		Zweiradfahrer		Fußgänger	
Innerhalb von Ortschaften						
1980	356.526	100 %	135.368	38,0 %	62.273	17,5 %
1990	307.024	100 %	105.627	34,4 %	46.241	15,1 %
1996	291.138	100 %	94.311	32,4 %	39.114	13,4 %
Außerhalb von Ortschaften						
1980	199.440	100 %	36.062	18,1 %	5.536	2,8 %
1990	214.953	100 %	28.445	13,2 %	3.826	1,8 %
1996	210.778	100 %	24.036	11,4 %	2.726	1,3 %
Innerhalb und außerhalb von Ortschaften						
1980	555.966	100 %	171.430	30,8 %	67.809	12,2 %
1990	521.977	100 %	134.072	25,7 %	50.067	9,6 %
1996	501.916	100 %	118.347	23,6 %	41.840	8,3 %

Abb. 2-1: In Deutschland Verunglückte (Getötete und Verletzte zusammen) nach Art der Verkehrsbeteiligung [STA98]

Die Zahlen zeigen, daß Maßnahmen zum Schutz von Fußgängern gegenüber der Sicherheit von Zweiradfahrern nicht vernachlässigt werden können. Sowohl Infrastruktur als auch fahrzeugseitige Aspekte müssen zur Erhöhung der Fußgängersicherheit herangezogen werden. Bei den Zahlen von 1990 und 1996 zeigt sich für die innerorts verunglückten Fußgängern der positive Einfluß von Infrastrukturmaßnahmen wie beispielsweise die Einführung von verkehrsberuhigten Zonen oder des vermehrten Einsatzes von Fußgängerampeln. Zwischen 1980 und 1996 sank die Zahl der verunglückten Fußgänger um fast 40 %, während die Anzahl aller Verunglückten um nur 20 % zurückging. Auch aerodynamisch optimierte Fahrzeug-Karosserien haben zu diesem Trend beigetragen.

Jahr	Insgesamt		Zweiradfahrer		Fußgänger	
Innerhalb von Ortschaften						
1980	6.131	100 %	1.875	30,6 %	2.752	44,9 %
1990	3.361	100 %	1.003	29,8 %	1.460	43,4 %
1996	2.131	100 %	571	26,7 %	799	37,5 %
Außerhalb von Ortschaften						
1980	8.919	100 %	2.094	25,5 %	968	10,9 %
1990	7.685	100 %	1.348	17,5 %	653	8,5 %
1996	6.627	100 %	1.021	15,4 %	379	5,7 %
Innerhalb und außerhalb von Ortschaften						
1980	15.050	100 %	3.969	26,3 %	3.720	24,7 %
1990	11.046	100 %	2.351	21,3 %	2.113	19,1 %
1996	8.758	100 %	1.592	18,2 %	1.178	13,5 %

Abb. 2-2: In Deutschland tödlich Verunglückte nach Art der Verkehrbeteiligung [STA98]

Die Zahl der tödlich verunglückten Fußgänger sank im Zeitraum von 1980 bis 1996 um fast 70 %, wie Abb. 2-2 zeigt, doch mit 1178 Toten liegt ihr Anteil an allen Unfallopfern bei immerhin 13,5 %.

Einer Studie des US-amerikanischen Insurance Institute for Highway Safety (IIHS) zufolge ist die Gefahr bei Dunkelheit am größten: 46 % der getöteten Fußgänger verunglückten zwischen 18 und 24 Uhr. Des weiteren sind die Wochentage Freitag und Samstag mit zusammen 35 % der Todesfälle überdurchschnittlich gefährlich. Für 1997 ergaben sich die in Abb. 2-3 und Abb. 2-4 dargestellten Zahlen [IHS98].

Weitere Erkenntnisse beziehen sich auf den körperlichen Zustand der Fußgänger während des Unfalls. Bei den untersuchten Unfällen hatten über 50 % der nachts getöteten Fußgänger einen Blut-Alkoholgehalt von mehr als 1,0 ‰. Daten über die mögliche Trunkenheit der Fahrzeugführer liegen nicht vor. Das Alter hat der Statistik von [IHS98] zufolge ebenfalls einen Einfluß auf die Verletzungsgefahr. Für Fußgänger über 65 Jahren liegt die Zahl der Getöteten mit 4 pro 100.000 Todesfällen nahezu doppelt so hoch wie bei den Fußgängern zwischen 20 und 34 Jahren. Der Statistik ist jedoch nicht zu entnehmen, welche Anteile die beiden Altersgruppen am gesamten Fußgängeraufkommen haben.

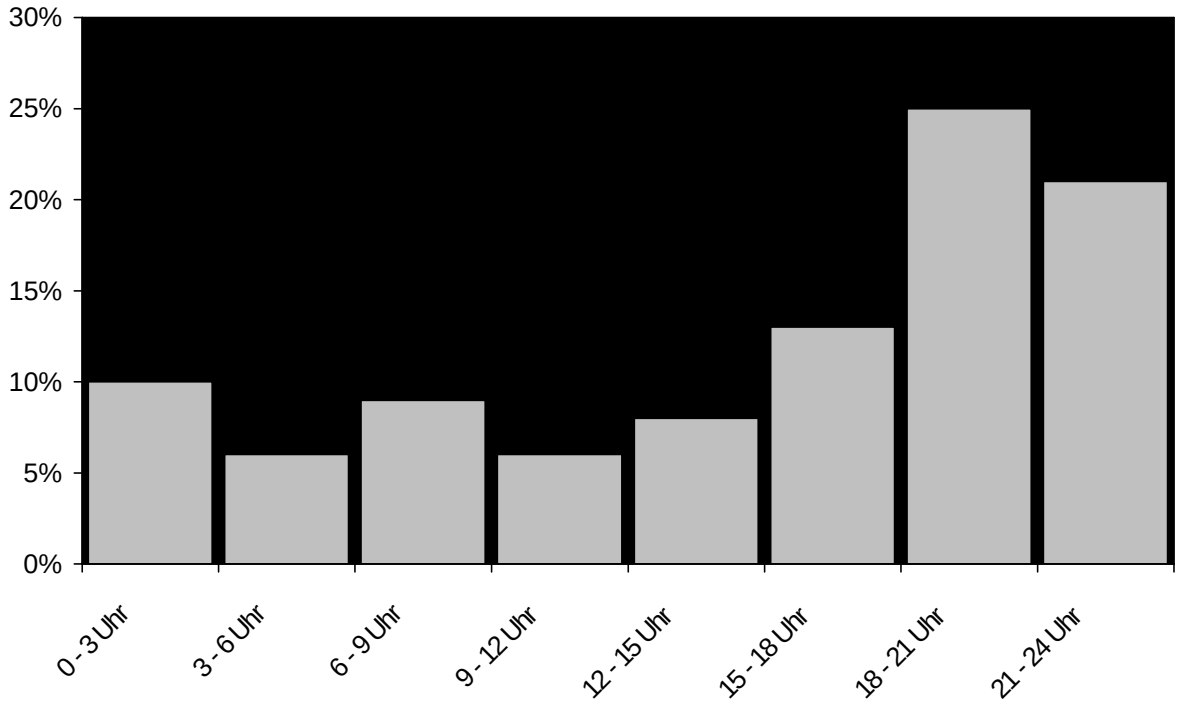


Abb. 2-3: Anteile der tödlichen Fußgängerunfälle im Tagesverlauf [IHS98]

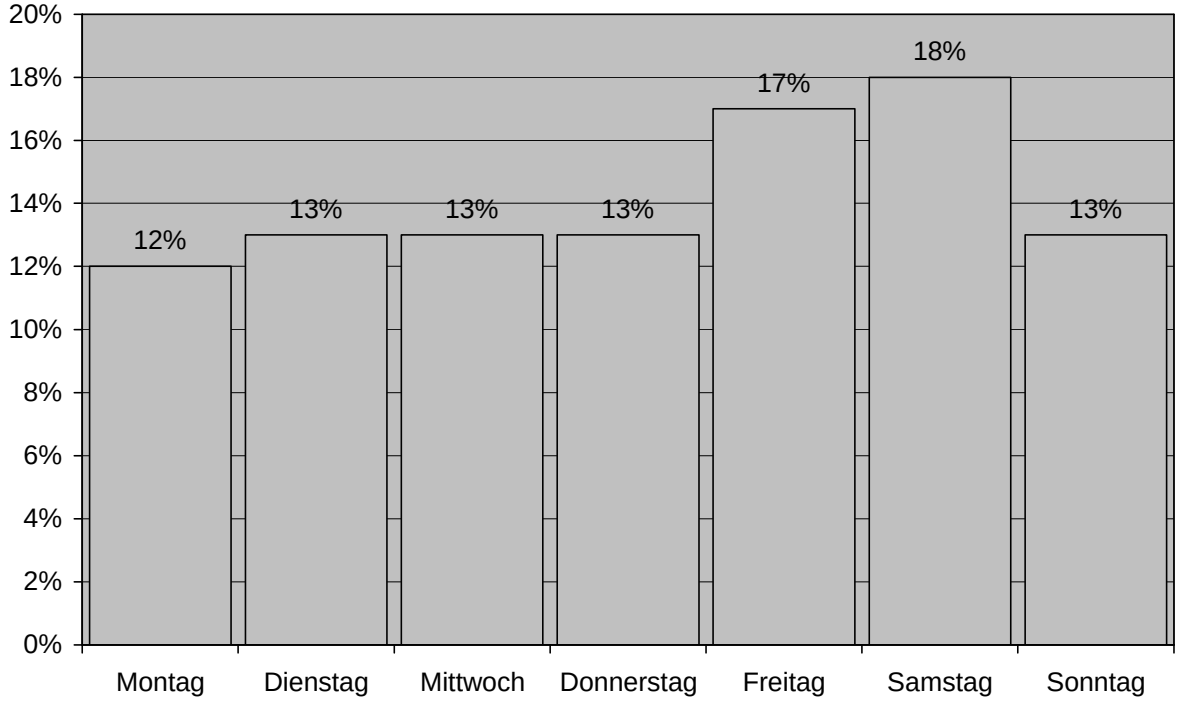


Abb. 2-4: Anteile der tödlichen Fußgängerunfälle im Wochenverlauf [IHS98]

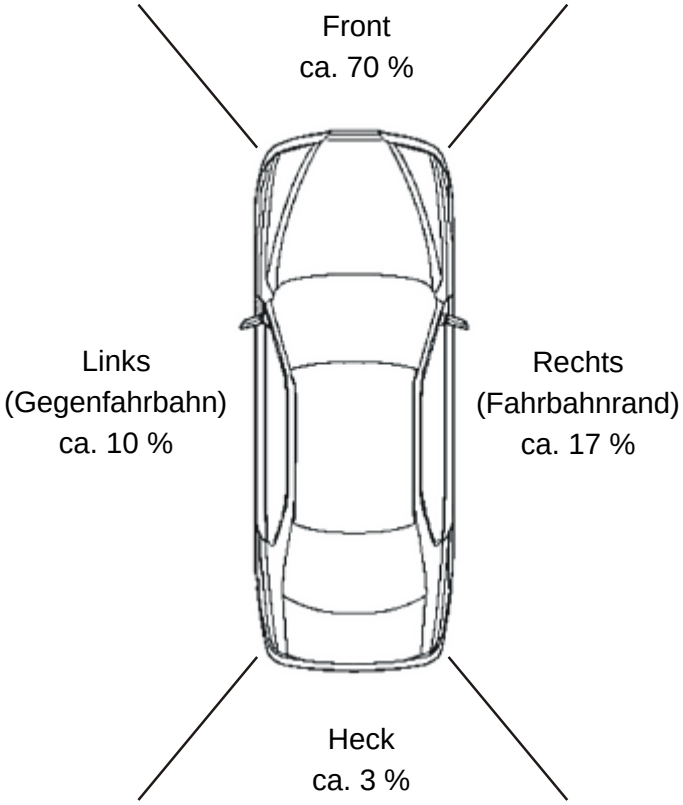


Abb. 2-5: Anteile der Fußgängerkollisionen am Fahrzeugumfang [N.N.82]

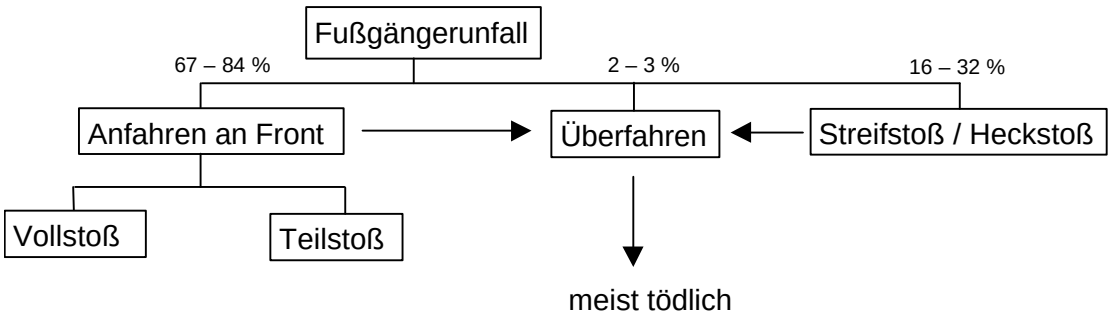


Abb. 2-6: Arten von Fußgängerunfällen [KÜH80]

In Abb. 2-5 sind die verschiedenen Aufprallstellen am Fahrzeug mit ihren jeweiligen Anteilen dargestellt. Die Zahlen zeigen, daß der Fahrzeugfront bei der Optimierung bezüglich des Fußgängerschutzes ein besonderes Augenmerk gelten muß. Wenn man als Unfallverlauf das Überfahren in die Statistik einbezieht, so kommt man zu den in Abb. 2-6 angegebenen Zahlen.

Ausgehend von den in Abb. 2-5 und Abb. 2-6 dargestellten Daten sollen im folgenden die Bewegungsabläufe des von der Fahrzeugfront angefahrenen Fußgängers erläutert werden.

2.2 Kinematik des Fußgängerunfalls

Fußgängerunfälle können in drei Phasen eingeteilt werden, die die verschiedenen Stöße während des Aufpralls repräsentieren. Der Primärstoß entspricht dem Aufprall auf dem Fahrzeug. Er findet immer statt und ist hinsichtlich der Verletzungen maßgebend. Der Sekundärstoß entspricht dem Aufschlag auf der Straße und der Tertiärstoß entspricht dem Auftreffen gegen ein Hindernis oder dem Überfahren.

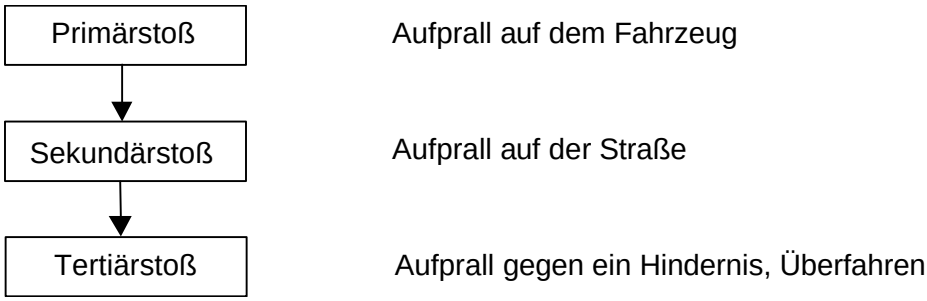


Abb. 2-7: Phasen des Fußgängerunfalls [KÜH80]

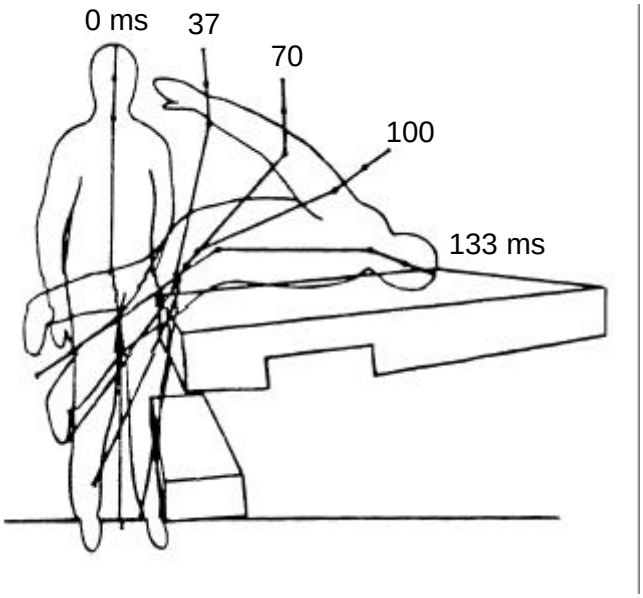


Abb. 2-8: Simulation vom zeitlichen Verlauf des Primärstoßes [KAE82]

Aus Simulationen ist für den Primärstoß die Dauer vom ersten Fahrzeugkontakt bis zum Kopfaufschlag ermittelt worden. Abb. 2-8 zeigt schematisch den zeitlichen Verlauf für eine Kollisionsgeschwindigkeit von 35 km/h.

Einen Vergleich der Verletzungsrisiken von Fahrzeugkontakt und Straßenkontakt zeigt Abb. 2-9. Für Geschwindigkeiten ab 30 km/h wird die Gefährdung durch den Fahrzeugkontakt dominant, während der Straßenkontakt in weiten Geschwindigkeitsbereichen nahezu konstant bleibt. Das widerspricht der häufigen Auffassung, die Unfallfolgen bei Fußgängerkollisionen würden entscheidend durch den Aufprall auf der Straße bestimmt. Es resultiert daraus die Notwendigkeit, Fahrzeuge hinsichtlich des Fußgängerschutzes zu optimieren.

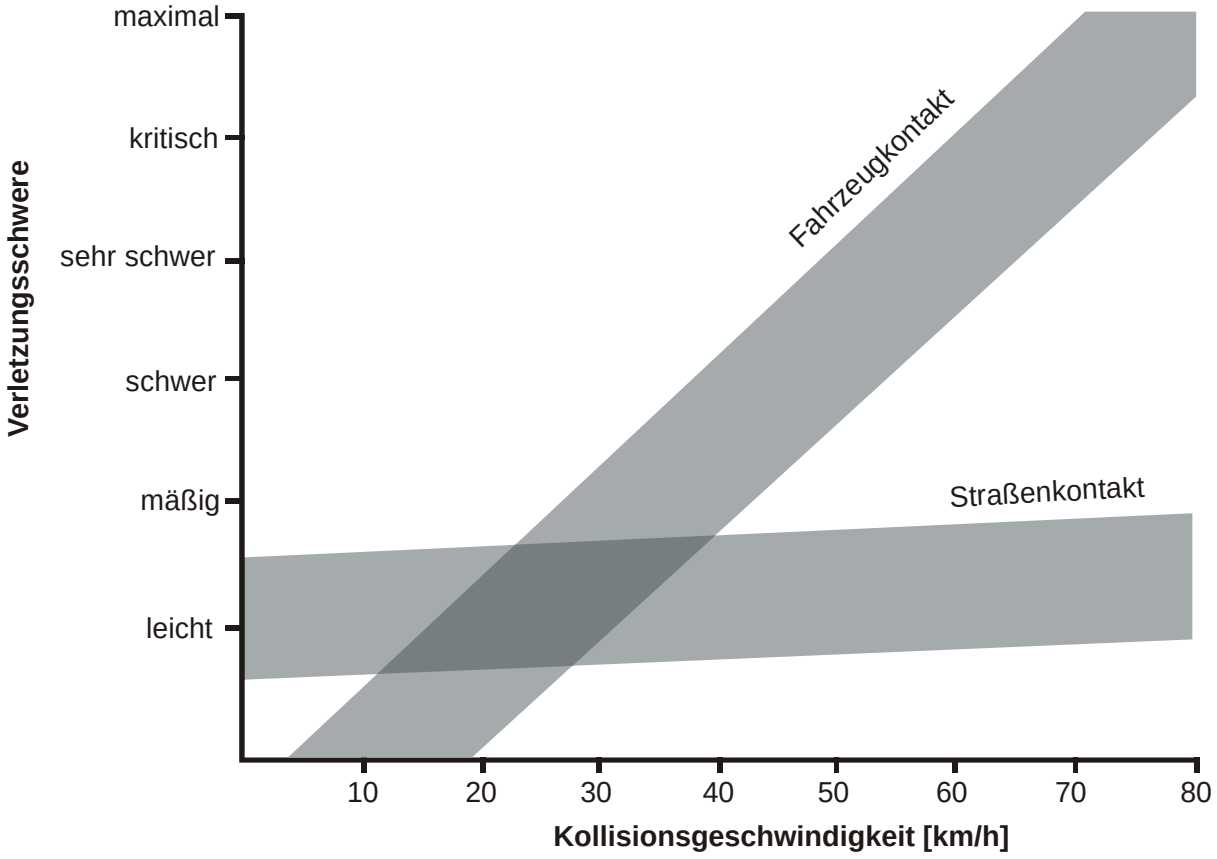


Abb. 2-9: Vergleich der Verletzungsrisiken von Fahrzeugkontakt und Straßenkontakt [KAE82]

Wird ein Fußgänger von der Front eines Fahrzeugs erfaßt, so wickelt sich der Körper während der ersten 1/10 Sekunde um das Fahrzeug, bevor die Füße von der Fahrbahn abheben. Manche Untersuchungen berücksichtigen hierbei die Reibung zwischen Füßen und der Fahrbahn [KÜH80]. Je nach Lage des Anstoßpunktes bezogen auf den Schwerpunkt des Fußgängers wird der Körper unterschiedlich stark in Rotation versetzt. Der Drehimpuls wird beim Aufprall des Kopfes auf der Haube verringert oder ganz abgebaut und muß wegen der hohen erforderlichen Energieabsorptionen der Haube bei der Unfallanalyse bzw. bei der Fahrzeugauslegung berücksichtigt werden.

Die Häufigkeitsverteilung von

$$\frac{L}{H} = \frac{\text{Abwickellänge der Aufprallstelle}}{\text{Körpergröße (Augenhöhe)}} \qquad \text{Gl. 2-1}$$

ist im untenstehenden Diagramm (Abb. 2-10) dargestellt. Man erkennt deutlich den Einfluß des Rutschens auf der Haube, ein Phänomen, das bei der Konstruktion von Fahrzeugen hinsichtlich des Fußgängerschutzes zu berücksichtigen ist.

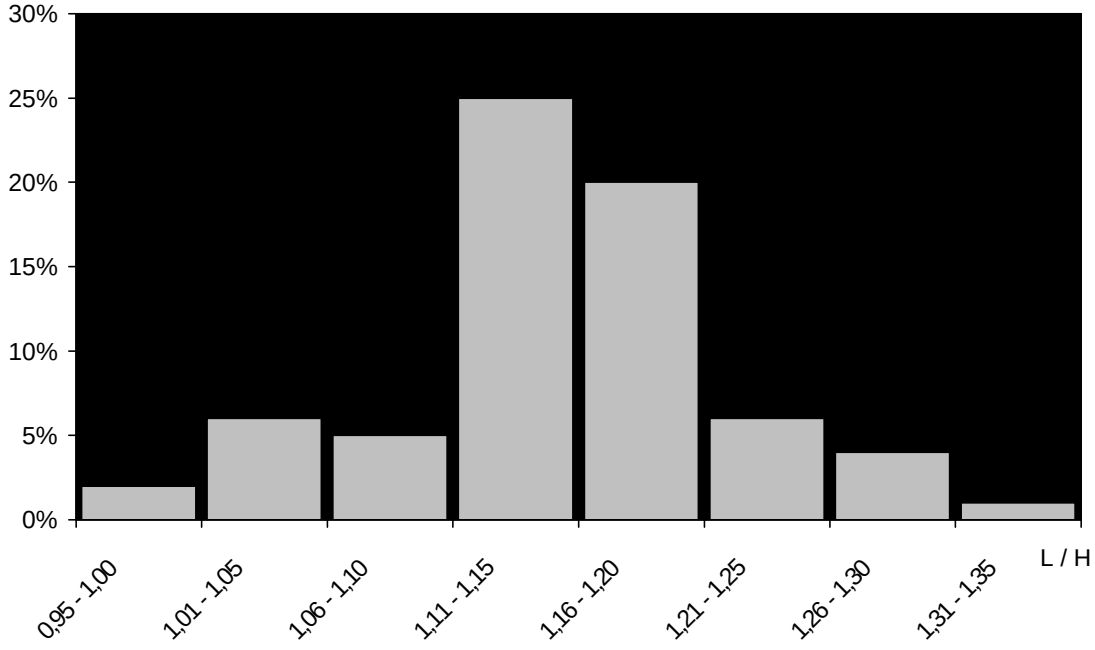


Abb. 2-10: Häufigkeitsverteilung von Kopf-Aufprallstellen auf der Haube [KAE82]

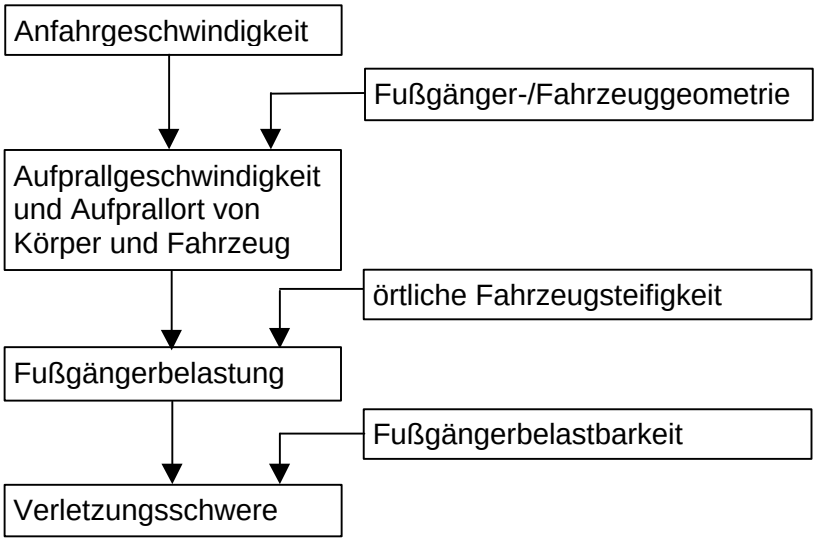


Abb. 2-11: Einflußgrößen auf die Verletzungsschwere [KÜH80]

Eine Zusammenfassung der Parameter, die die Verletzungsschwere bei einem Fußgängerunfall beeinflussen, zeigt Abb. 2-11. Die Ausgangsgrößen sind die Kollisionsgeschwindigkeit und die Geometriepaarung Fußgänger-Fahrzeug, welche die Aufprallkinematik bestimmen. Die örtliche Fahrzeugsteifigkeit bestimmt dann die auftretende Fußgängerbelastung. Die Verletzungsschwere des Fußgängers hängt nun nur noch von seiner körperlichen Verfassung, der Fußgängerbelastbarkeit, ab. diese ist von Mensch zu Mensch großen Schwankungen unterworfen. Auch vorliegende Erkrankungen können die Belastbarkeit des Fußgängers beeinträchtigen.

Die Fahrzeuggeometrie wird in der Literatur in mehrere Kategorien eingeteilt. [KÜH80] unterteilt die Fahrzeuge in Ponton-Form und in V-Form, inklusive der Sonderform als „Käfer"-Form. Aufgrund aerodynamischer Optimierung der Fahrzeuge hat sich die sogenannte V-Form durchgesetzt. Die wichtigsten Abmessungen von Fahrzeugfronten sind in Abb. 2-12 dargestellt. Für die beiden Karosserievarianten „V-Form" und „Ponton-Form" gelten die in Abb. 2-13 dargestellten Merkmale.

Parameter:

α: Rückversatzwinkel
r_E: Radius Haubenvorderkante
h_F: Höhe Haubenvorderkante
d_B: Rückversatz
α_W: Neigung der Frontscheibe
l_L: Stoßfängertiefe
l_F: Vorderwagenlänge
l_B: Haubenlänge
h_B: Stoßfängerhöhe
h_C: Fahrzeughöhe
h_S: Stoßfängerbreite
α_B: Neigung der Haube
l_T: Vorderwagenlänge inkl. Windschutzscheibe

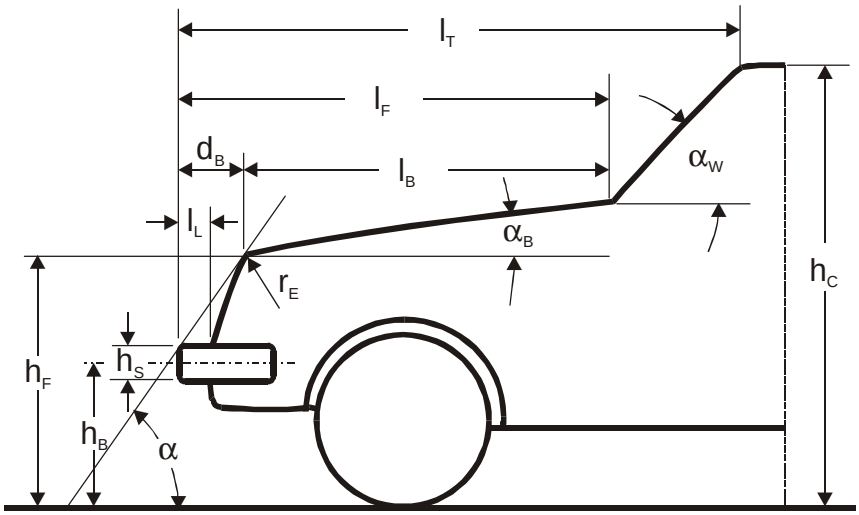


Abb. 2-12: Abmessungen von Fahrzeugfronten mit Parametern zum Fußgängerschutz

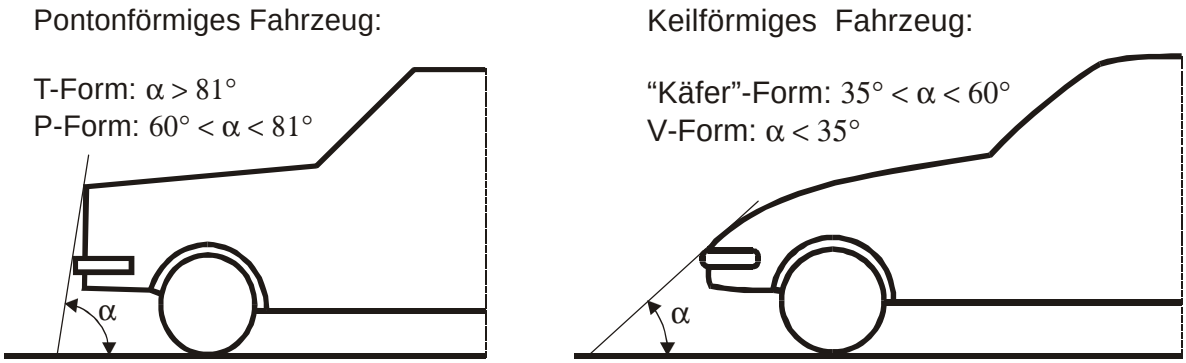


Abb. 2-13: Form-Merkmale bei unterschiedlichen Karosserievarianten

Ein für den Fußgängerunfall ebenfalls relevantes Merkmal von Fahrzeugfronten ist die Abwickellänge (WAD, wrap around distance). Sie beschreibt den Abstand zwischen der Straße und dem hinteren Haubenende, gemessen entlang der Karosserie in Fahrzeuglängsrichtung (Abb. 2-14).

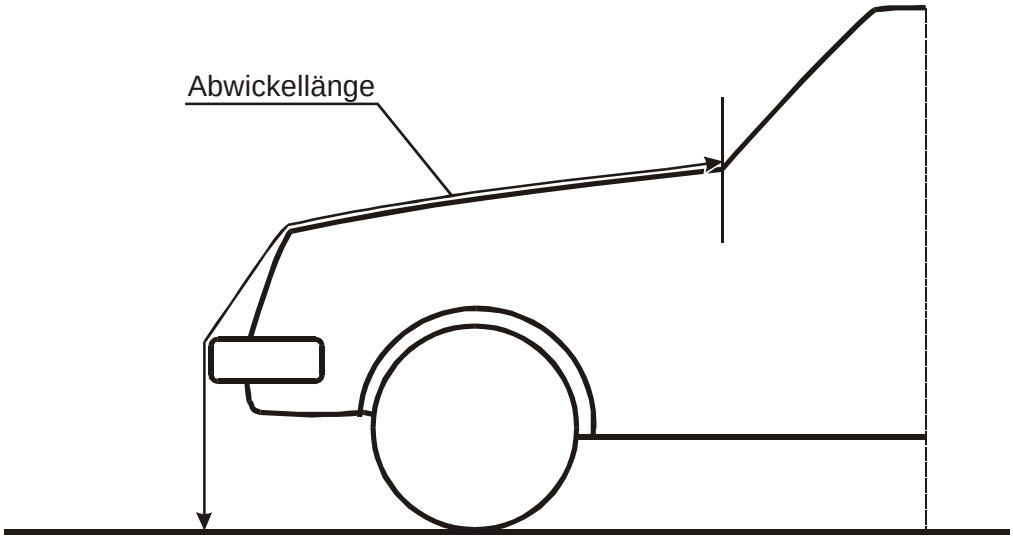


Abb. 2-14: Definition der Abwickellänge

2.3 Bewertungskriterien der Verletzungsschwere

Zur Bewertung von Verletzungen bei Verkehrsunfällen werden verschiedene Kennzahlen verwendet. Die Verletzungsschwere wird in 6 Schweregrade eingeteilt (AIS, Abbreviated injury scale), die von nicht verletzt (AIS 0) bis zu tödlichen Verletzungen (AIS 6) reichen. Typische Merkmale der einzelnen Verletzungsklassen sind in Abb. 2-15 zusammengestellt.

Eine weitere Kennzahl ist der HIC (Head Injury Criterion), mit dem man Korrelationen zwischen Zeit-Beschleunigungs-Messungen und der Verletzungsschwere nach dem realen Unfall herstellt.

$$\mathrm{HIC} = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} a_{res} dt \right]^{2,5} \cdot (t_2 - t_1) \qquad \text{mit } a_{res} = \frac{a_{ges}}{g} \quad \text{und} \quad g = 9{,}81 \frac{m}{s^2} \qquad \text{Gl. 2-2}$$

Die Kennzahl bezieht sich auf Kopfverletzungen und wird vor allem für Verletzungen von Fahrzeuginsassen herangezogen. Auf diese Insassenverletzungen bezieht sich der aus biomechanischen Untersuchungen abgeleitete, gesetzliche Grenzwert von HIC < 1000 nach FMVSS 208, und er wird auch für Fußgängerunfälle angewendet, um einen Vergleich mit der Insassengefährdung bei Verkehrsunfällen und den daraus resultierenden volkswirtschaftlichen Schäden zu ermöglichen.

AIS	Definition	Merkmale
0	nicht verletzt	- - - - -
1	geringfügig verletzt	oberflächliche Fleischwunden, leichte Prellungen, einfache Frakturen, Gehirnerschütterungen ohne Bewußtlosigkeit
2	mäßig verletzt	tiefe Fleischwunden, schwere Prellungen, Fraktur tragender Knochen, Bewußtlosigkeit bis 15 min
3	schwer verletzt, nicht lebensgefährlich	Trümmerbrüche, Prellungen von Bauch- und Beckeninhalt, Bewußtlosigkeit 15 bis 59 min
4	bedeutend verletzt, lebensgefährlich, Überleben wahrscheinlich	Schädelbasisbruch, oberflächliche Risse von Bauch- und Beckeninhalt, Amputation von Extremitäten, Bewußtlosigkeit 1 bis 24 Std.
5	kritisch verletzt, lebensgefährlich, Überleben ungewiß	Schlagaderriß, ausgedehnte Risse von Bauch- und Beckeninhalt, Querschnittslähmung, Bewußtlosigkeit mehr als 24 Std.
6	tödlich verletzt	Schädelzertrümmerung, Enthauptung, Aortenabriß, Rumpfdurchtrennung

Abb. 2-15: Typische Verletzungsmerkmale einzelner Verletzungsgrade [WAL96]

Zur Ermittlung des beim Kopfaufprall erforderlichen Verformungsweges am Fahrzeug wird vereinfachend von einer konstanten Beschleunigung ausgegangen. Die Grenzwerte für die Kopfbelastung (FMVSS 208) sollen im Rechengang berücksichtigt werden.

Head Injury Criterion: HIC < 1000
Kopfbeschleunigung: $a_{0,003}$ = 80 g während maximal 3 ms

Die folgenden kinematischen Beziehungen werden für die Rechnung benötigt.

Weg: $$s = s_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \qquad \text{Gl. 2-3}$$

Hier: $$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \qquad \text{mit } a = \text{konst.} \qquad \text{Gl. 2-4}$$

Geschwindigkeit: $$v = v_0 + a \cdot t \qquad \text{Gl. 2-5}$$

Hier: $$v = a \cdot t \qquad \text{mit } a = \text{konst.} \qquad \text{Gl. 2-6}$$

Der HIC berechnet sich gemäß der Formel

$$\mathrm{HIC} = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} a_{res} dt \right]^{2,5} \cdot (t_2 - t_1) \qquad \text{mit } a_{res} = \frac{a_{ges}}{g} \quad \text{und} \quad g = 9{,}81 \frac{m}{s^2} \qquad \text{Gl. 2-7}$$

Es wird ersichtlich, daß die Kollisionsgeschwindigkeit nur indirekt über die Verzögerungsdauer Einfluß auf den HIC hat und als Größe in den Formeln nicht auftritt. Als Zusammenhang gilt Gl. 2-6, Abb. 2-16 zeigt für verschiedene Beschleunigungswerte *a* den Verlauf der Geschwindigkeit *v* über der Zeit *t*.

Bei einer Geschwindigkeit des Kopfes von v_0 = 10 m/s und einer Verzögerung von a_1 = 80 g ergibt sich folgender Verformungsweg.

$$s = \frac{v^2}{2 \cdot a} = \frac{\left(10 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \cdot 80 \cdot 9{,}81 \frac{m}{s^2}} = 0{,}06371 m = 63{,}71 mm \qquad \text{Gl. 2-8}$$

Die Beschleunigungsdauer beträgt dann

$$t = \frac{v}{a} = \frac{10 \frac{m}{s}}{80 \cdot 9{,}81 \frac{m}{s^2}} = 0{,}01274\, s = 12{,}74\, ms\,. \qquad \text{Gl. 2-9}$$

Die geforderte maximale Dauer von 3 ms ist damit überschritten, der HIC liegt mit

$$HIC = \left(\frac{1}{0{,}01274} \cdot \int_0^{0{,}01274} 80 \cdot dt \right)^{2,5} \cdot 0{,}01274 = 729{,}28 \qquad \text{Gl. 2-10}$$

aber unterhalb des Grenzwertes.

Bei gleicher Anfangsgeschwindigkeit (v_0 = 10 m/s) und einer auf a_2 = 70 g verringerten Verzögerung ergeben sich folgenden Werte.

Verzögerungsdauer:	t = 14,56 ms
Head Injury Criterion:	HIC = 597,01
Zurücklegelegter Weg:	s = 72,8 mm

Zur Erfüllung des Grenzwerts $a_{0,003}$ ist demnach ein Wert zwischen s_{min} = 63,7 mm und s_{max} = 72,8 mm erforderlich, wobei der höhere Wert anzustreben ist.

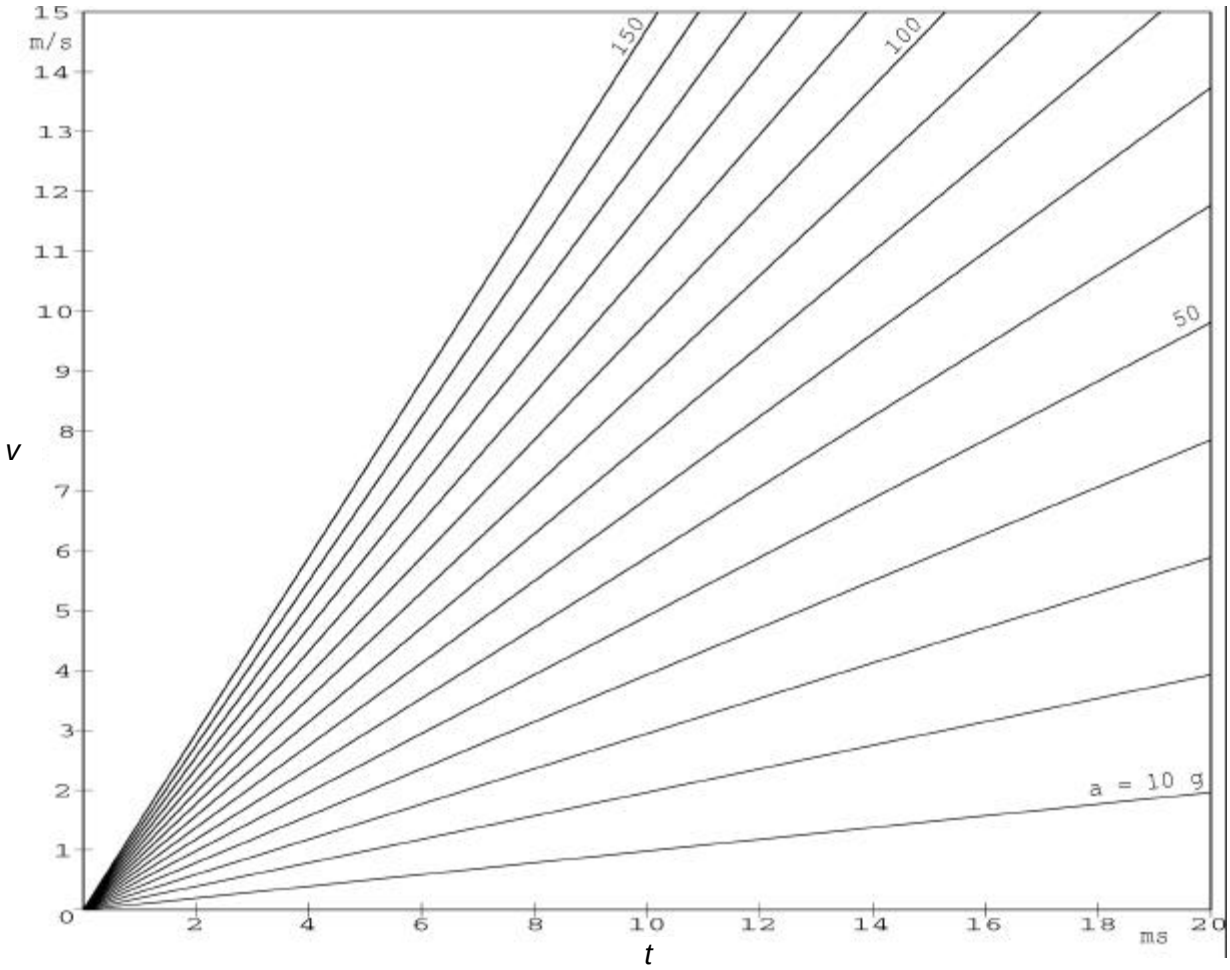


Abb. 2-16: Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm für verschiedene Beschleunigungen

Abb. 2-17 zeigt die Verläufe des HIC und des Verformungsweges *s* in Abhängigkeit der Verzögerung *a* und der Verzögerungsdauer *t*. Die Skalierung des HIC erfolgt über die Schattierung, der Verformungsweg ist mittels der Kurvenschar dargestellt. Die beiden Auslegungspunkte sind im Kennfeld eingetragen. Die Verzögerungsdauer für v_0 = 10 m/s ist Abb. 2-16 entnommen.

Bei Beschleunigungen unter 80 g wird ein HIC > 1000 unabhängig von der Aufprallgeschwindigkeit erst oberhalb einer Verzögerungsdauer von 20 ms erreicht.

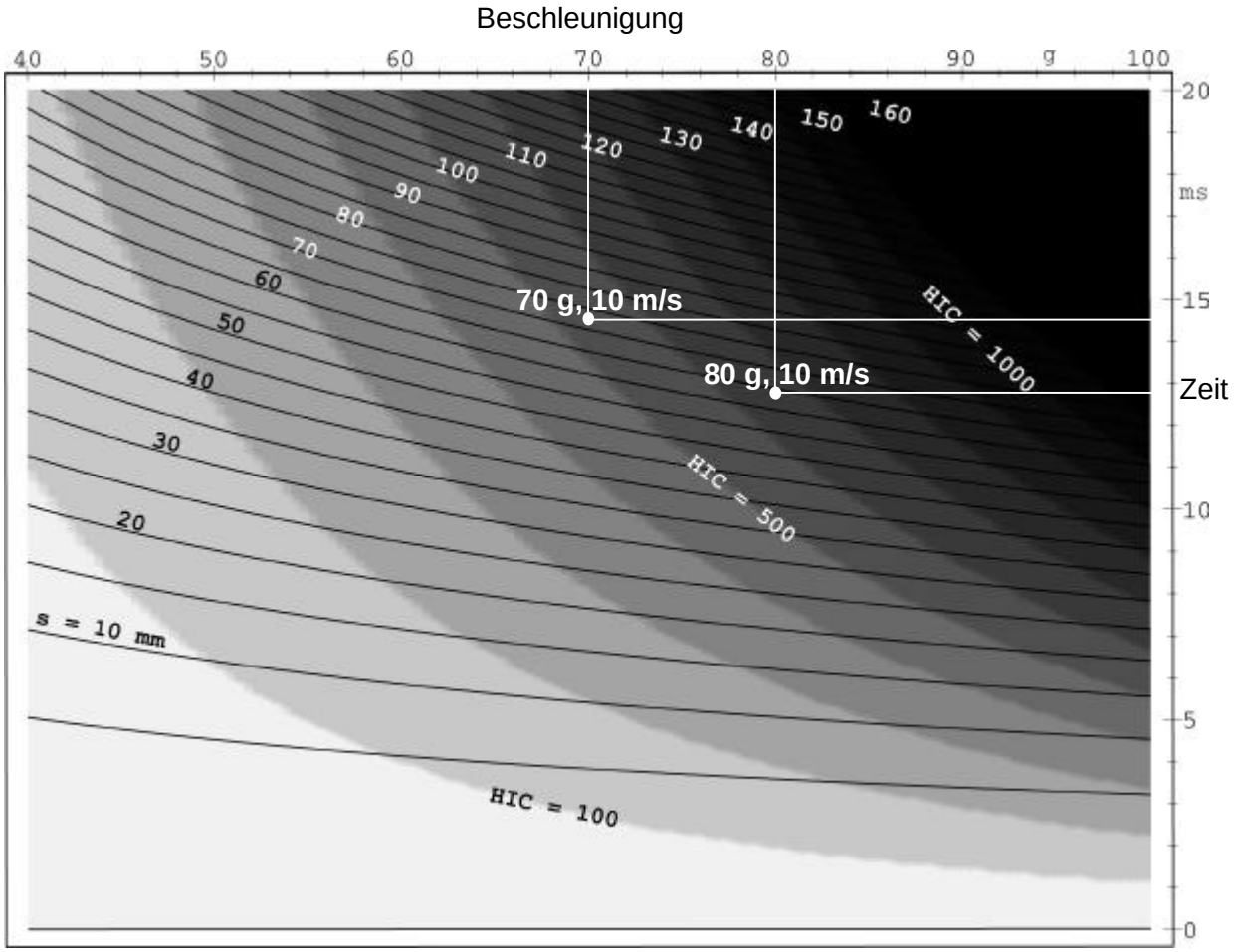


Abb. 2-17: HIC und Verformungsweg in Abhängigkeit von Beschleunigung und Zeit für zwei Fälle bei v_0 = 10 m/s: a_1 = 80 g , a_2 = 70 g

Es ist erkennbar, daß bei gleichbleibender Aufprallgeschwindigkeit und verringerter Verzögerung, d.h. verlängerter Dauer der Verzögerung, der Verformungsweg steigt und der HIC überproportional sinkt. Dies läßt sich mit der hohen Gewichtung der Beschleunigung bei der Ermittlung des HIC begründen.

Trägt man den Verformungsweg als dritte Koordinate auf, ergibt sich das in Abb. 2-18 dargestellte Diagramm.

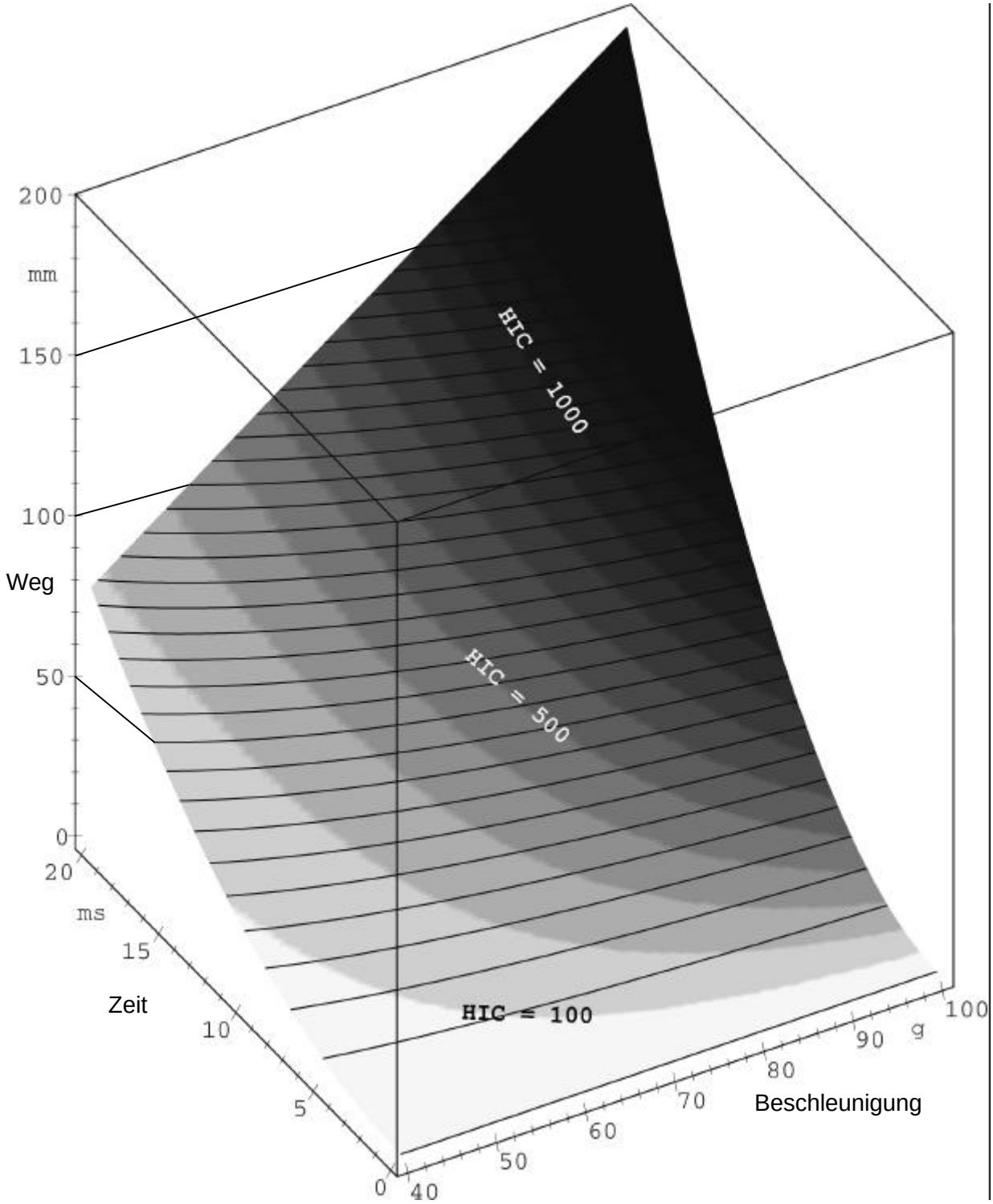


Abb. 2-18: HIC-Verformungsweg-Kennfeld mit den Parametern Beschleunigung und Zeit

Ein aus der AIS abgeleitetes Kriterium stellt die MAIS (Maximum Abbreviated Injury Scale) dar. Die einzelnen Körperteile werden dabei getrennt betrachtet und die schwerste der lokalen Verletzungen des Unfallopfers beschrieben. Ebenso wie die Skalierung der AIS wird die MAIS in Verletzungsgrade von MAIS 1 bis MAIS 6 eingeteilt.

Zukünftig muß bei der Bewertung von Unfällen und Verletzungen, insbesondere unter volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten, die Genesungsdauer bei Verletzungen betrachtet werden, da weder HIC noch AIS diesen Parameter berücksichtigen.

Der HIC und die AIS stellen die ausschlaggebenden Beurteilungskriterien für die Verletzungen der Fußgänger im EEVC-Testverfahren dar. Im nachfolgenden Kapitel werden dieses Testverfahren für Fußgänger-Kraftfahrzeug-Unfälle näher erläutert und die entsprechenden Belastungsgrenzwerte angegeben, die dieses Testverfahren vorschreibt.

3 EEVC-Testverfahren

Das European Enhanced Vehicle-safety Committee (EEVC) arbeitet seit 1987 in einer Arbeitsgruppe, der EEVC – WG 10, an einem Testverfahren, das den fahrzeugseitigen Schutz von Fußgängern bei Kollisionen bis 40 km/h bewerten soll. Es werden bei diesem Testverfahren drei Anprallarten an einen Personenkraftwagen simuliert:

- Anprall des Beines eines Erwachsenen an den Stoßfänger
- Anprall des Oberschenkels eines Erwachsenen an die Haubenkante
- Anprall des Kopfes von Kindern und Erwachsenen auf die Haube

Es wird hierbei davon ausgegangen, daß Fahrzeuge, die dieses Testverfahren erfolgreich absolvieren, bei wirklichen Kollisionen bis zu 40 km/h keine über einen langen Zeitraum zu behandelnden Beinverletzungen und keine irreversiblen Kopfverletzungen hervorrufen. Die Arbeiten zum Testverfahren wurden im November 1994 abgeschlossen und den gesetzgebenden Gremien präsentiert. Anschließend hat die EEVC – WG 17 den Arbeitsbereich des Fußgängerschutzes übernommen.

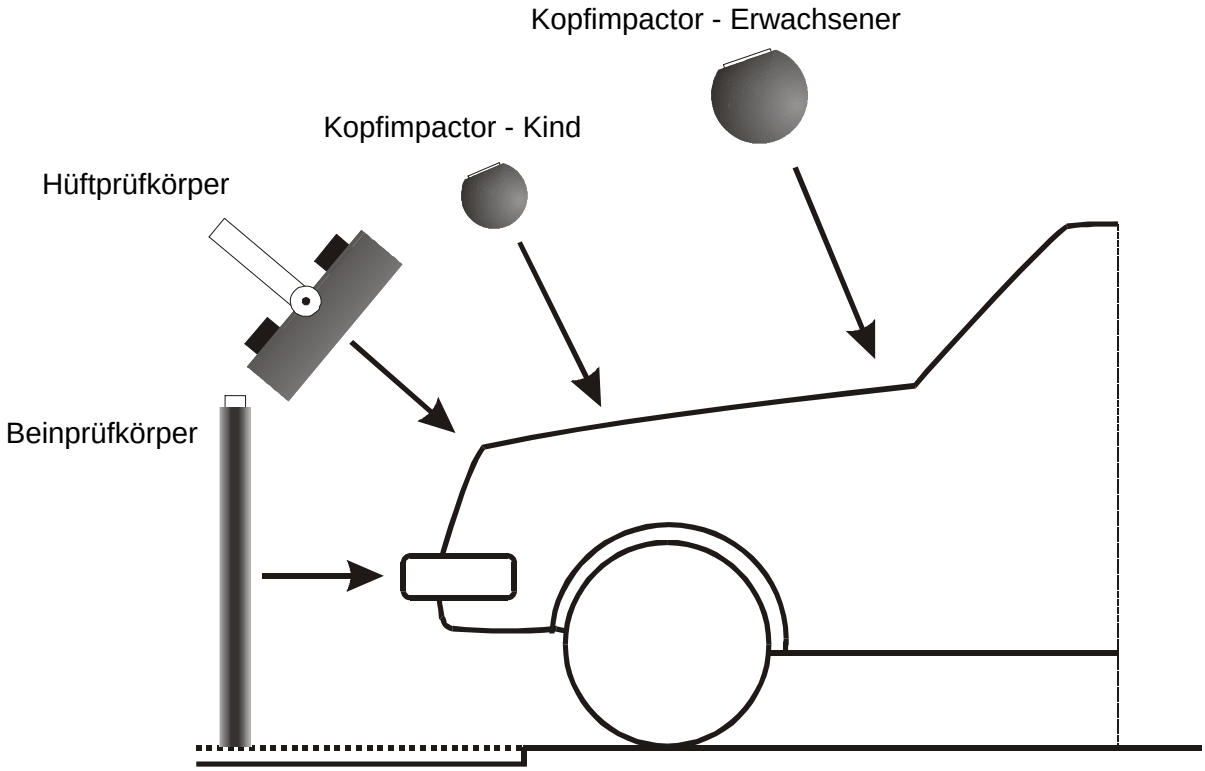


Abb. 3-1: Testverfahren der EEVC – WG 10 [ZEL95]

Der Beinprüfkörper dient der Simulation des Beinanpralls gegen den Stoßfänger. Es wird je ein Versuch im linken, mittleren und rechten Drittel des Fahrzeugs auf der als besonders verletzungsgefährdend eingestuften Stelle durchgeführt. Der Impactor ist mit einem dem Knie nachgebildeten Gelenk ausgestattet und hat eine Masse von 13,4 kg. Er wird im freien Flug mit 40 km/h auf das zu prüfende Fahrzeug geschossen. Die kinetische Energie beträgt demnach

$$E = \frac{1}{2} m v^2 = 827 J \,. \qquad \text{Gl. 3-1}$$

Zur Bewertung werden der Kniebeugewinkel α, die Verschiebung s der Kniegelenks und die Beschleunigung a des Schienbeins herangezogen. Als Grenzwerte dienen die in Abb. 3-2 angegebenen Daten.

Der Hüftprüfkörper dient der Simulation des Anpralls von Oberschenkel bzw. Hüfte eines erwachsenen Fußgängers an die Haubenvorderkante. Wie beim Beinprüfkörper wird je ein Versuch im linken, mittleren und rechten Drittel des Fahrzeugs auf der als besonders verletzungsgefährdend eingestuften Stelle durchgeführt. Zur Festlegung von Impactor-Geschwindigkeit und Impactor-Aufprallwinkel werden Kennfelder ausgewertet, in die als Größen den Rückversatz und die Höhe der Haubenvorderkante einfließen. Sie sind in der Prüfvorschrift enthalten. Die in Abb. 3-2 angegebenen Grenzwerte von Kraft und von Moment der Hüftprüfkörper-Versuche dürfen nicht überschritten werden.

Der Kopfprüfkörper dient der Simulation des Kopfaufpralls auf der Fronthaube. Ein kleiner Prüfkörper simuliert den Aufprall eines Kinderkopfes im vorderen Haubenbereich, ein größerer Prüfkörper simuliert den Aufprall des Erwachsenenkopfes im hinteren Haubenbereich. In jedem Drittel des Haubenbereichs werden je drei Versuche mit dem Kinderkopfimpactor und drei Versuche mit dem Erwachsenenkopfimpactor durchgeführt, wobei die Abwickellänge für die Kinderkopfprüfkörper zwischen 1000 und 1500 mm und für den Erwachsenenkopfprüfkörper zwischen 1500 und 2100 mm liegen muß. Der Kinderkopfimpactor soll sich unter 50° zur Horizontalen bewegen, der Erwachsenenkopfimactor soll die Haube unter 65° treffen. Die Impactoren werden mit 40 km/h im freien Flug auf die Haube geschossen. Bei Massen von 2,5 kg bzw. 4,8 kg ergeben sich damit für Kinder- und Erwachsenenkopfprüfkörper kinetische Energien von 154 J bzw. 296 J. Beurteilungskriterium ist der HIC.

Testabschnitt	Versuchsbedingungen	Grenzwert
Beinaufprall	m = 13,4 kg v = 40 km/h	$\alpha_{Kniebeuge} < 15$ ° $s_{Kniegelenk} < 6$ mm $a_{Schienbein} < 150$ g
Hüftaufprall	Masse, Geschwindigkeit und Aufprallwinkel aus Kennfeldern	$F_{max} = 4000$ N $M_{max} = 220$ Nm
Kopfaufprall	Kinderkopf: m = 2,5 kg; $\alpha = 50°$ Erwachsenenkopf: m = 4,8 kg; $\alpha = 65°$	HIC < 1000

Abb. 3-2: Grenzwerte beim EEVC-Testverfahren [EUR96]

Während der Versuche muß sich das Fahrzeug im normalen Fahrzustand befinden, d.h. mit auf empfohlenen Druck aufgepumpten Reifen, Lenkung in Mittelstellung und maximal gefüllten Flüssigkeitsbehältern. Des weiteren sieht das Testverfahren die Besetzung von Fahrer- und Beifahrersitz mit Massen von jeweils 75 kg vor und schreibt für das Fahrwerk eine Einstellung auf den einer Geschwindigkeit von 40 km/h entsprechenden Position vor. Weiterhin werden im Prüfverfahren Karosseriebereiche definiert, die einen bestimmten Mindestabstand von den geprüften Aufprallstellen haben müssen. Einzelheiten dazu enthält der EU-Richtlinien-Entwurf III/5021/96 EN [EUR96].

Mit den Vorgaben dieses Prüfverfahrens lassen sich für die drei Bereiche Stoßfänger, Haubenvorderkante und Haube Kriterien entwickeln, die zu günstigeren Ergebnissen bei diesem Verfahren und im realen Unfallgeschehen führen sollen. Über den Prüfbereich des Testverfahrens hinaus können, insbesondere für kleine Fahrzeuge, Kriterien für den Bereich der Windschutzscheibe und des Dachrahmens formuliert werden. Im folgenden Kapitel werden diese Konstruktionskriterien erläutert.

4 Konstruktionskriterien

Die Konstruktion einer Fahrzeugfront kann auf zweierlei Weisen den Fußgängerschutz beeinflussen. [APP76b] unterscheidet dabei die Frontgeometrie mit der sog. Formaggressivität, verantwortlich für die Unfallkinematik, und die Steifigkeit mit der sog. Nachgiebigkeitsaggressivität, verantwortlich für die Energieabsorptionen und die Fußgängerbelastungen während des Unfalls.

Für die Formaggressivität gelten die in Abb. 4-1 dargestellten Parameter

- Rauhigkeit der Außenhaut
- Länge der Haube
- Neigung der Haube
- Rückversatz der Haubenkante
- Höhe der Haubenvorderkante
- Radius der Haubenvorderkante
- Breite des Stoßfängers
- Höhe des Stoßfängers
- Neigung der Windschutzscheibe.

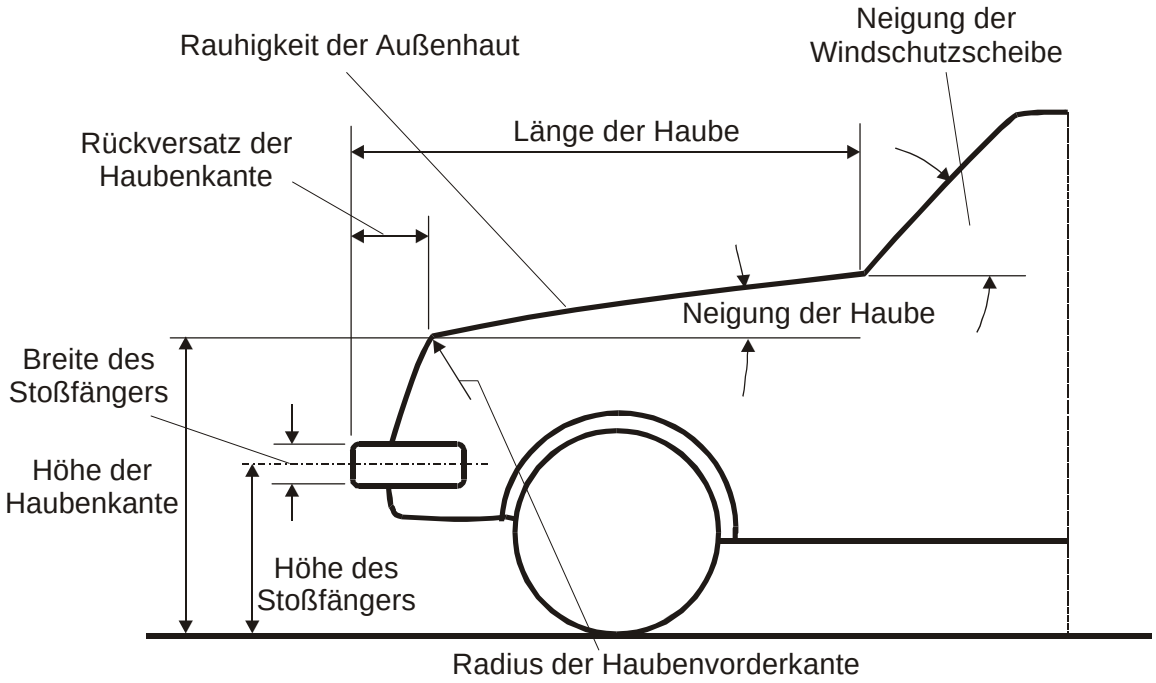


Abb. 4-1: Fußgängerschutz beeinflussende Formparameter [APP76b]

Die Nachgiebigkeitsaggressivität wird insbesondere bestimmt durch die Eigenschaften folgender Bauteile:

- Haubenvorderkante
- Haube
- Windlauf
- Stoßfänger
- Windschutzscheibe
- Dachrahmen
- Windlaufsäule
- Seitenteile

Form und Steifigkeit lassen sich nicht völlig unabhängig voneinander betrachten. Sie beeinflussen sich gegenseitig, und Konstruktionen müssen von Beginn beide Aspekte berücksichtigen.

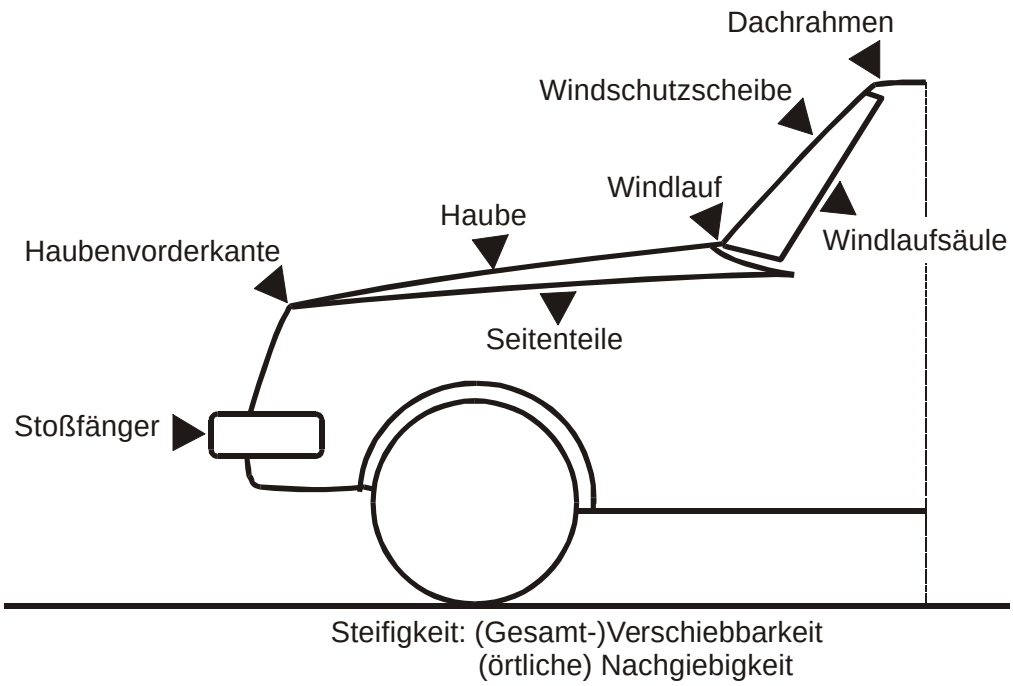


Abb. 4-2: Relevante Merkmale des fahrzeugseitigen Fußgängerschutzes [APP76b]

In bezug auf Form und Nachgiebigkeit ist zunächst ein sequentieller Anstoß von Bein, Becken, Brust und Kopf anzustreben, um die Energieabsorbtion über einen größeren Zeitraum zu verteilen. Dies ergibt sich auch durch ein begrenztes Abrollen und Rutschen auf der Haube sowie lange Kontaktzeiten an den Anstoßstellen, insbesondere durch ausreichende Deformation. Um die Folgen des Straßenstoßes zu verringern, soll die Fahrzeugfront so ausgelegt sein, daß die Wurfhöhe gering ist. Für Kinder können die Folgen eines Abwurfes nach vorne unten fatal sein, da hiermit das Risiko des Überrollens verbun-

den ist. Fahrzeugkonstruktionen müssen diese Gefahr minimieren und einen solchen Bewegungsablauf des angefahrenen Kindes vermeiden.

4.1 Stoßfänger

Der Stoßfänger ist bei den meisten Fußgängerunfällen diejenige Stelle am Fahrzeug, die den Fußgänger als erstes erfaßt. Es muß bei einer fußgängerfreundlichen Fahrzeugkonstruktion auf diesen Bereich des Fahrzeuges besonders Rücksicht genommen werden, da er den weiteren Bewegungsablauf während der Kollision entscheidend beeinflußt. Für die Form und die Nachgiebigkeit des Stoßfängers lassen sich verschiedene Kriterien formulieren.

4.1.1 Form

Die Höhe der Vorderkante des Stoßfängers soll zur Verminderung der Verletzungen im Bereich von 250 – 350 mm liegen [HOE84, GRÖ89b]. Heutige Vorschriften schreiben Werte von 406 – 508 mm (FMVSS 215) vor. Wird der Stoßfänger zu tief angebracht, bewirkt dies einen hohen Drehimpuls und eine hohe Kopfaufprallgeschwindigkeit. Ein zu hoher Stoßfänger kann zu schweren Knieverletzungen führen. Da bei den meisten Kollisionen gleichzeitig gebremst wird, muß die auftretende Nickbewegung des Fahrzeugs und das Absenken des Stoßfängers von 60 – 130 mm in der Konstruktion berücksichtigt werden. Die angegebenen Vorschriften führen im ungünstigen Fall also zu etwas zu hohen Werten und bedürfen einer Überprüfung.

Für die Höhe der Kontaktfläche kann ein Wert von 100 mm oder mehr angesetzt werden, damit die Krafteinleitung großflächig und somit die Flächenpressung örtlich kleiner wird. Bei manchen Karosserieformen ist ein solcher Wert nicht realisierbar. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn im Bereich der Kontaktfläche Öffnungen für die Motorkühlung vorgesehen werden müssen. Daher kann als Kompromiß eine Kombination aus Stoßfänger und Frontspoiler vorgesehen werden, die gemeinsam die Belastungen für den Fußgänger verringern. Damit können mit dem Stoßfänger als der Fahrzeugstruktur dienendes Bauteil und der Frontspoiler als der Aerodynamik dienendes Bauteil für den Fußgängerschutz kombiniert werden. Nach [HOB85] wird dann das Biegemoment im Bein des erwachsenen Fußgängers bei einer Kraftaufteilung zwischen Stoßfänger und Spoiler von 60:40 am gleichförmigsten. Dabei gilt für beide Bauteile jeweils die Forderung nach einer glatten Kontaktfläche. Für Kinder liegen keine Daten zur erforderlichen Kraftaufteilung zwischen Stoßfänger und Spoiler vor.

Im Zusammenspiel mit der Haubenvorderkante läßt sich auch für den Rückversatzwinkel ein Konstruktionskriterium formulieren. Nach [N.N.82] wird der Bewegungsablauf des Fußgängers bei Rückversatzwinkeln unter 60° – 80° bezogen auf das Abrollen auf dem Fahrzeug und den nachfolgenden Kopfaufprall unproblematischer als bei steileren Fahrzeugfronten.

Allgemein läßt sich sagen, daß glatte und großflächige Stoßfänger günstiger sind als Stoßfänger mit einer ausgeprägten Vorderkante. Sogenannte „soft faces“ („weicher Vorbau“) bieten hierfür eine praktikable Lösung. Auf sie wird im folgenden Punkt näher eingegangen.

Größe	vorher	nachher	Wirkung
Höhe der Stoßfängervorderkante	406 – 508 mm	250 – 300 mm 310 – 430 mm[1]	Schutz vor schweren Knie-verletzungen
Höhe der Kontaktfläche	-	100 mm	großflächige Krafteinwirkung
Rückversatzwinkel	-	< 60° – 80°	günstigeres Abrollen auf dem Fahrzeug
Kraftaufteilung zwischen Soßfänger und Spoiler	-	60 : 40	gleichmäßiger Biege-momentenverlauf im Bein

Abb. 4-3: Formparameter und Maßnahmen am Stoßfänger

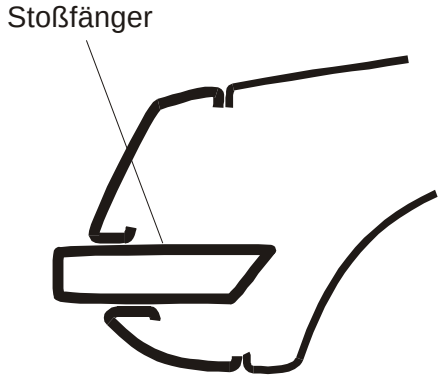
Zusammenfassend sind die Formparameter und die zugehörigen Maßnahmen am Stoßfänger in Abb. 4-3 dargestellt.

4.1.2 Steifigkeit

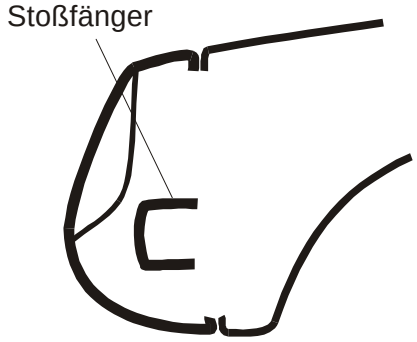
Die biomechanischen Grenzwerte des Fußgängers bestimmen maßgeblich die anzustrebende dynamische Steifigkeit bzw. Nachgiebigkeit des Stoßfängers. Untersuchungen zum Kontakt Stoßfänger–Oberschenkel haben zu einem Grenzwert von 4000 – 10000 N geführt, für den Kontakt Stoßfänger–Schienbein ergab sich ein Grenzwert von rund 4000 N. Auf diese Werte müssen Stoßfänger-Konstruktionen abgestimmt werden.

Kunststoffabdeckungen an Stoßfängern bestehender Fahrzeug-Baureihen können nach [APP76b] mit zwei verschiedenen Typen realisiert werden. Beide Varianten bestehen aus Polyurethan, die erste aus einem PU-Schaum („compression type“) mit plastischer Verformungskennlinie und die zweite aus einem mikrozellularem PU-Elastomer („buckling type“) mit elastischer Verformungscharakteristik. Auch wenn die Verwendung weicher Materialien wie Kunststoffen die Nachgiebigkeit des Stoßfängers vergrößern, reicht alleiniges Anbringen solcher Abdeckungen jedoch nicht aus. Der zur Verfügung stehende Verformungsweg ist hier ein besonders wichtiges Kriterium. Eine deutliche Verringerung der Beschleunigungswerte im Bein des Fußgängers wird durch eine mögliche Eindrücktiefe von 150 mm erreicht. Weil heutige Fahrzeuge diesen Wert mit dem Stoßfänger alleine nicht erreichen können, wird über Konstruktionen nachgedacht, die den gesamten Fahrzeugvorbau aus Stoßfänger, Kühlergrill und Haubenvorderkante kombinieren. Solche „soft face“-Konstruktionen aus PU-Schaum finden sich in Experimentalfahrzeugen wie dem UNI-CAR oder dem Peugeot VLS 104 wieder, aber auch einige moderne Serienfahrzeuge zeigen Ansätze von nachgiebigen Frontends. Abb. 4-4 zeigt die Evolutionsstufen vom konventionellen Stoßfänger zum „soft face“.

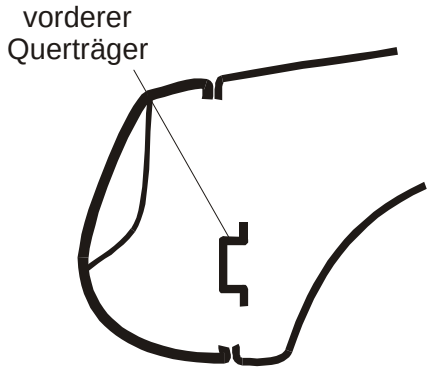
[1] Berücksichtigung des Bremsnickens von 60 – 130 mm



a) Zweiteiliges Frontend



b) Einteiliges Frontend mit integriertem Stoßfänger



c) Einteiliges Frontend ohne Stoßfänger

Abb. 4-4: Evolutionsstufen zum „soft face" [APP76b]

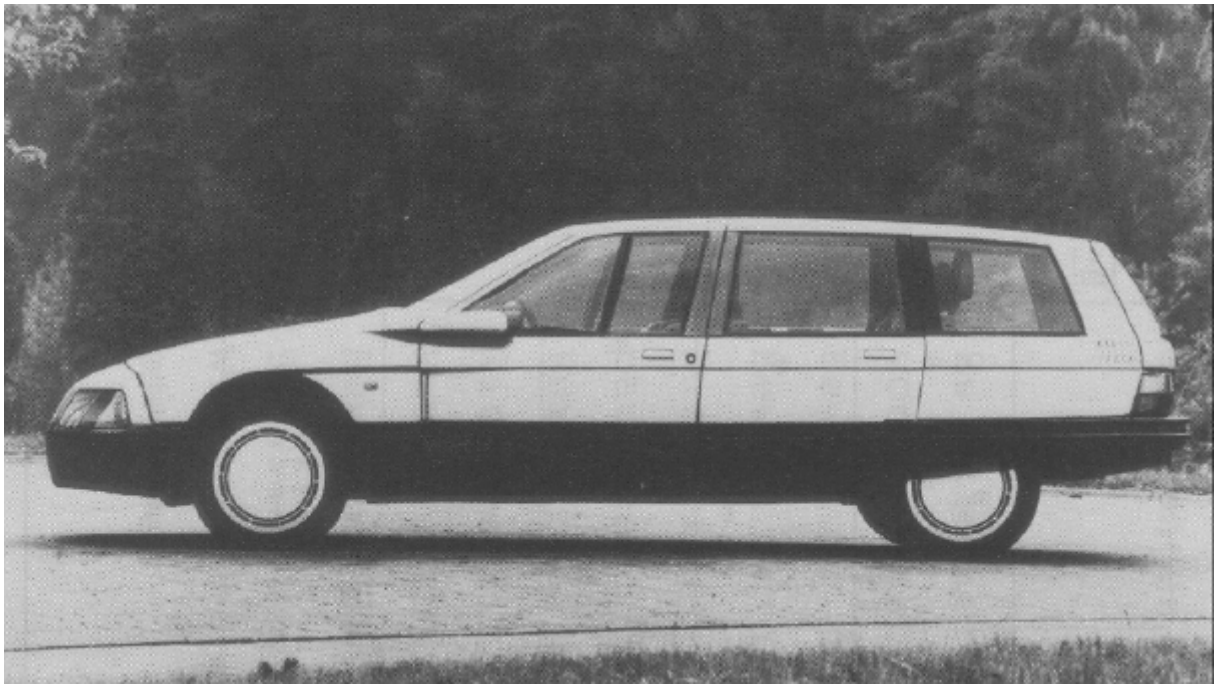


Abb. 4-5: UNI-CAR

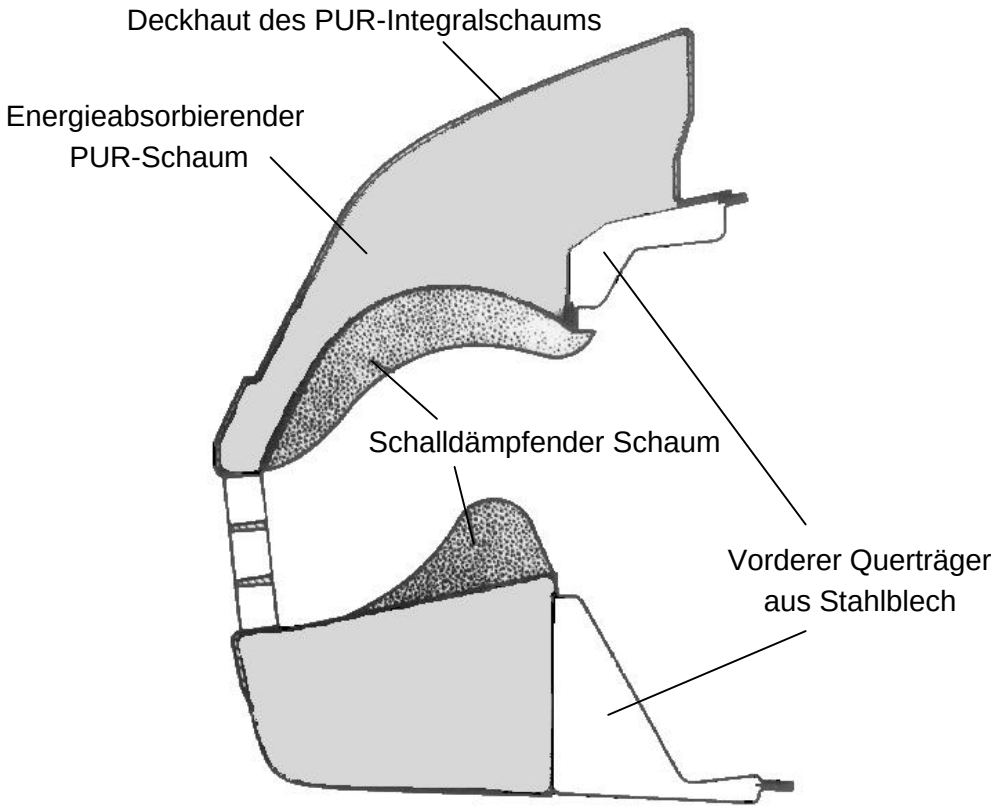


Abb. 4-6: Schnitt durch das "soft face" des UNI-CAR

Die Konstruktion von „soft faces“ kann ihre guten Eigenschaften verlieren, wenn nicht alle Komponenten der Fahrzeugfront in etwa die gleiche Steifigkeit bzw. Nachgiebigkeit besitzen. Ein glatter, weicher Stoßfänger ist wenig hilfreich, wenn beispielsweise gleichzeitig vorstehende Wischeranlagen oder Waschdüsen für die Scheinwerfer angebracht werden (Abb. 4-7). Versenkbar ausgeführte Waschdüsen wie beim VW Passat oder der Mercedes E-Klasse entschärfen sowohl die Nachgiebigkeits- als auch die Formaggressivität der Fahrzeugfront (Abb. 4-8).

Abb. 4-7: Glattflächiger Stoßfänger mit hervorstehenden Waschdüsen (Mitsubishi Carisma)

Abb. 4-8: Versenkte Waschdüsen (Volkswagen Passat)

Die Scheinwerfer und Blinker stellen ebenfalls einen härteren Bereich der Fahrzeugfront dar, welcher entschärft ausgeführt werden kann. Hier können Befestigungen verwendet werden, die sich schon bei kleinen Kräften horizontal verschieben. Abb. 4-9 zeigt eine mögliche Konstruktion eines horizontal nachgiebigen Scheinwerfers. Im oberen Teil der Abbildung ist der Scheinwerfer über Klemmen fest mit der Karosserie verbunden, während im unteren Bild der Scheinwerfer über die beiden Klemmen hinweg verschoben ist. Weitere Kriterien für die Scheinwerferauswahl werden in Kapitel 4.2.1 beschrieben.

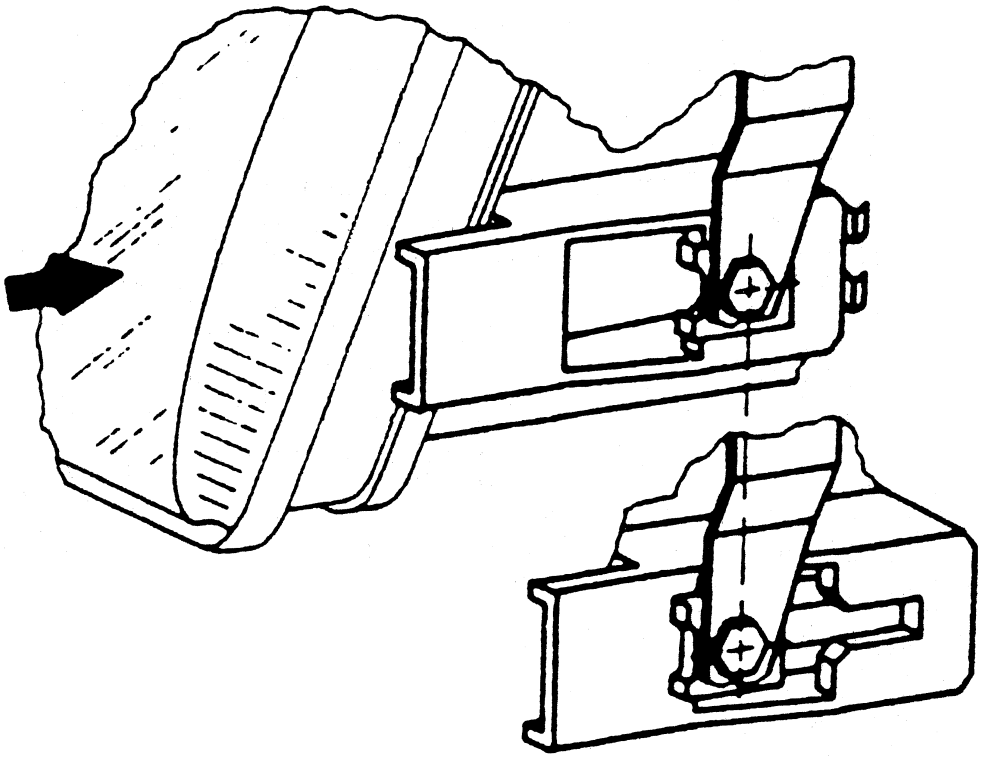


Abb. 4-9: Verschiebbare Scheinwerferbefestigung [THO92]

In direkten Kontakt mit der tragenden Struktur des Fahrzeugs kann der angefahrene Fußgänger kommen, wenn er im Bereich der vorderen Abschleppeinrichtung getroffen wird, die bei manchen Fahrzeugen zur besseren Zugänglichkeit weit vorne angebracht ist. Sie kann problemlos weiter hinten angebracht werden. Denkbar ist auch ein Haken, der sich auf Druck weich und auf Zug hart verhält. Maßgebend für die Konstruktion ist hierbei die Europäische Typgenehmigung für Abschleppeinrichtungen (77/389/EWG).

Ein kleines Detail im Hinblick auf eine fußgängerfreundliche Fahrzeugfront ist das Nummernschild, welches heute fast immer aus Blech besteht und vergleichsweise scharfe Kannten aufweist. Hier könnten Schilder aus Kunststoff Abhilfe schaffen. Auch Klebefolien sind als Kennzeichen verwendbar, wenngleich die deutschen Zulassungsvorschriften dies bisher noch einschränken.

Abschließend seien noch Zielkonflikte des Stoßfängers erwähnt, die bei der Auslegung zu berücksichtigen sind. Die Abb. 4-10 zeigt die entsprechenden Größen.

Stoßfängermerkmal	Fußgängerschutz	Stoßfängeraufgaben	derzeitige Formen
Steifigkeit	klein	groß	groß und klein oder klein und groß
Rückversatz	klein	groß	
Höhe	niedrig	hoch	25,6 – 32 cm

Abb. 4-10: Zielkonflikte der Stoßfängerauslegung [GRÖ89b]

4.2 Haubenvorderkante

Die Gestaltung der Haubenvorderkante erfolgte bisher insbesondere unter Berücksichtigung der Aerodynamik des Fahrzeugs sowie des Designs der verschiedenen Modellreihen des jeweiligen Herstellers. In manchen Fällen ist sogar von einer ausgeprägten Kante nichts mehr zu erkennen. Die Aerodynamik und der Fußgängerschutz stehen prinzipiell im Einklang zueinander. Dies gilt zumindest im Bereich der Formaggressivität. Großer Nachholbedarf besteht bei der Nachgiebigkeit der Haubenvorderkante. Wegen des erforderlichen Insassenschutzes haben kleine Fahrzeuge eine steifere Frontpartie und verlangen nach einer genaueren Betrachtung.

4.2.1 Form

Die Form der Haubenkante steuert maßgeblich den Gesamtbewegungsablauf des Fußgängers während der Kollision. Nach [HAR85b] verringert sich bei einer Anhebung der Haubenkante von 600 mm auf 850 mm die Kopfbelastung beim Aufschlag auf der Haube um bis zu 40 %, eine Verringerung des Rückversatzes von 350 mm auf 0 mm mindert bei mittelhoher Haube die Kopfbelastung um bis zu 30%. Eine Unfallstudie des EEVC aus dem Jahre 1982 [N.N.82] stellt fest, daß bei einer Haubenhöhe von 670 mm – 730 mm der Kopfaufschlag von Kindern vermieden werden kann. Außerdem verringert eine ausgeprägte Abrundung der Haubenkante mit einem Radius von über 150mm sowohl die Hüftverletzungen beim erwachsenen Fußgänger als auch die Unterleibs- und Rumpfverletzungen bei Kindern. Abb. 4-11 faßt die beschriebenen Maßnahmen zusammen.

Im Zusammenwirken mit anderen Stoßpunkten während des Fußgängerunfalls lassen sich noch weitere Aussagen machen. Untersuchungen von [KÜH80] besagen, daß der Anteil der Rutschweite beim Aufprall auf der Straße sinkt, je größer der Fußgänger im Vergleich zur Fahrzeugvorderkante ist. Des weiteren kann mit steigendem Radius der Haubenkante die Abwickellänge des Fußgängers auf dem Vorderwagen (WAD = wrap around distance) vergrößert werden.

Abmessung	vorher	nachher	Wirkung
Höhe der Haubenkante	600 mm	850 mm	Kopfbelastung sinkt um 40%
Rückversatz bei mittelhoher Haube	350 mm	0 mm	Kopfbelastung sinkt um 30%
Radius der Haubenkante	< 150 mm	> 150 mm	Hüft- und Rumpfverletzungen werden gemindert

Abb. 4-11: Formbezogene Maßnahmen an der Haubenvorderkante

Abb. 4-12: Three-Box-Design (Volvo S40) und One-Box-Design (Renault Twingo)

Die genannten Eigenschaften und Maßnahmen beziehen insbesondere sich auf die typische Pkw-Bauform, das „Three-Box-Design“ mit vom Rest der Karosserie optisch klar abgegrenztem Motorraum. Die vermehrt anzutreffenden Mini-Vans und Kleinwagen im „One-Box-Design“ besitzen keine ausgeprägte Haubenkante mehr, dort findet sich ein fließender Übergang zwischen dem Stoßfänger und der Haube, sowie des weiteren zwischen der Haube und der Windschutzscheibe. Für diese Fahrzeuge kommen ganz besonders die Kriterien für die Haube und die Windschutzscheibe zum Tragen, welche an anderer Stelle erläutern werden. Abb. 4-12 zeigt als Beispiele für die beiden Karosserieformen einen Volvo S40 und einen Renault Twingo.

Die Formaggressivität kann an den Details an der Haubenkante ebenso reduziert werden wie bei denen des Stoßfängers. Erwähnenswert sind dabei Klappscheinwerfer sowie Markenembleme.

Da ein beträchtlicher Teil der Fußgängerunfälle in den Morgen- und den Abendstunden geschehen, und demnach die Fahrzeugbeleuchtung eingeschaltet ist, sind Fahrzeugdesigns mit klappbaren Scheinwerfern abzulehnen. Heutige Scheinwerfer erlauben auch bei begrenzt zur Verfügung stehender Haubenhöhe und somit kleinem Bauraum eine gute Fahrbahnausleuchtung und erhöhen zusätzlich die aktive Sicherheit bei schlechter Sicht. So ist beim Opel Calibra der Lichtaustritt des Super-DE-Scheinwerfers mit Freiflächen-Kollektor nur 69mm hoch. Bei den meisten Fahrzeugen mit bisher klappbaren Scheinwerfern ist ein

Einsatz von starren Scheinwerfern möglich. Als Beispiel für einen solchen Ersatz sei der Mazda MX-5 erwähnt, der zunächst Klappscheinwerfer besaß, inzwischen nach einem Facelift mit starren Scheinwerfern ausgerüstet wird. Das Augenmerk richtet sich bei der Wahl der Scheinwerfer im Rahmen der Fahrzeugkonstruktion besonders auf die Xenon-Scheinwerfer mit Gasentladungstechnik, nicht zuletzt auch wegen der größeren Leuchtkraft.

Als ein Relikt aus den Anfängen des Automobils dürfen auf der Haubenkante stehende Markenembleme angesehen werden. Obwohl sie inzwischen sehr nachgiebig gestaltet werden, wird bei einem Verzicht auf solche Embleme die Formaggressivität deutlich gesenkt.

4.2.2 Steifigkeit

Während für den Aufprall des Beines am Stoßfänger die Steifigkeit nach den biomechanischen Grenzwerten des Fahrzeuginsassen ausgelegt werden kann, ist eine solche Übertragung von Grenzwerten beim Hüftanprall an der Haubenvorderkante aufgrund der veränderten Kinematik nicht möglich. Im Zuge der schrittweisen konstruktiven Annäherung an integrierte Frontends und „soft faces“ erscheint es sinnvoll, die Haubenvorderkante ähnlich nachgiebig zu gestalten wie den Stoßfänger. Unter Berücksichtigung der besonderen Gefahr für Kinder entspricht dies einer maximalen Kraft von 4000 N sowie einem Verformungsweg von 10 cm.

Die Haubenvorderkante muß als Übergangsbereich zwischen dem weichen Stoßfänger und der vergleichsweise harten Haube und ihrem Unterbau (Haubenschloß/Scharnier, Querträger) einen gleichmäßigen Übergang gewährleisten. Einerseits vergrößert eine geringe Steifigkeit der Haubenkante die WAD, andererseits kann eine verringerte Steifigkeit der Haubenkante zu Kraftspitzen an der Fuge zur Haube führen. Möglicherweise bietet hier eine zusätzliche Optimierung der Haubensteifigkeit das beste Verbesserungspotential.

4.3 Haube

Die Haube stellt den größten Flächenanteil am Vorderbau von Personenwagen. Einen vergleichbar großen Einfluß hat die Haube auf die Folgen des Fußgängerunfalls. Sie übernimmt einen Großteil der auftretenden Energieumwandlungen und spielt insbesondere für die Verletzungen im Kopfbereich des Fußgängers die entscheidende Rolle.

Während sich die Form der Haube hauptsächlich den Anforderungen des Luftwiderstandes und dem Package der Aggregate angepaßt hat, wurde die Nachgiebigkeit in der Vergangenheit kaum berücksichtigt. Geforderte Oberflächen- und Lackqualität sowie schallmindernde Maßnahmen haben das Auswahlspektrum des Haubenmaterials auf Kosten der passiven Sicherheit für Fußgänger stark eingeschränkt. Probleme ergeben sich auch aus der anzuwendenden Fertigungstechnik, beispielsweise dem notwendigen Falzen der Haubenbleche an den Randzonen.

Des weiteren haben in den vergangenen Jahren Fahrzeuge mit „One-Box-Design“ einen steigenden Marktanteil verzeichnet, was sich ebenfalls negativ auf die Folgen eines even-

tuellen Fußgängerunfalls auswirkt. Die Konstruktionskriterien für die Haube bei dieser Fahrzeugform sind daher besonders zu berücksichtigen.

4.3.1 Form

Die erste Anforderung an die Haubenform eines fußgängerfreundlichen Fahrzeugs bezieht sich auf die Länge, speziell zur Vermeidung eines Kopfaufschlages auf dem Windlauf. Die Haube soll dafür möglichst lang sein, bei einer Haubenhöhe von rund 700 mm sind Werte zwischen 1200 mm und 1400 mm für einen „weichen“ Kopfaufprall des erwachsenen Fußgängers erforderlich [N.N.82]. Darin ist der auftretende Rutschweg bereits berücksichtigt.

Diese Forderung bezieht sich auf eine Haube in konventioneller Bauweise, also ohne Überdeckung von Windlauf und Scheibenwischerachsen durch die Haube. Daraus ergibt sich eine weitere Forderung an die Form der Haube. Harte Bauteile auf der Außenseite des Fahrzeugs sollen, falls nicht an ganz anderer Stelle anzubringen, von der Haube überdeckt werden. Dies steht im Einklang mit günstiger Aerodynamik des Fahrzeugs. Beispiele sind die bereits genannten Achsen der Scheibenwischer, die Scheibenwaschdüsen sowie die Oberkanten der Kotflügel. Radioantennen können auf dem Fahrzeugdach oder in der Heckscheibe untergebracht werden. Wie Abb. 4-13 zeigt, wurden alle diese Forderungen im Volkswagen Lupo (hier in der Variante als „3-Liter-Lupo“ mit zusätzlich abgerundetem Stoßfänger) umgesetzt.

Abb. 4-13: Volkswagen Lupo mit fußgängerfreundlicher Haubenform

Ähnlich dem Stoßfänger soll die Haube möglichst glatt ein, um bei einem Kopfaufprall keine Kraftspitzen in der Kontaktzone hervorzurufen.

Die Neigung der Haube hat einen Einfluß auf die Kopfaufschlaggeschwindigkeit beim Fußgängerunfall. Zur Milderung dieses Aufpralls soll der Neigungswinkel der Haube 0° – 6° betragen. Dies liegt an der daraus resultierenden Anhebung der Haubenkante und dem verkleinerten Höhenverhältnis von Fußgänger zur Fahrzeugfront. Dies hat einen verringerten Drehimpuls des Fußgängers zur Folge [APP76b]. Abb. 4-14 faßt die Anforderungen an die Haubenform zusammen.

Abmessung	Wert	Wirkung
Länge der Haube bei konventioneller Bauweise	1200 – 1400 mm	Vermeidung vom Kontakt mit dem Scheibenrahmen
Abwickellänge bei Überdeckung des Windlaufs und der Scheibenwischerachsen	185 cm + 10 cm	Vermeidung vom Kontakt mit dem Scheibenrahmen
Oberfläche der Haube	glatt	Vermeidung von Kraftspitzen
Neigungswinkel der Haube	0° – 6°	Verringerung der Kopfaufprall-geschwindigkeit

Abb. 4-14: Maßnahmen an der Haubenform

4.3.2 Steifigkeit

Die Steifigkeit der Fronthaube hat direkten Einfluß auf den HIC-Wert, den der angefahrene Fußgänger erfährt. Dabei ist zu beachten, daß die Haube weder zu hart sein darf, da sonst die Verzögerungswerte zu hoch werden, noch darf sie zu stark nachgeben, da sonst ein Kontakt mit harten Bauteilen im Motorraum möglich wird.

Es wird ein biomechanischer Grenzwert des Kopfes von 4000 N angenommen, verteilt auf einer Kontaktfläche von 150 cm^2. Damit ergibt sich eine maximal anzustrebende Flächenpressung von 27 N/cm^2, unter der sich die Haube deformieren muß.

Die vorhandenen Verstrebungen sind neben den Randbereichen, dem Haubenschloß und den Scharnieren die kritischen Stellen bei der Nachgiebigkeit der Haube. Durch kleine konstruktive Änderungen können sie entschärft werden.

Verstrebungen können durch elastische Elemente mit dem Blech verbunden und somit nachgiebiger werden. Randbereiche der Haube und Blechfalzungen können weicher gestaltet werden, indem nur bereichsweise umgefalzt wird. Hinzu kommt die Maßnahme, hochstehende Kanten durch horizontale Kanten zu ersetzen (Abb. 4-15), zumindest aber diese Kanten durch Löcher im vertikalen Steg weicher zu gestalten (Abb. 4-16).

Haubenscharniere und das Haubenschloß können auf nachgiebigen Holmen befestigt sein. Diese müssen zur Vermeidung von Schwingungen der Haube im normalen Fahrbetrieb eine angepaßte Nachgiebigkeits-Kennlinie besitzen, beispielsweise hart beim Ausfedern nach oben und weicher beim Einfedern nach unten.

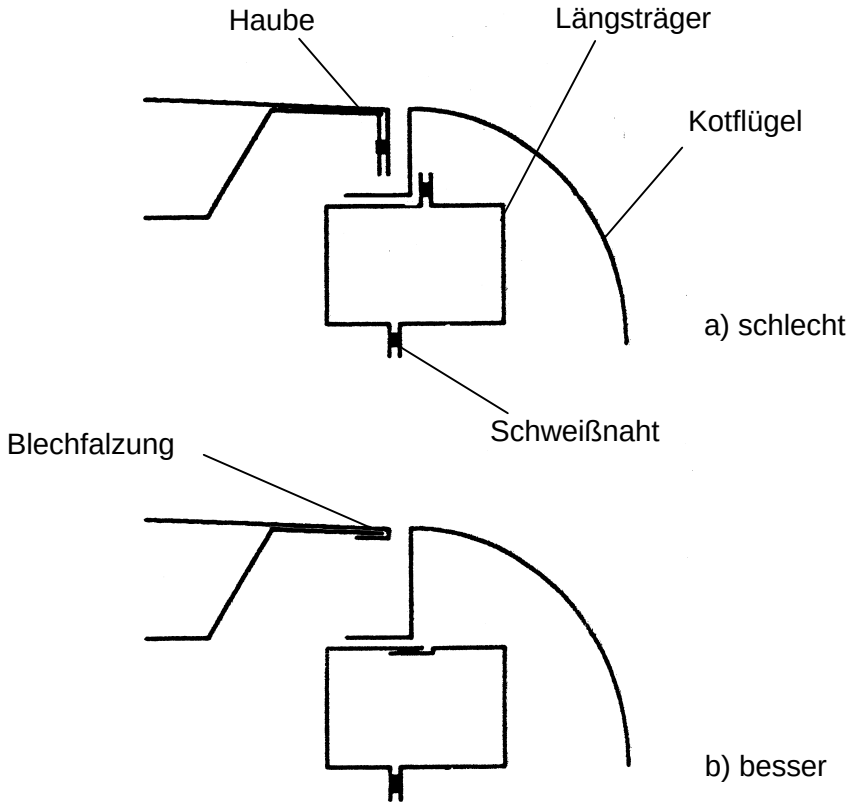


Abb. 4-15: Vermeidung von vertikalen Kanten im Haubenbereich [LEM94]

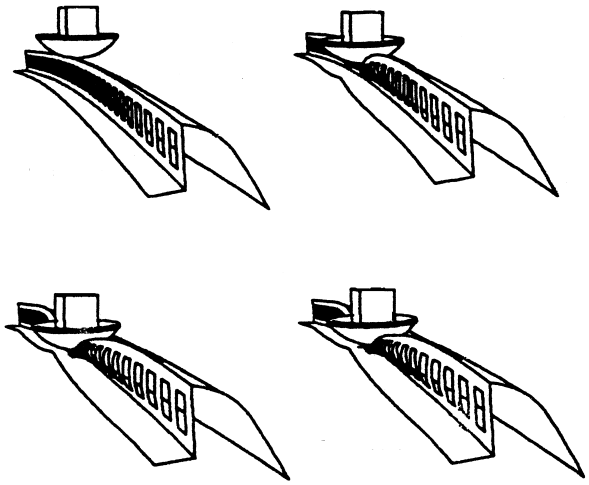


Abb. 4-16: Lochung von Kotflügelblechen [LEM94]

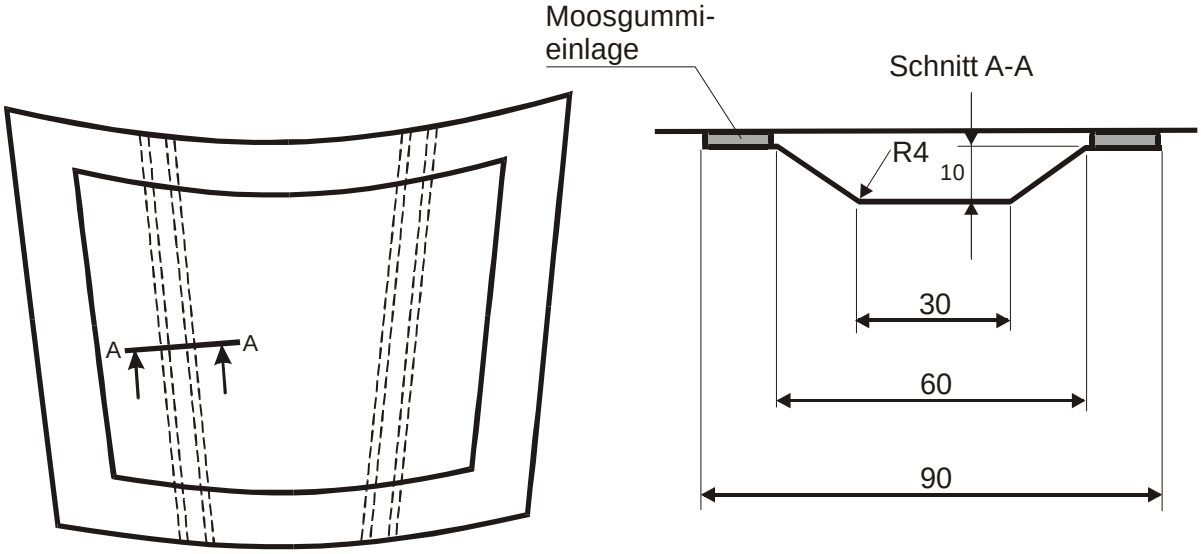


Abb. 4-17: Beispiel einer Haubenverstrebungen mit elastischer Haubenbefestigung [THO92]

Zwischen der Haube und den darunterliegenden Bauteilen ist ein Abstand von 60 – 80mm notwendig, um bei Kollisionen bis 40 km/h akzeptable Kopfverzögerungen (HIC < 1000) zu erreichen (vgl. Kap. 2.3). Es bieten sich drei Möglichkeiten an:

- Verwendung mehrschichtiger Hauben
- Absenken der Aggregate
- Mechanismus zum Anheben der Haube im Falle eines Unfalls

4.3.2.1 Verwendung mehrschichtiger Hauben

Die Vergrößerung des Verformungsweges unter der Haube geht in der Regel einher mit der Vergrößerung der Haubendicke und läßt sich bei Berücksichtigung des Gewichts nur mittels angepaßter Werkstoffe und Verwendung einer Sandwichstruktur realisieren. Abb. 4-18 zeigt ein Beispiel für eine solche mehrschichtige Struktur, wie es im UNI-CAR angewandt wurde.

In Sandwichstrukturen können verschiedene Werkstoffe zum Einsatz kommen. Stahl und Aluminium als Außenhaut bieten den Vorteil der Formbarkeit durch Tiefziehen und die gute Lackierbarkeit, wobei das Tiefziehen allerdings eine gewisse Mindestdicke erfordert. Kunststoffe bieten demgegenüber sowohl ein geringeres Gewicht als auch ein besseres Verformungsverhalten, erkaufen diesen Vorteil jedoch durch meist schlechtere Lackierbarkeit sowie ungünstigerer chemischer und thermischer Resistenz.

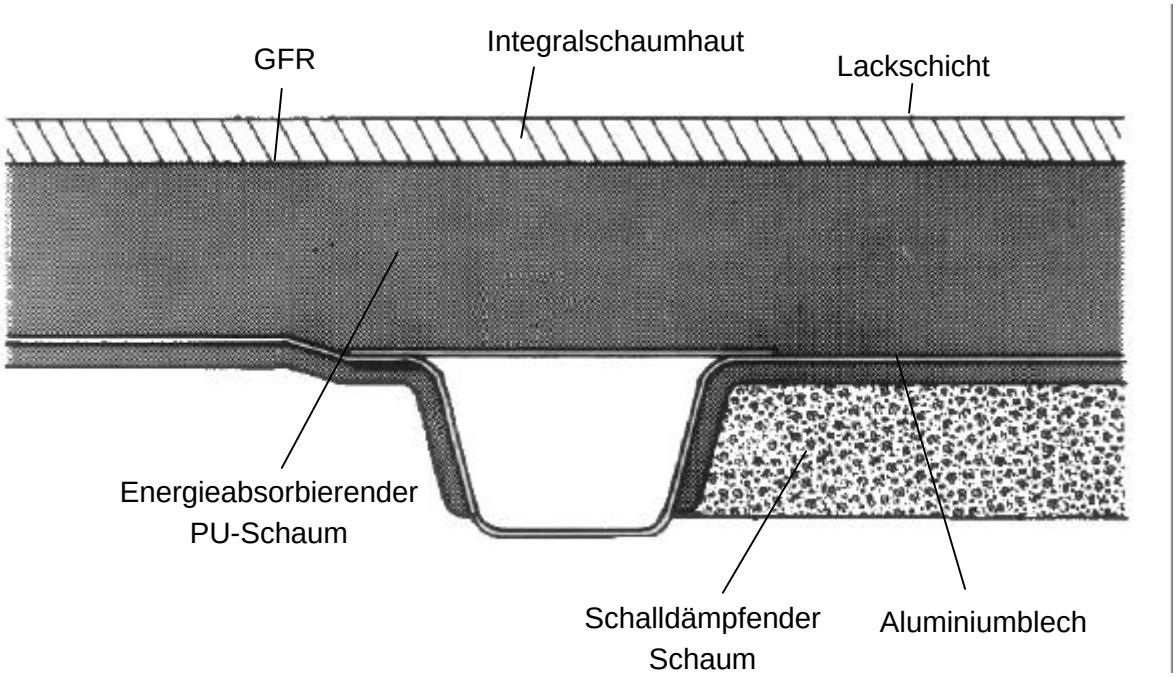


Abb. 4-18: Schematischer Aufbau der Hauben-Sandwichstruktur des UNI-CAR

Stahl und Aluminium	
+ durch Tiefziehen formbar + gute Lackierbarkeit	- Mindestdicke zum Tiefziehen erforderlich
Kunststoff	
+ gutes Verformungsverhalten + geringes Gewicht	- schlechtere Lackierbarkeit - chemische Resistenz - thermische Resistenz

Abb. 4-19: Eigenschaften der Werkstoffe für Sandwich-Außenhäute [THO92]

Das Sandwichmaterial kann aus energieabsorbierendem Schaum bestehen, der viele der geforderten Eigenschaften erfüllt. Er erlaubt eine vielfältige Variation Dicke, Oberfläche und Material über der Haubenfläche, somit werden weichere Randzonen ermöglicht und die Nachgiebigkeit der Haube über ihre gesamte Fläche homogenisiert. Nachteilig sind auch hier die thermische Beständigkeit, dazu kommen eine aufwendige Produktion, ein eventuell höheres Gewicht sowie schlechte Recyclingfähigkeit. Prüfkörperversuche von [THO92] haben gezeigt, daß steigende Dicke des Kunststoffschaums nicht mehr Verformungsweg zur Verfügung stellt, sondern die Struktur versteift. Des weiteren hat das Raumgewicht der Schäume nur wenig Einfluß auf sein dynamisches Verhalten.

Nicht berücksichtigt wurde hier die Möglichkeit, Metallschäume als Sandwichmaterial zu verwenden, welche vielleicht einige der genannten Nachteile ausgleichen. Auch die Frage nach der Herstellung einer solchen Struktur ist noch nicht ausreichend geklärt.

Neben Schäumen können auch energieabsorbierende Aluminium-Waben eingesetzt werden. Der aufwendigen Fertigung und dem daher hohen Preis stehen einige Vorteile entgegen. Gute Variationsfähigkeit und die nach Bedarf unterschiedlichen Verformungseigenschaften werden durch geringes Gewicht und günstiges thermisches Verhalten ergänzt. Wird als Oberflächenmaterial ebenfalls Aluminium verwendet, kommt noch gutes Recycling-Potential hinzu. Eine Haube mit Waben-Sandwichstruktur erfordert nach derzeitiger Erkenntnis geschäumte Randzonen und Krafteinleitungspunkte, was die genannten Nachteile mit sich bringt.

Die Verwendung von Polypropylen-Hohlkammerplatten ist vergleichsweise preisgünstig und örtlich gut anwendbar. Sie bieten auch bei Kontakt mit Motorteilen noch einen Restverformungsweg und haben ein geringes Gewicht. Zu den möglichen Problemen zählen das Temperaturverhalten, sowie die aufwendige Verarbeitung und das schlechte Recycling der Klebeverbindung zum Außenblech.

In einigen Punkten bietet eine Struktur mit Abstandsgewebe aus harzgetränkter Glasfaser (Abb. 4-20) günstige Eigenschaften. Es lassen sich die Variation von Stegform und Abständen, sowie die örtlich gute Anwendbarkeit so nutzen, daß ein geringes Gewicht erreicht wird. Durch das Harz ist auch die Verbindung mit dem Außenblech gewährleistet. Nachteilig sind hier das schlechte Recycling und unter Umständen lange Aushärtzeiten des Harzes.

Bei allen Werkstoffpaarungen in Sandwichstrukturen muß das thermische Verhalten derart abgestimmt werden, daß es nicht zu Verspannungen in der Haube kommt, da sie das dynamische Verhalten negativ beeinflussen könnten.

In Abb. 4-21 sind die Vor- und Nachteile der verschiedenen Werkstoffe zusammengefaßt.

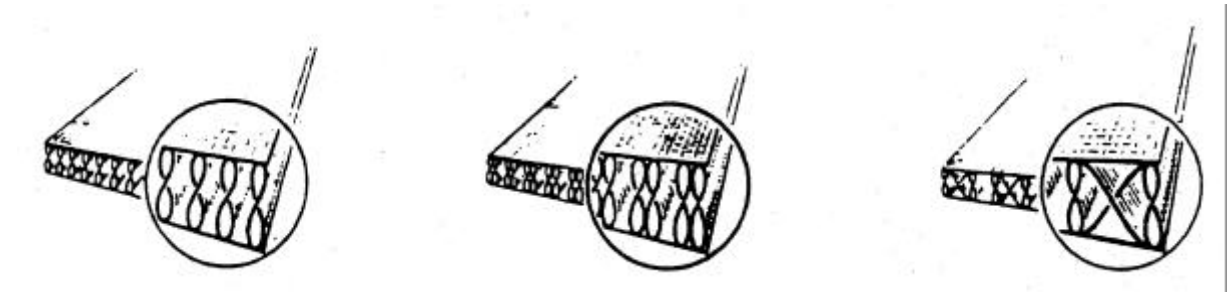


Abb. 4-20: Abstandsgewebe für Sandwichstrukturen (Fa. Vorwerk)

Energieabsorbierender Schaum	
+ vielfältige Variation von Dicke, Oberfläche und Material + weichere Randzonen möglich + gleichmäßige Eigenschaften über der gesamten Motorhaube + unterschiedliches Verformungsverhalten möglich	- aufwendige Produktion - thermische Beständigkeit - eventuell hohes Gewicht - schlechtes Recycling
Energieabsorbierende Aluminium-Waben	
+ vielfältige Variationen möglich + gutes thermisches Verhalten + gutes Recycling (bei Alu-Oberflächen) + geringes Gewicht + unterschiedliche Verformungseigenschaften je nach Bedarf realisierbar	- aufwendige Fertigung - hoher Preis
Polypropylen-Hohlkammerplatten	
+ örtlich leicht anwendbar + bietet bei Kontakt mit Motorteilen noch einen Restverformungsweg + preisgünstig + geringes Gewicht	- aufwendige Verarbeitung - eventuell Probleme mit Temperaturen im Motorraum - schlechtes Recycling bei Verklebung
Abstandsgewebe aus harzgetränkter Glasfaser	
+ verschiedene Ausführungen möglich (Abstand, Stegform) + örtlich gut anwendbar + geringes Gewicht	- eventuell lange Aushärtzeit des Harzes - schlechtes Recycling

Abb. 4-21: Eigenschaften von Sandwich-Füllkörpern [THO92]

4.3.2.2 Absenken der Aggregate

Die Absenkung der Aggregate ist in einigen Fällen wegen zu geringer Bodenfreiheit oder aufgrund ihrer Funktion nicht durchführbar, doch bei manchen Bauteilen problemlos möglich. Auch eine nachgiebige Befestigung der Bauteile läßt sich häufig realisieren. Das folgende Schnittbild (Abb. 4-22) durch den Vorderwagen eines Saab 9000 zeigt beispielhaft einige betroffene Bauteile.

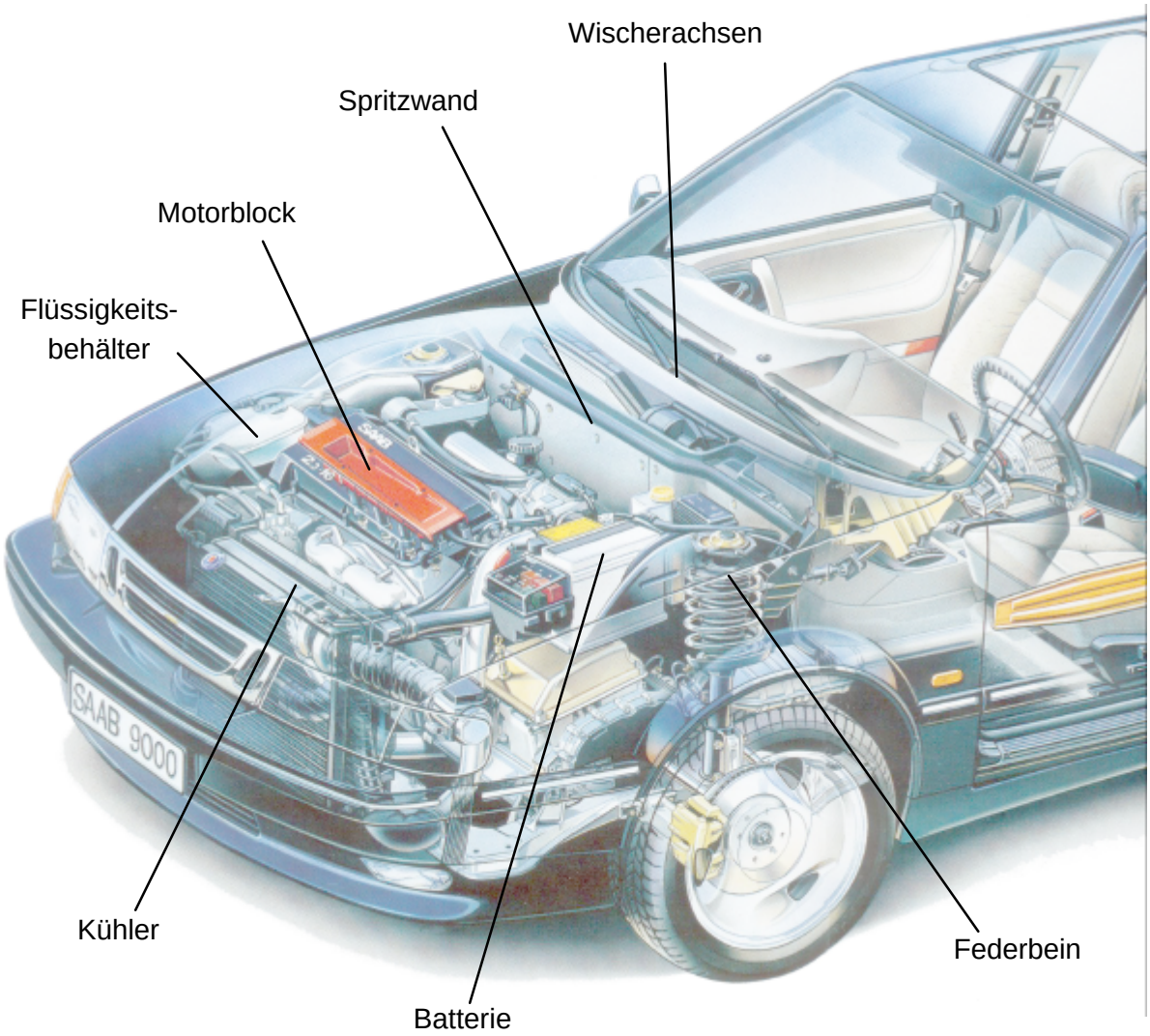


Abb. 4-22: Unterbau der Haube mit nachgiebigkeitshemmenden Bauteilen (Saab 9000)

Die Wischerachsen können, wie im Bild dargestellt, von der hinteren Kante der Haube verdeckt werden. Dies hat gleichzeitig positiven Einfluß auf die Aerodynamik. Des weiteren sollten die Wischerachsen nachgiebig gelagert sein, um einen eventuellen Aufprall des Kopfes zu mildern. Die bisher verwendeten Achskonstruktionen aus Stahl können möglicherweise durch Kunststoffvarianten ersetzt werden.

Die Spritzwand kann in jedem Fall mit einer abgerundeten Oberkante versehen sein, ihre Geometrie läßt sich wahrscheinlich auch ohne Abstriche für den Insassenschutz optimieren. Grundlage für eine solche Optimierung kann die Betrachtung der verschiedenen Krafteinleitungspunkte und des Kraftflusses bei Fußgängerunfällen im Vergleich zum Frontalunfall mit einem anderen Fahrzeug sein.

Eine Absenkung des Motorblocks ist in der Regel nicht möglich, vielfach jedoch eine Neigung um die Längsachse. Neben der möglichen Verwendung von Kunststoffen z.B. beim Ansaugkrümmer ist auch eine Verbesserung der Aggregateform möglich. So läßt sich anstelle eines hochragenden Öleinfüllstutzens ein versenkter Deckel mit Griffmulde realisieren.

Ähnliche Einfüllöffnungen können auch an anderen Flüssigkeitsbehältern im Motorraum verwendet werden. Ihre Befestigung sollte nachgiebig gestaltet werden. Dies kann mittels Klemmverbindungen mit definierter Sollbruchstelle geschehen. Denkbar ist ebenfalls eine Konstruktion, bei der beispielsweise der Behälter für das Scheibenwaschwasser derart angeordnet ist, daß ein härteres Bauteil verdeckt wird und der angefahrene Fußgänger nicht auf dieser harten Stelle auftrifft. Dafür muß allerdings der Flüssigkeitsbehälter selbst energieabsorbierend sein.

Der Kühler stellt ein Bauteil im Motorraum dar, das aufgrund seiner Funktion bei der Formgebung und seiner Position im Motorraum nur wenig Spielraum läßt. Ähnlich wie bei der Spritzwand kann die Oberseite abgerundet gestaltet werden. Die Kühllamellen und die Wasserleitungen lassen sich horizontal verlegen, damit die Nachgiebigkeit erhöht wird. Eine leichte Neigung des Kühlers sowie eine seitliche Befestigung an der Karosserie verbessern möglicherweise ebenfalls das Verformungsverhalten in vertikaler Richtung. Untersuchungen liegen hierzu nicht vor.

Die Fahrzeugbatterie kann prinzipiell an einer beliebigen Stelle im Fahrzeug angebracht werden. Es muß dabei nur die Zugänglichkeit für Starthilfe und den Batteriewechsel gewährt bleiben. Für den Fall, daß sie im Frontbereich anzubringen ist, sollte eine Position in ausreichendem Abstand von der Haube gewählt werden.

Bauteil	Maßnahme
Wischerachsen	- Verdeckung durch die Motorhaube - Verwendung nachgiebigen Materials
Spritzwand	- Abgerundete Oberkante - Geometrie angepaßt an die Krafteinleitung beim Kopfaufprall
Motorblock	- Neigung um Längsachse - Öleinfülldeckel platzsparend mit Griffmulde
Flüssigkeitsbehälter	- Deckel mit Griffmulde - Nachgiebige Befestigung mit Sollbruchstellen - Verdeckung von härteren Bauteilen
Kühler	- Abgerundete Oberkante - Weiche Verformungscharakteristik in vertikaler Richtung
Batterie	- Anbringung an anderer Stelle im Fahrzeug (z.B. Kofferraum) - Anbringung tief im Motorraum
Federbein	- Platzsparende Verschraubung - Verwendung von Fahrschemeln
Haubenscharnier	- Ausreichender Abstand zur Haubenoberseite - horizontale Verschraubung

Abb. 4-23: Maßnahmen an Aggregaten im Motorraum [THO92]

In einer Vielzahl von Personenkraftwagen kommen an der Vorderachse Radaufhängungen mit Federbeinen zum Einsatz. Sie stellen eine kritische Stelle bei der Nachgiebigkeit des Haubenbereichs dar. Eine platzsparende Verschraubung, wie in Abb. 4-24 zu sehen, kann für die Haube ein paar Zentimeter Verformungsweg schaffen. Im Hinblick auf die passive Sicherheit beim Fußgängerunfall ist eine Radaufhängung mit Fahrschemeln den Federbeinen vorzuziehen.

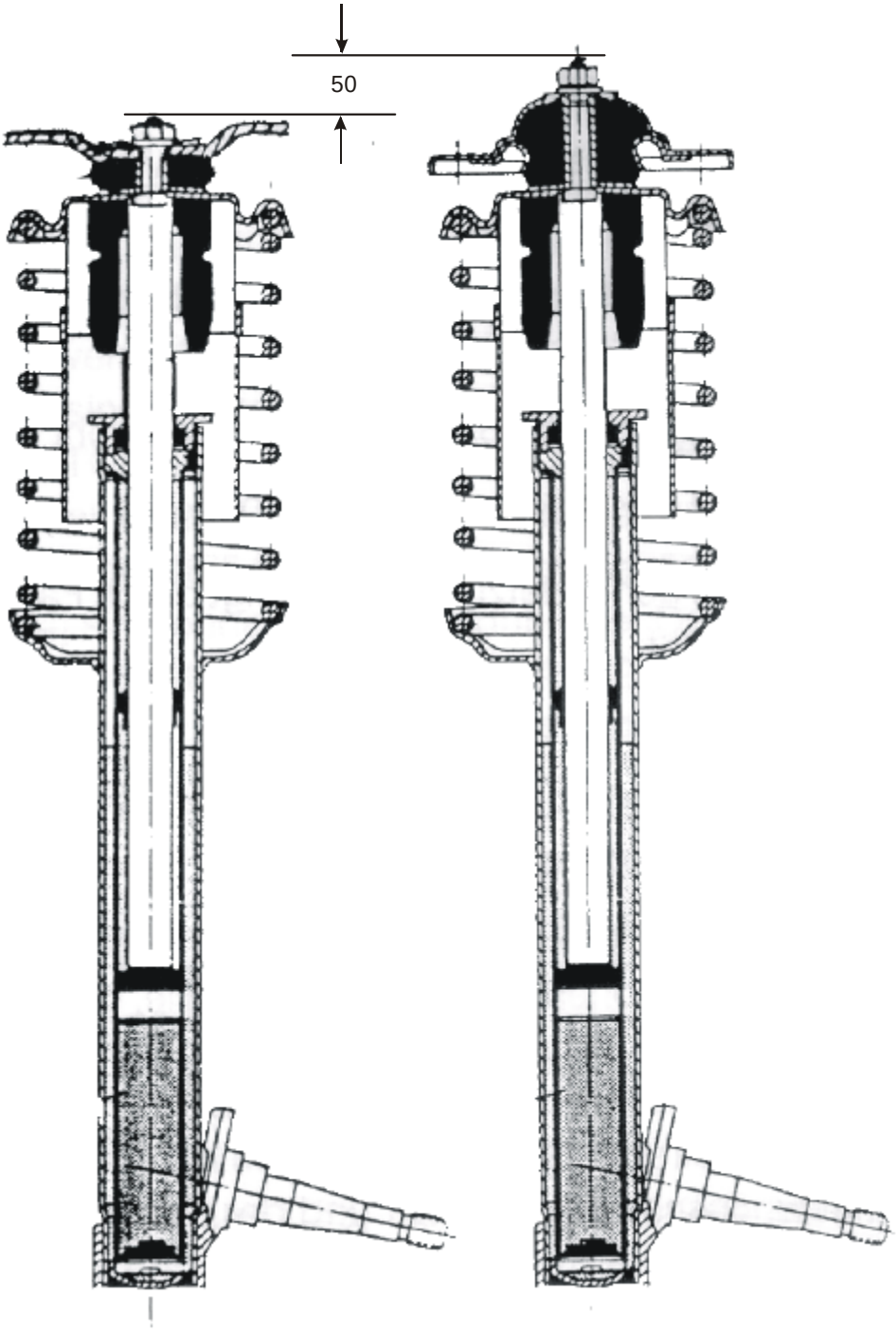


Abb. 4-24: Konventionelles (rechts) und optimiertes Federbein (links)

4.3.2.3 Mechanismus zum Anheben der Haube im Falle eines Unfalls

Im Rahmen der Fußgängersicherheit bei Kraftfahrzeugen wurden schon einige variable Systeme zur Minderung der Verletzungen angefahrener Fußgänger entwickelt, darunter auch Systeme, die während der Kollision selbsttätig aktiviert werden. Die Ideen bei der Milderung des Kopfaufpralls laufen auf einen Mechanismus hinaus, bei dem durch den Hüftaufprall an der Haubenvorderkante eine vertikale und gegebenenfalls auch eine horizontale Verschiebung der Haube ausgelöst wird. Außerdem kann sich ein günstiger Kraftverlauf für den Hüftaufprall ergeben.

Bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von 35 km/h vergehen zwischen dem ersten Kontakt und dem Kopfaufschlag auf der Haube bei konventioneller Karosserieform im „Three-box-design“ rund 130 ms, vom Hüftanprall bis zum Kopfaufschlag sind es rund 100 ms. Während dieser Zeit muß ein variables System eine Verschiebung der Haube durchführen.

Es sind zwei verschiedene Mechanismen vorstellbar. Sie basieren auf der Bereitstellung der zum Verschieben der Haube benötigten Energie.

Eine Verschiebung der Haube kann im einfachsten Fall mit Hilfe der vom Fahrzeug zu absorbierenden kinetischen Energie des Fußgängers realisiert werden. Dabei wird die Haubenhinterkante angehoben und die Haubenvorderkante horizontal nach hinten verschoben. Abb. 4-25 zeigt ein Beispiel für einen solchen Mechanismus an einer nach vorne klappbaren Haube.

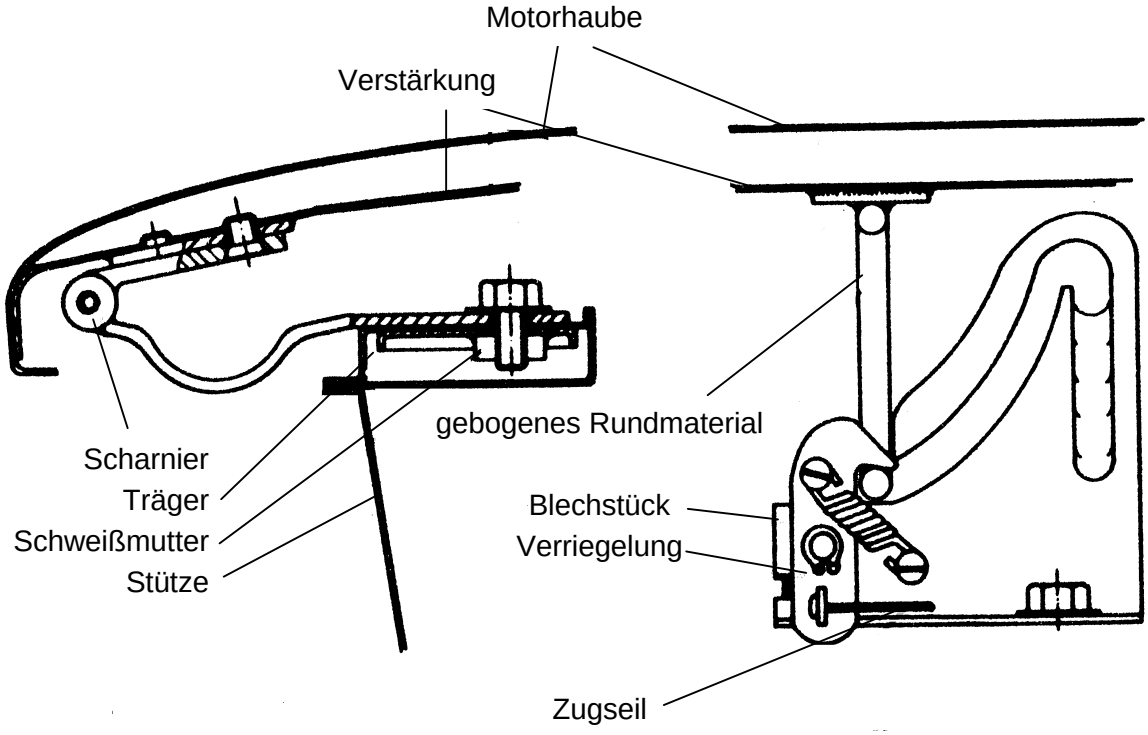


Abb. 4-25: Scharnier und hintere Lagerung einer verschieblichen Haube [APP76b]

Eine Verschiebung mit fremder Energie würde eines Kollisions-Sensors erfordern, der die Verschiebung der Haube auslöst. Die Verschiebung der Haube ist denkbar mittels eines elektrischen Stellmotors, eines pneumatisch, hydraulisch oder pyrotechnisch bewegten Kolbens oder im einfachsten Fall mittels einer vorgespannten Feder. Die sehr kurze Reaktionszeit der zu verwendenden Komponenten und die Sensorik stellt zur Zeit bei der Konstruktion solcher Systeme ein noch zu lösendes Problem dar. Da bei den meisten Kollisionen gleichzeitig gebremst wird, könnte bei Verwendung von hydraulischen Kolben auch über eine Energieversorgung aus dem Bremssystem nachgedacht werden, wenngleich dies nur als zusätzliche Energiequelle in Frage kommt. Bei Integration sogenannter Bremsassistenten, wie in der Mercedes-Benz A-Klasse im Einsatz, besteht die Möglichkeit, durch ein Signal dieses Systems eine Haubenverschiebung auszulösen.

Unabhängig von der Energiebereitstellung ist bei der Konstruktion beider Systeme eine Sperre vorzusehen, die verhindern soll, daß die Haube beim Versagen in den Fahrgastraum eindringt.

Insgesamt lassen sich die an der Haube zu treffenden Maßnahmen auf zwei Kriterien zurückführen. Die Haube soll glatt sein und einen ausreichend großen Verformungsweg bei angepaßtem Kraftverlauf zur Verfügung stellen. Wegen der besonderen Risiken, die mit Kopfverletzungen verbunden sind, muß die Fronthaube bei der Konstruktion einer fußgängerfreundlichen Fahrzeugfront besonders berücksichtigt werden.

4.4 Windschutzscheibe

Die Windschutzscheibe spielt insbesondere bei Fußgängerunfällen mit Kleinwagen eine wichtige Rolle, da die Abwickellänge des Fußgängers über das hintere Haubenende hinausragen kann. Die WAD wird daher häufig bis zur Dachkante gemessen. Im Geschwindigkeitsbereich über 40 km/h hat dieser Bereich auch bei größeren Fahrzeugen einen beträchtlichen Anteil an den Kopfverletzungen, da die Rutschweite auf der Haube steigt. Zum Bereich der Windschutzscheibe gehören auch der Windlauf, die Windlaufsäule (A-Säule), der Dachrahmen und die Außenspiegel.

4.4.1 Form

Die Verletzungsfolgen eines Kopfaufpralls im Scheibenbereich werden gemildert, wenn die Windschutzscheibe bündig in den Rahmen eingefaßt ist. Scharfe Kanten sind zu vermeiden, alle Übergänge zum Dach und zu den Seitenflächen sollten abgerundet sein. In der Draufsicht ist eine leichte Pfeilung vorzusehen. Ein besonderes Augenmerk gilt dabei den Regenrinnen. Sie können in die Windlaufsäulen versenkt werden.

Die Neigung der Windschutzscheibe wird bei aerodynamisch günstiger Auslegung auch für den Fußgängerschutz vorteilhaft. Bei Neigungswinkeln unter 35° zur Horizontalen werden geringere AIS-Werte erreicht [OTT95]. Aufgrund der erforderlichen Fahrzeuglänge sind Frontscheiben von Kleinwagen durchweg steiler ausgeführt, was bei ihnen einer intensiveren Betrachtung der Steifigkeit dieses Fahrzeugbereichs erfordert.

Die Außenspiegel können, wie in Abb. 4-26 am Beispiel des Opel Vectra gezeigt, mit einem sehr fließenden Übergang an der Windlaufsäule untergebracht werden. Diese Konstruktion ist auch aus Sicht der Fahrzeugakustik positiv zu bewerten.

Abb. 4-26: Außenspiegel mit glattem Übergang zur Haube (Opel Vectra)

4.4.2 Steifigkeit

Die Frontscheibe darf sich bei einem Aufprall nicht aus ihrer Halterung lösen und in den Fahrgastraum eindringen. Dies wäre mit eine großen Verletzungsgefahr für den angefahrenen Fußgänger und die Fahrzeuginsassen verbunden. Eine Verringerung dieser Gefahr kann mit Frontscheiben aus Verbundsicherheitsglas (VSG) erreicht werden [OTT95]. Außerdem sinkt bei diesen Scheiben im Vergleich zum Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) die Gefahr schwerer Schnittverletzungen im Kopfbereich des Fußgängers. Auch wenn die AIS-Bewertung diese Art der Verletzungen als leicht einstuft, sind beispielsweise bleibende Narben im Gesicht des Unfallopfers eine möglicherweise lebenslange psychische Belastung.

Die Verwendung von Kunststoff als Material für Scheibenwischer ist problemlos und zusätzlich mit einer Gewichtseinsparung verbunden. Die Verwendung von Einarm-Scheibenwischern ist allerdings wegen des verringerten überstrichenen Sichtfeldes im Hinblick auf die Unfallvermeidung ungünstig.

Die Einfassung der Scheibe sollte eine energieabsorbierende Wirkung haben (Abb. 4-27 und Abb. 4-28). Dies gilt für direkte Stöße auf den Scheibenrahmen und für Stöße auf die

Scheibe. Da heute verwendete Frontscheiben auch zur Torsionssteifigkeit des Fahrzeugs beitragen, müssen entsprechende Kompensationen an der A-Säule sowie dem Dachrahmen vorgenommen werden. Maßgebend für das Sichtfeld ist die Europäische Typgenehmigung 77/649/EWG.

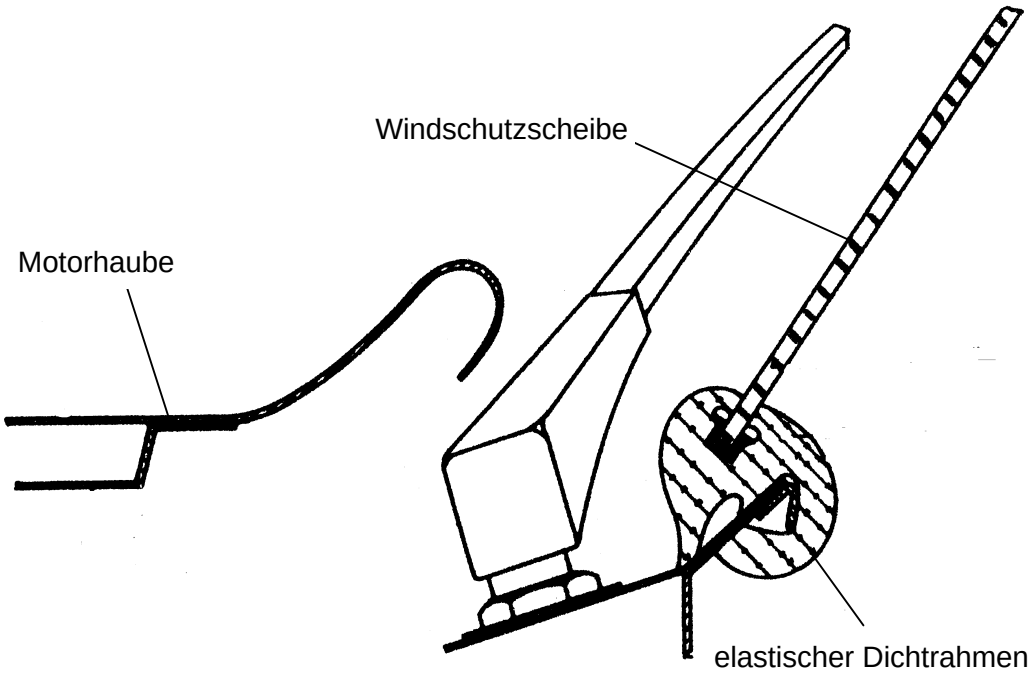


Abb. 4-27: Windlauf mit elastischer Scheibeneinfassung [APP76b]

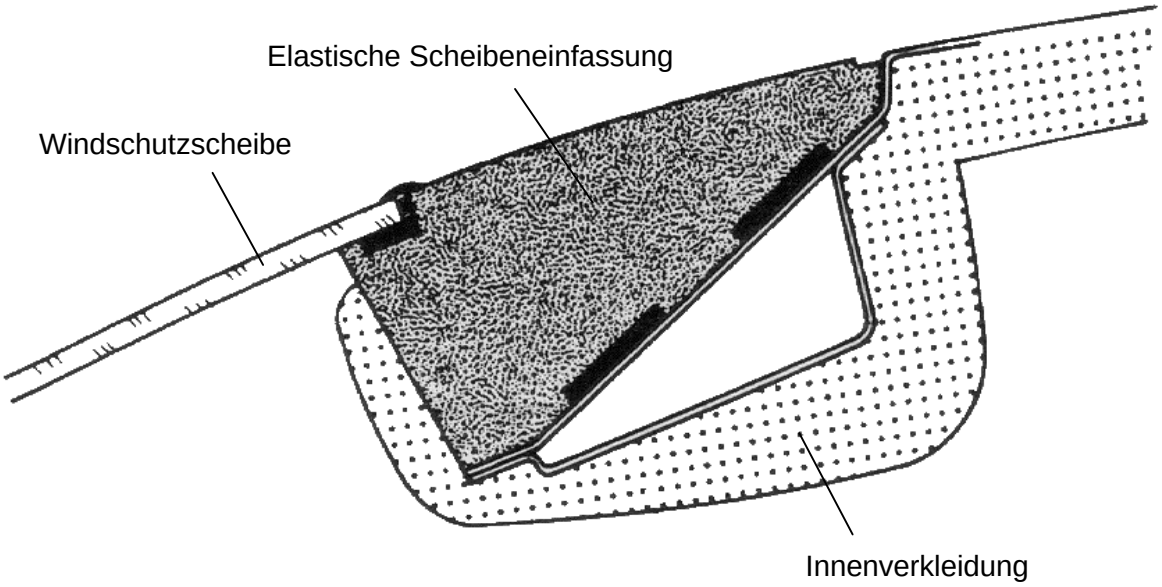


Abb. 4-28: Oberer Scheibenrahmen mit elastischer Einfassung (UNI-CAR)

Die A-Säule ist ein für den Insassenschutz unentbehrlicher Bestandteil der Fahrgastzelle. Sowohl bei Frontalkollisionen mit anderen Fahrzeugen als auch bei Überschlägen ist die A-Säule von überlebenswichtiger Bedeutung für den Fahrzeuginsassen. Im Hinblick auf den Fußgängerschutz ergibt sich damit ein Zielkonflikt. Abb. 4-29 zeigt einen Kompromiß zwischen Fußgänger- und Insassenschutz. Der dargestellte abgerundete Übergang von der Windschutzscheibe zur Seitenscheibe ist als günstig einzustufen.

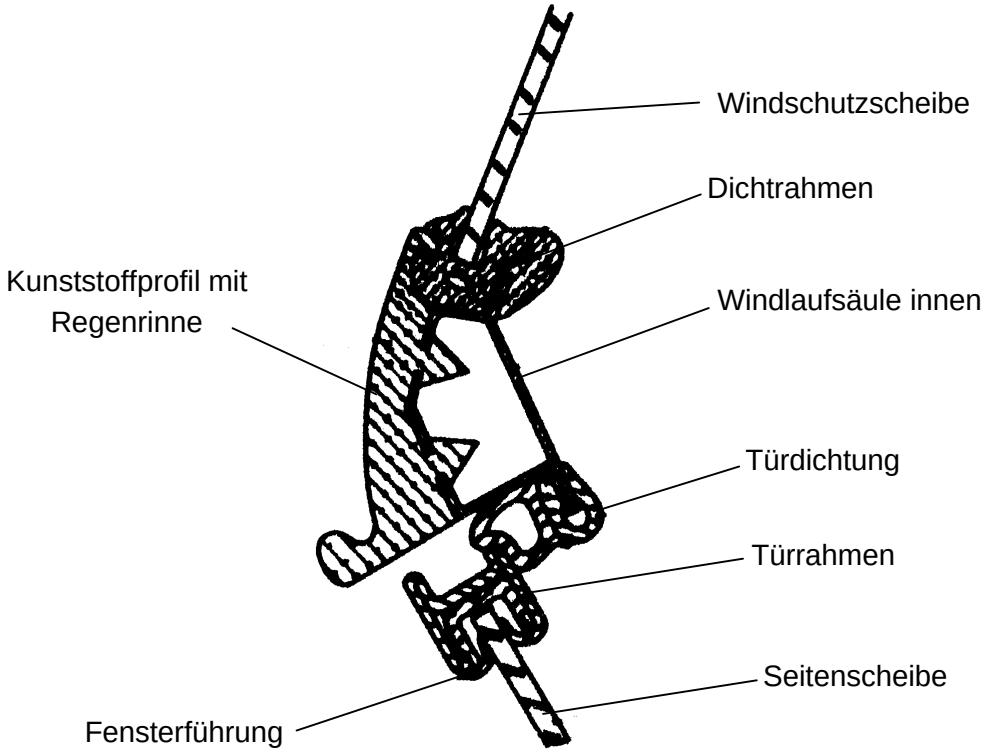


Abb. 4-29: Schnitt durch die Windlaufsäule mit elastischer Scheibeneinfassung [APP76b]

5 Bewertung der Maßnahmen am Volkswagen Golf

Zur Überprüfung der Konstruktionsmerkmale eines Serienfahrzeuges hinsichtlich des Fußgängerschutzes wurde im Rahmen dieser Studienarbeit ein VW Golf III vermessen und mit den in Kap. 4 formulierten Kriterien verglichen. Für einen EEVC-Test mit diesem Fahrzeug sind zu prüfende Stellen festgelegt worden.

Als Fahrzeug der unteren Mittelklasse und mit seinen kompakten Abmessungen von 4020 × 1695 × 1425 mm (Länge × Breite × Höhe) ist der VW Golf das meistverkaufte Fahrzeug in Europa. Gemäß der in Abb. 2-13 angegeben Formmerkmale wurden die in Abb. 5-2 angegebenen Werte gemessen. Dabei wurde eine Fahrzeughälfte an drei Stellen vermessen: der Fahrzeugmitte, dem Fahrzeugrand und in halbem Abstand zwischen Fahrzeugmitte und Fahrzeugrand (Abb. 5-1). In der gemessenen Ausführung (1,9 TD) befand sich die Radioantenne vor dem linken Außenspiegel.

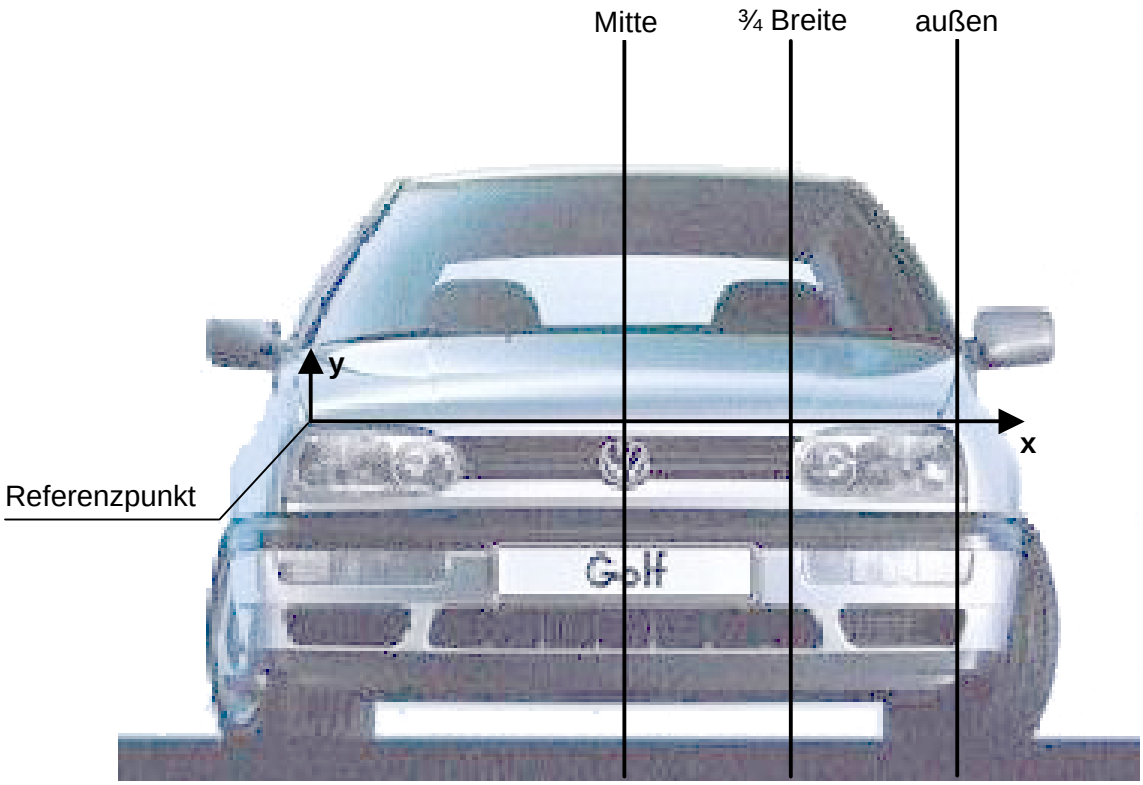
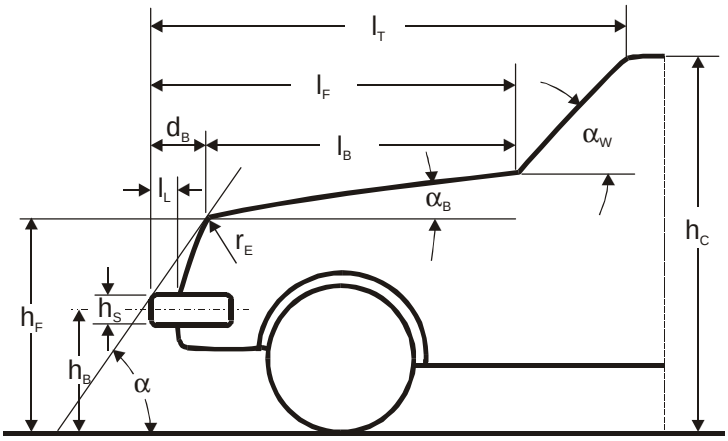


Abb. 5-1: Referenzlinien am VW Golf III



Parameter			Mitte	¾ Breite	außen
Rückversatzwinkel	α	°	67,5	65,5	60
Höhe Haubenvorderkante	h_F	mm	702	703	706
Rückversatz	d_B	mm	78	94	119 [1]
Neigung der Frontscheibe	α_W	°	33	—	—
Stoßfängertiefe	l_L	mm	60	66	71
Vorderwagenlänge	l_F	mm	1065	1087	1094
Haubenlänge	l_B	mm	1005	1021	1023
Stoßfängerhöhe	h_B	mm	425,5	422,5	425,5
Fahrzeughöhe	h_C	mm	1425		
Stoßfängerbreite	h_S	mm	143	141	145
Neigung der Haube	α_B	°	10	—	—
Vorderwagenlänge inkl. Windschutzscheibe	l_T	mm	1700	1700	— [2]
Breite der Haubenvorderkante		mm	1288		
Wrap-around distance (WAD)[3]		mm	1595,5	1623,8	1655,8

Abb. 5-2: Abmessung des VW Golf III

[1] gemäß EEVC-Prüfvorschrift

[2] Punkt liegt außerhalb der Windschutzscheibenbreite

[3] $WAD = \frac{l_B}{\cos a_B} + \frac{d_B}{\cos a} + h_B + \frac{1}{2} \cdot h_s$

Unter Berücksichtigung der Formparameter für den Stoßfänger aus Abb. 4-3, für die Haubenvorderkante aus Abb. 4-11 und für die Haube aus Abb. 4-14 kann nun die Form der Front des VW Golf III bewertet werden.

Positiv fällt der aerodynamisch gestaltete Bereich des Stoßfängers auf. Die nahezu rechtwinklige Stoßstange des VW Golf II wurde mit dem Modellwechsel 1991 durch eine abgerundete und demnach auch weniger formaggressive Stoßfängerkonstruktion ersetzt. Die Stoßfängerbreite h_s von mehr als 140 mm über die gesamte Fahrzeugbreite läßt eine gleichmäßige Krafteinleitung beim Kontakt mit dem Bein des Fußgängers erwarten. Mit rund 425 mm liegt die Kante des Stoßfängers nur 20 mm über dem gesetzlichen Minimalwert. In Hinblick auf den Fußgängerschutz, insbesondere in bezug auf Knieverletzungen, ist dieser Trend zu geringeren Stoßfängerhöhen zu begrüßen. Auch der Rückversatzwinkel α liegt innerhalb des in den Konstruktionskriterien geforderten Intervalls von 60° - 80°.

Die Haubenvorderkante liegt in einer Höhe h_F von 700 mm über der Fahrbahn und kommt damit dem Luftwiderstand und für den Fahrer der Übersichtlichkeit nach vorne zugute. Für ausreichenden Fußgängerschutz ist dies zu wenig. Das Abrollen des Körpers wird dadurch zwar begünstigt, aber die Verringerung kritischer Kopfverletzungen bedarf eines Maßes von mehr als 850 mm. Der Rückversatz d_B von 60 – 70 mm gleicht diesen Nachteil teilweise wieder aus.

Die Länge l_B der Haube ist, wie für ein Fahrzeug dieser Größe nicht überraschend, für effektiven Fußgängerschutz zu kurz. Die gemessenen 1000 mm reichen bei niedrigen Geschwindigkeiten knapp aus, um Kinder vor einem Kontakt mit der Windschutzscheibe zu schützen. Die Abwickellänge WAD liegt zwischen rund 1600 mm und 1650 mm, bei einem Verhältnis der Aufprallstelle zur Fußgängergröße von L/H = 1,15 (Abb. 2-10) ergibt sich, daß ab 1,40 m Körpergröße der Fußgänger mit dem Kopf auf der Windschutzscheibe aufprallt.

Die Frontscheibe ist mit α_W = 33° überraschend flach und liegt unter dem geforderten Winkel von 35°. Es stellt sich die Frage, ob eine geringfügig steilere Scheibe und die damit verlängerte Haube nicht günstiger einzustufen gewesen wären, zumal für den Insassenschutz steile Scheiben günstiger sind als flache Scheiben.

Die auf der Haube angebrachte Radioantenne ist für einen angefahrenen Fußgänger gefährlich. Eine Unterbringung in der Front- bzw. Heckscheibe oder die Anbringung auf dem Fahrzeugdach sind technisch unproblematisch und in neueren Modellen des VW Golf bereits realisiert. Das betrachtete Fahrzeug hat ansonsten einen weitgehend flachen und abgerundeten Vorderwagen, auch die Pfeilung kann als positiv bewertet werden.

Die Bewertung der Steifigkeit kann sich an dieser Stelle nur auf offensichtliche Merkmale beschränken, da eine Untersuchung von verwendeten Werkstoffen nicht möglich war bzw. Prüfergebnisse aus Crashversuchen zum Zeitpunkt der Dokumentation dieser Arbeit nicht vorlagen.

Abb. 5-3 zeigt die kritischen Stellen im Motorraum des VW Golf III. Nicht zu erkennen sind Versteifungen der Motorhaube, die an ansonsten freien Stellen des Motorraums die Nach-

giebigkeit beeinträchtigen. Das härteste Bauteil im Motorraum, der Motorblock, liegt beim betrachteten Fahrzeug in ausreichend großem Abstand zu Motorhaube.

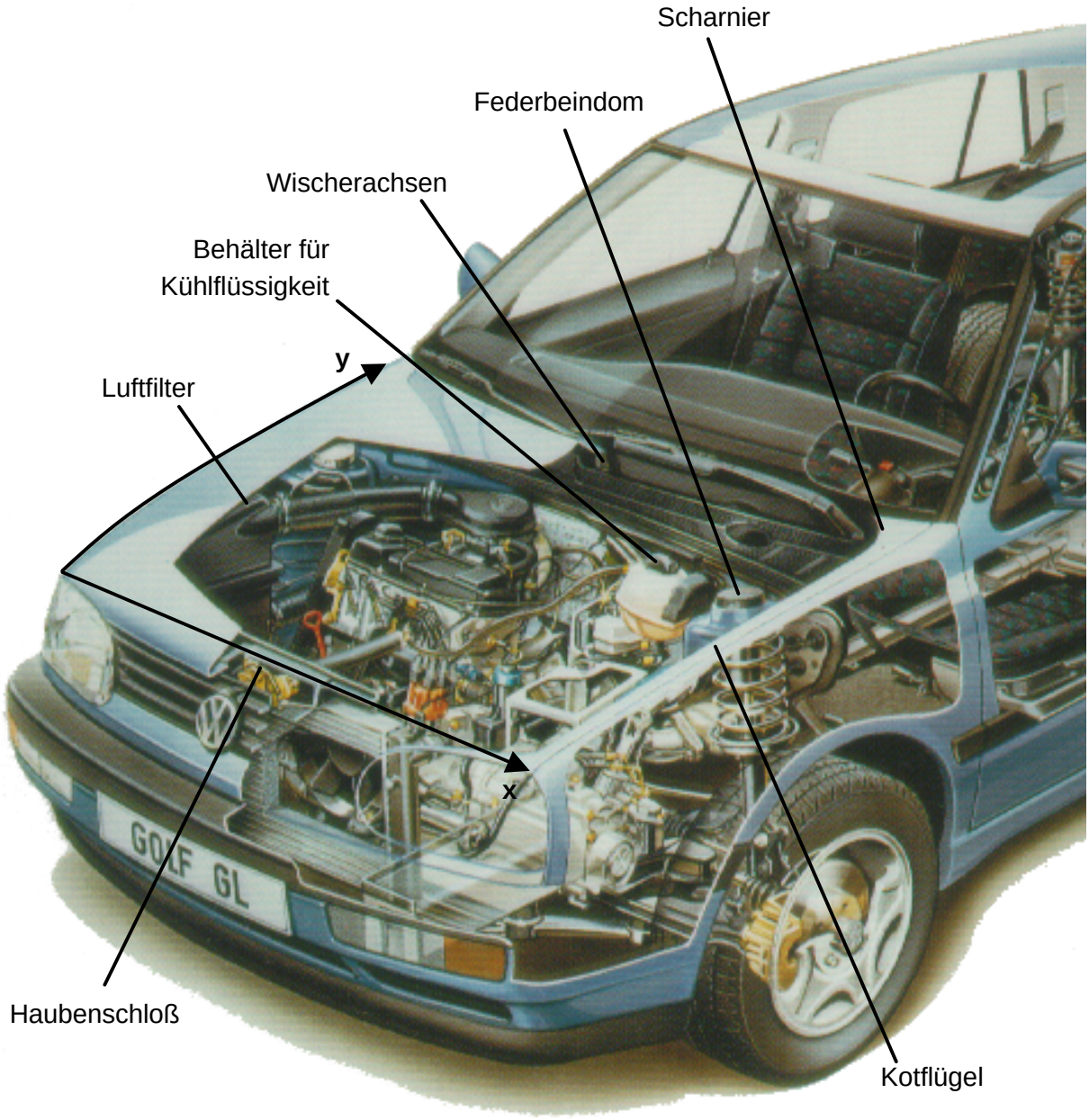


Abb. 5-3: Koordinatensystem und mögliche Prüfpositionen am VW Golf

In Abb. 5-3 erkennt man, wie hoch der Federbeindom in den Motorraum hineinragt. Auch Flüssigkeitsbehälter und der Luftfilter sind dicht unter der Haube montiert. Diese Stellen eignen sich besonders für einen durchzuführenden Test nach dem EEVC-Prüfverfahren.

Für die EEVC-Tests an diesem Fahrzeug wurden die nachfolgenden Stellen ausgewählt. Alle Daten sind in Millimetern angegeben. Die angegebenen Abstände sind in vertikaler Richtung gemessen worden. Prüfstellen mit großem Abstand zur Haube sind nicht genauer vermessen worden, wenn ihr Abstand a über 70 mm betrug.

	Nr.	Koordinaten	Abstand	Beschreibung
linkes Drittel	1	x = 1196 ; y = 640	a = 35	Federbeindom
	2	x = 1040 ; y = 630	a = 42	Behälter Kühlflüssigkeit
	3	x = 1288 ; y = 540		Kotflügel
mittlerer Bereich	1	x = 620 ; y = 515		Luftfilter
	2	x = 430 ; y = 343		Regelung Einspritzpumpe
	3	x = 717 ; y = 270		Verstrebung
rechtes Drittel	1	x = 85 ; y = 340	a = 43	Luftfilter
	2	x = 173 ; y = 445		Freie Fläche
	3	x = 158 ; y = 734		Wasserkasten

Abb. 5-4: Prüfstellen für den Kinderkopfimpactor

	Nr.	Beschreibung
linkes Drittel	1	Scharnier
	2	Scheibenwaschdüse
mittlerer Bereich	1	Wischerachse
rechtes Drittel	1	Auslauf der Haubensicke

Abb. 5-5: Prüfstellen für den Erwachsenenkopfimpactor

	Nr.	Koordinaten	Beschreibung
linkes Drittel	1	$x = x_{max}$	Kotflügel (möglichst weit außen)
mittlerer Bereich	1	x = 644	Haubenschloß
rechtes Drittel	1	x = 300	Verstärkung Frontend

Abb. 5-6: Prüfstellen für den Hüftimpactor

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit zeigen, daß es für effektiven Fußgängerschutz kein Patentrezept gibt. Fußgängerunfälle habe sehr unterschiedliche Randbedingungen und folglich auch sehr unterschiedliche Verläufe. Neben den durch das Fahrzeug gegebenen Einflüssen und der Infrastruktur am Unfallort spielen die Witterung und die Tageszeit eine ähnlich wichtige Rolle wie der physische und psychische Zustand von Fahrzeugführer und Fußgänger.

Unfallstatistiken weisen die Frontalkollision als die häufigste Unfallart aus. Es ist daher sinnvoll, Konstruktionen zu einer fußgängerfreundlichen Fahrzeugfront auf diese Unfallart abzustimmen. Im Rahmen des EEVC-Prüfverfahrens bietet sie ein ausreichendes Potential zur Bewertung eines Kraftfahrzeuges hinsichtlich des Fußgängerschutzes.

Ausgehend von der Form und der Nachgiebigkeit von Fahrzeugfronten können im Einklang mit der Aerodynamik und dem Insassenschutz Maßnahmen ergriffen werden, die die Aggressivität des Fahrzeugs bei einem Fußgängerunfall reduzieren. Die besonders zu betrachtenden Bereiche der Fahrzeugfronten ergeben sich aus der Unfallkinematik und den beobachteten Verletzungsmustern.

Der Stoßfänger ist nicht nur für die Verletzungen von Beinen und Knien verantwortlich, sondern beeinflußt maßgeblich die Bewegungsabläufe beim Fußgängerunfall. Daraus folgt die Forderung nach einer auf den Fußgänger angepaßten Stoßfängergeometrie und einer mittels entsprechender Werkstoffe verbesserten Nachgiebigkeit.

Im Zusammenspiel mit dem Stoßfänger kann die Haubenvorderkante zukünftig zu einem „soft face“ weiterentwickelt werden, das die Forderungen nach einer glatten Kontaktfläche und ausreichender Nachgiebigkeit kostengünstig und effektiv erfüllen kann. Die derzeitigen Tendenzen zu integrierten Frontends zeigen hierbei den Weg zukünftiger Fahrzeugentwicklungen.

Die Fronthauben von Fahrzeugen sind in vielen Fällen das Bauteil, auf welchem der Kopf des angefahrenen Fußgängers aufprallt. Dies gilt insbesondere für größere Fahrzeuge. Neben der Forderung nach einer glatten Oberseite ohne Ecken und Kanten ist der Bereich unter der Haube zu betrachten. Ein Mindestabstand von 60 – 80 mm zwischen harten Bauteilen des Motorraums und der Haubenunterseite dient der Verringerung der Kopfbelastung des Fußgängers. Konkret ist dabei mit der verstärkten Verwendung von Sandwich-Strukturen zu rechnen, doch auch aktive Systeme zur Anhebung der Haube während eines Unfalls sind vielversprechende Entwicklungsgebiete.

An Windschutzscheiben haben sich in den letzten Jahren aerodynamische Optimierungen sehr deutlich gezeigt. Die flachere Neigung der Scheiben hat positive Auswirkungen auf die Kopfverletzungen beim Aufprall im Scheibenbereich. Die dadurch vergrößerte Fläche der Scheibe erfordert einer angepaßten Befestigung im Scheibenrahmen, die einen Aufprall auf der Scheibe dämpfen soll, ohne die Steifigkeit der Fahrgastzelle zu beeinträchtigen und das

Blickfeld des Fahrers zu verkleinern. Hier wird sich in Zukunft verstärkt die Frage nach passenden Werkstoffen stellen.

Vorliegende Bewertungskennzahlen von Verletzungen, HIC und AIS, haben ihren Ursprung in der Beurteilung von Insassenverletzungen und sind bisher nicht an die besonderen Bedingungen des Fußgängerunfalls angepaßt worden. Gerade beim AIS ist eine verstärkte Einbeziehung der Genesungsdauer bei erlittenen Verletzungen wünschenswert, um bessere Aussagen über die Wirkung von Maßnahmen zur Senkung des AIS treffen zu können. Dies gilt insbesondere für Betrachtungen unter volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten.

Viele Aspekte des Fußgängerschutzes werden auch in Zukunft in der Verantwortung des Autofahrers bleiben. Dazu gehört der wichtigste aller Grundsätze im Straßenverkehr: die Rücksichtnahme gegenüber dem schwächeren Verkehrsteilnehmer.

7 Literatur

[APP76b] APPEL, H.
Sicherheitsfahrzeug für Fußgänger und Insassen – ein Widerspruch ?
VDI-Tagung Nr. 11, Berlin 1976

[BAR51] BARÉNYI, B.
Patentschrift Nr. 854 157 zur Sicherheitsfahrgastzelle, 23. Januar 1951
Geschichte des DaimlerChrysler-Konzerns
http://www.daimlerchrysler.de

[EUR96] EUROPEAN COMMISSION
Proposal for a European Parliament and Council Directive relating to the protection of pedestrians and other road users in the event of a collision with a motor vehicle
III/5021/96/EN, Brüssel 1996

[GRÖ89b] GRÖSCH, L.; HEISS, W.
Bumper configuration for conflicting requirements: Existing performance versus pedestrian protection
Proceedings of the 12th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, S. 1266 – 1272, Göteborg 1989

[HAR85b] HARRIS, J.; GREW, N. D.
The influence of car design on pedestrian protection
Proceedings of the 10th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles (SAE-856116), Oxford 1985

[HOB85] HOBBS, C. A. et al.
PSC 1 – a demonstration car with improvements for pedestrian protection
Proceedings of the 10th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles (SAE-856116), Oxford 1985

[HOE84] HOEFS, R.
Über die Beurteilung von Maßnahmen an Kraftfahrzeugen zum Schutz von Fußgängern bei Verkehrsunfällen
FAT Schriftenreihe Nr. 42, Fußgängersicherheit (1984)

[IHS98] N. N.
Insurance Institute for Highway Safety
1997 Fatality Facts: Pedestrians
http://www.hwysafety.org

[KAE82] KAESER, R.; DEVAUD, J. M.
Entwicklung von fußgängerkollisionskompatiblen Fahrzeugfronten mit energieabsorbierenden Kraft-Deformationscharakteristiken
Entwicklungslinien für Kfz und Kraftstoffe, Forschungsbilanz 1982, S. 246 – 253
Verlag TÜV Rheinland GmbH (1982)

[KÜH80] KÜHNEL, A.
Der Fahrzeug-Fußgänger-Unfall und seine Rekonstruktion
Dissertation TU Berlin, Berlin 1980

[LEM94] LEMMON, D. R.; HUSTON, R. L.
Automobile hood/fender design optimization for improved pedestrian head impact protection
Proceedings of the 20th Design Automation Conference, S. 569 – 577, Minneapolis 1994

[N.N.82] N. N.
Pedestrian injury accidents – Report by WG 7 of the European Experimental Vehicle Committee
Proceedings of the 9th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Kyoto 1982

[OTT95] OTTE, D.
Anforderung an die Gestaltung und Konstruktion der Windschutzscheibe zur Verletzungsreduzierung von Pkw-Insassen, Fußgängern und Radfahrern
Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Heft 6, S. 160 – 166 (1995)

[STA98] N. N.
Verkehrsunfälle 1997
Statistisches Bundesamt, Gruppe Verkehr, Fachserie 8, Reihe 7
Wiesbaden (1998)

[THO92] THOMSEN, D.
Entwicklung einer Motorhaube mit verbessertem Schutz für äußere Verkehrsteilnehmer
Diplomarbeit FH Hamburg, Hamburg 1992

[WAL96] WALLENTOWITZ, H.
Aufbau von Kraftfahrzeugen
Vorlesungsumdruck „Kraftfahrzeuge III – Aufbau von Kraftfahrzeugen“
RWTH Aachen (1996)

[ZEL95] ZELLMER, H.
Testverfahren zur Fußgängersicherheit
Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 1995