

Joachim Blödorn

Bauweisen und Werkstoffe im Automobilbau

unter besonderer Berücksichtigung
der Anforderungen an Sicherheit,
Ökonomie und Umweltbelastung

Eine Veröffentlichung der

SNV 

SNV Studiengesellschaft Nahverkehr mbH
Berlin · Hamburg · Nordrhein-Westfalen

im

Verlag Dr. Rüdiger Martienss



Joachim Blödorn

Bauweisen und Werkstoffe im Automobilbau

unter besonderer Berücksichtigung
der Anforderungen an Sicherheit,
Ökonomie und Umweltbelastung

Eine Veröffentlichung der



SNV Studiengesellschaft Nahverkehr mbH
Berlin · Hamburg · Nordrhein-Westfalen

im

Verlag Dr. Rüdiger Martienss



D 83



Schwarzenbek 1986
ISBN 3-921757-24-X

Copyright by

VERLAG DR. RÜDIGER MARTIENSS
LIBELLENWEG 10, 2053 SCHWARZENBEK, TEL. 04151/4577

BAUWEISEN UND WERKSTOFFE IM AUTOMOBILBAU

UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG DER ANFORDERUNGEN AN SICHERHEIT, ÖKONOMIE UND UMWELTBELASTUNG

KURZFASSUNG

Die vorliegende Arbeit soll eine Übersicht über den derzeitigen Stand der Entwicklungen bei den Werkstoffen im Automobilbau geben. Es wird diskutiert, wo bei Bauweisen und Werkstoffen Probleme liegen, wo Fortschritte zu erwarten sind und welche Vor- und Nachteile für die zukünftigen Entwicklungen über einen Zeitraum von 10 bis 15 Jahren maßgebend sein dürften. Es ist angestrebt worden, Trends nicht durch Fortschreibung bisheriger Entwicklungen oder mit sonstigen statistischen Methoden, sondern durch Gegenüberstellung der derzeit sichtbaren Vor- und Nachteile abzuschätzen und dies am Beispiel zu erläutern. Nicht oder nur am Rande angesprochen werden Themen wie Technologiefolgenabschätzung, Innovationsmechanismen, Prognoseverfahren, Arbeitsmarkt, Fertigungstechnik oder Werkstofftechnik im Detail, Design, Marketing usw. zugunsten der anwendungstechnischen Fragen der Werkstoffe, sofern nicht konkrete Wechselwirkungen abzusehen sind, die deren Einsatz ausdrücklich fördern oder behindern.

Aufbauend auf einem kurzen Rückblick wird zunächst der derzeitige Stand der Technik beschrieben, diskutiert und ein Ausblick mittels der zuvor gewonnenen Erkenntnisse gegeben, bei dem auch übergeordnete Gebiete wie Fragen der Umweltbelastung oder der Ressourcen angesprochen werden. Die Einschätzungen werden ergänzt durch die Beschreibung eigener Erfahrungen bei der Arbeit am Forschungs-PKW "UNI-CAR" und die Auswertung der Erkenntnisse aus Experten- und Firmenbefragungen sowie der Literatur. Als anschauliches Ergebnis wird ein exemplarisches Lastenheft eines Fahrzeugs mit den Mitteln der mittelfristig zu erwartenden Technologie gezeigt.

Die Diskussion der verschiedenen Werkstoffe zeigt, daß bis auf weiteres Stahl für die steifigkeitskritisch auszuliegenden Komponenten des Pkws wie z. B. die tragenden Karosseriestrukturen bevorzugt werden wird. Festigkeitskritische Bauteile könnten durch Leichtmetalle oder Faserverbundwerkstoffe substituiert werden. Alle Fahrzeugteile, die eher formgebendes Element sind, als Verkleidung, Gehäuse oder Deckel dienen sowie Polster oder andere elastische Bauteile, lassen sich am vorteilhaftesten aus Kunststoffen herstellen. Der Personenwagen der mittleren Zukunft wird daher eine tragende Struktur aus teilweise hochfestem, teilweise verzinktem Stahl haben, an die Kunststoffteile angebaut werden.

Der Durchbruch eines alternativen Materials ist nicht zu erwarten, eher ausgereifere Mischbauweisen der Karosserie und eine vorsichtige Weiterentwicklung hin zu deutlich materialgerechteren Konstruktionen auf konventioneller Basis.



INHALT

	Seite
EINLEITUNG	11
1 RÜCKBLICK	
1.1 Die ESV-, RSV- und IVS-Projekte	14
1.2 Das Forschungsprojekt "Auto 2000"	18
2 BAUWEISEN UND WERKSTOFFE VON FORSCHUNGS-AUTOS, DARGESTELLT ANHAND EINIGER AUSGEWÄHLTER BEISPIELE	
2.1 Die Forschungs-Pkws des Projekts "Auto 2000"	20
2.2 Weitere Forschungsfahrzeuge	28
2.3 Anmerkungen zur Werkstoffwahl bei Forschungsautos	36
3 BAUWEISEN UND WERKSTOFFE VON HEUTIGEN FAHRZEUGKOMPONENTEN, STAND DER TECHNIK UND AKTUELLE TRENDS	
3.1 Die gebräuchlichsten Werkstoffe	
3.1.1 Kunststoff	38
3.1.2 Stahl und Eisen	46
3.1.2.1 Bleche	48
3.1.2.2 Gußwerkstoffe	51
3.1.3 Aluminium	53
3.1.4 Keramik, Glas	55
3.2 Materialanwendung nach Pkw-Baugruppen	
3.2.1 Tragende Strukturen	57
3.2.2 Karosserie	
3.2.2.1 Außenhaut	66
3.2.2.2 Scheiben, Leuchten	77
3.2.3 Mechanische Komponenten, Fahrwerk	86
3.2.4 Motor, Getriebe, Kraftübertragung, Kühlung	91
3.2.5 Innenausstattung	100
3.2.6 Ausstattung, Zubehör, Glas, Diverses	103
3.3 Materialanteile bei heutigen Pkw	105
3.4 Fertigung	
3.4.1 Verarbeitung, Übersicht	110
3.4.2 Spezielle Aspekte	
3.4.2.1 Kleben	114
3.4.2.2 Punkt-Schweiß-Kleben	118
3.4.2.3 Lackierung	120
3.4.2.4 Faserverstärkung	124

4	ANFORDERUNGEN AN WERKSTOFFE UND VERFAHREN FÜR DEN AUTCMOBILBAU - DISKUSSION UND AUSBLICK UNTER VERSCHIEDENEN GESICHTSPUNKTEN	
4.1	Anwendungsbereiche der Werkstoffe	
4.1.1	Materialkennndaten, Verwendbarkeit	136
4.1.2	Gebrauchsqualitäten, Einsatzargumente	140
4.2	Dimensionierung, Gewicht	143
4.3	Kosten	
4.3.1	Material, Fertigung	151
4.3.2	Gewicht, Betrieb	158
4.4	Sicherheit	
4.4.1	Trends der Gesetzgebung	160
4.4.2	Sicherheitselemente	164
4.5	Verfügbarkeit	169
4.6	Wiederverwertbarkeit	
4.6.1	Pecycling	171
4.6.2	Precycling	177
4.7	Energieaufwand	
4.7.1	Energiebilanz	178
4.7.2	Energiebedarf der Werkstoffe	181
4.8	Umweltbelastung	186
5	AUTCMATISIERUNG UND ARBEITSPLATZSITUATION	
5.1	Industrieroboter	190
5.2	Arbeitsplatzsituation	195
5.3	Physiologie	198
6	TRENDS	
6.1	Problematik von Trendabschätzungen	
6.1.1	Bedeutung von Neuerungen an Serienwagen	200
6.1.2	Plausibilität der Publikationen	202
6.2	Abschätzung zukünftiger Entwicklungen	
6.2.1	Umfeld, allgemeine Entwicklungen	205
6.2.2	Werkstoffanteile	208
6.2.3	Bauweisen	214
6.2.4	Rohstoff- und Materialkosten	219
6.2.5	Energiekosten	221
6.3	Folgewirkungen	222
6.4	Ergebnisse vorhandener Studien und Prognosen	223

	Seite	
7	EXEMPLARISCHES KONZEPT FÜR BAUWEISEN UND WERKSTOFFE EINES ZUKÜNFTIGEN PERSONENWAGENS	
7.00	Fahrzeugauslegung allgemein	229
7.10	Fahrzeugantrieb	230
7.20	Kraftübertragung	230
7.30	Fahrwerk	230
7.40	Fahrzeugaufbau	230
7.50	Innenraum	230
7.60	Elektrik, Elektronik	231
7.70	Zubehör, Zier-, Befestigungsteile	231
7.90	Lackierung	231
7.##	Übersicht über ein exemplarisches Lastenheft	233
8	ZUSAMMENFASSUNG	238
	LITERATUR	242
A	ANHANG	285
A 1	ENTWICKLUNG VON KAROSSERIETEILEN AUS KUNSTSTOFF AM BEISPIEL DES FORSCHUNGS-PKW UNI-CAR	
A 1.1	Gestaltung und Fertigung	
A 1.1.1	Formgebung	286
A 1.1.2	Werkstoffauswahl	291
A 1.1.3	Konstruktive Ausführung	296
A 1.1.4	Probleme und Erfahrungen mit am UNI-CAR verwendeten Werkstoffen	321
A 1.2	Dimensionierung und Erprobung von Sicherheitselementen am Beispiel des UNI-CAR	325
A 1.3	Technologische Probleme	
A 1.3.1	Einflußfaktoren auf Deformationskennungen	341
A 1.3.2	Energieaufnahme	348
A 1.3.3	Meßtechnische Probleme	354
A 2	BILDVERZEICHNIS (mit Seitenangaben)	362
A 3	TABELLEN UND ABBILDUNGEN	
A 3.1	Forschungsautos im Detail: UNI-CAR, Audi Auto 2000, Daimler Benz Auto 2000, Volkswagen Auto 2000 FIAT VSS, Peugeot Vera, Pininfarina/ Audi Quartz, Minicars RSV	371 374
A 3.2	Calspan RSV, Audi Quattro Rallye, VW Passat Serie 1982, Porsche 995	377
A 3.2	Abbildungen zu den Kapiteln 3 - 6	380
A 4	ZUSAMMENSTELLUNG EINER AUSWAHL VON ERGEBNISSEN DER LITERATURANALYSE	389

VORBEMERKUNGEN

Zahlen in eckigen Klammern im Text bezeichnen in der Regel weitgehend übernommene Aussagen, Formulierungen bzw. Zitate aus den im Literaturverzeichnis unter dieser Nummer aufgeführten Quellen. Bei Literaturangaben in Fußnoten wurden in dem betreffenden Absatz lediglich Informationen aus diesen Quellen verwendet und/oder die Aussagen modifiziert bzw. relativiert. Die Literaturangaben sind nach der Reihenfolge des erstmaligen Erscheinens im Text geordnet.

Die Literaturangabe [1] bezieht sich weitgehend auf eine Umfrage 1982/83 unter den angegebenen Firmen mit der Bitte nach deren Einschätzung zukünftiger Entwicklungen. Da es sich bei den Antworten teilweise um die persönliche Meinung von Firmenmitarbeitern oder - z. B. wegen eventuell möglicher Rückschlüsse auf die Firmenstrategie - bewußt nur um mündlich gegebene Informationen handelt, soll auf eine Namensnennung jeweils verzichtet und auf die Auswertung der Umfrage im allgemeinen verwiesen werden. Unter [1] ist auch von befragten Personen erhaltenes diverses Material eingeordnet worden, daß z. B. aus nicht genannten Veröffentlichungen oder sonstigen Quellen stammt.

Auch bei der Quelle [2] soll auf Einzelangaben verzichtet werden, da die für das Projekt "Auto 2000" erstellten Berichte überwiegend nicht bzw. nur auszugsweise veröffentlicht oder nur in geringer Zahl für die beteiligten Mitarbeiter vervielfältigt worden sind.

Bilder und kurze Tabellen sind zugunsten der besseren Lesbarkeit nach Möglichkeit in den Textteil integriert worden. Eine Reihe von Tabellen und Diagrammen, deren Aussagen im Text verbal erläutert werden, die einen größeren Umfang haben bzw. vorhandene Bilder ergänzen, befindet sich im Anhang; ebenso auch einige weitere Darstellungen, die exemplarisch aus den Unterlagen der Literaturanalyse ausgewählt wurden.

ABKÜRZUNGEN UND STOFFBEZEICHNUNGEN

~-GM	:	... glasmattenverstärkt
~f (~ff)	:	... und die nächste (und die folgenden)
Al	:	Aluminium
BMC	:	Bulk Moulding Compound
BMFT	:	Bundesministerium für Forschung und Technologie
C	:	Kohlenstoff
CAD (CAM)	:	Computer Aided Design (... Manufacturing)
Cl	:	Chlor
D-D (DD)	:	Desmophen-Desmodur (-Lack)
E	:	Elastizitätsmodul
EA~~	:	energieabsorbierender(s)
EPDM	:	Äthylen-Propylen-Terpolymer
ESG	:	Einscheibensicherheitsglas
ESV	:	Experimental Safety Vehicle
F&E	:	Forschung und Entwicklung
FMVSS	:	Federal Motor Vehicle Safety Standard (USA)
FVV	:	Faserverbundwerkstoff
Fe	:	Eisen
GF~~	:	Glasfaserverstärktes(r) ...
GMT	:	Glasmattenverstärktes Thermoplast
H	:	Wasserstoff
HIC	:	Head Injury Criterion
HSLA	:	High Strength Low Alloy
Hz	:	Hertz
IMC	:	In-Mould Coating
IVS	:	Integrated Vehicle Systems
LCD	:	Liquid Crystal Display
LGK	:	Leichtbaugrenzkosten
M.I.T.	:	Massachusetts Institute of Technology
Mg	:	Magnesium
N	:	Newton; Stickstoff
NO _x	:	Stickoxyde
Ni	:	Nickel
O	:	Sauerstoff

PAH	:	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PBT	:	alt für PBTP
RG	:	Raumgewicht
RIM	:	Reaction Injection Moulding
RRIM	:	Reinforced Reaction Injection Moulding
RSV	:	Research Safety Vehicle
S	:	Steifigkeit
SI	:	Severity Index
SMC	:	Sheet Moulding Compound
Si	:	Silizium
StVZO	:	Straßenverkehrszulassungsordnung
T	:	Thermoplast
TPO	:	Thermoplastic Olefin
Ti	:	Titan
UD	:	unidirektional
VSG	:	Verbundsicherheitsglas
ZMC	:	Sonderform des BMC (mit längeren Fasern)
°C	:	Grad Celsius
a	:	Beschleunigung; Jahr
c _w	:	Luftwiderstandsbeiwert
ca.	:	circa
d. h.	:	das heißt
dm	:	Dezimeter
g	:	Erdbeschleunigung; Gramm
h	:	Höhe; Stunde
lb(s)	:	Pound(s); 1 lb = 453,6 g
m	:	Masse; Meter; (Milli~)
max.	:	maximal
min	:	Minute
min.	:	minimal
mod.	:	modifiziert
mph	:	Meilen pro Stunde
s	:	Weg; Sekunde
t	:	Wanddicke; Zeit
u. U.	:	unter Umständen
u. a.	:	unter anderem(n)
v	:	Geschwindigkeit
Z. B.	:	ZUM Beispiel
z. T.	:	zum Teil

Kurzzeichen für Kunststoffe nach DIN 7728¹

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol (-Polymer)
CAB	Celluloseacetobutyrat
CN	Cellulosenitrat
EP	Epoxid (-Harz)
HDPE	Polyäthylen ² hoher Dichte (Hart-PE)
LDPE	Polyäthylen niederer Dichte (Weich-PE)
PA	Polyamid
PA 6	Polymeres aus ϵ -Caprolactam
PA 66	Polykondensat aus Hexamethyldiamin und Apidinsäure
PBTP	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonat
PE	Polyäthylen
PETP	Polyäthylenterephthalat
PF	Phenol-Formaldehyd (-Harz)
PJ	Polyimid
PMMA	Polymethylmethacrylat
POM	Polyoxymethylen, Polyformaldehyd, Polyacetal
PP	Polypropylen
PPO	Polyphenylenoxid
PS	Polystyrol
PTFE	Polytetrafluoräthylen ²
PUR	Polyurethan
PVB	Polyvinylbutyral
PVC	Polyvinylchlorid
SAN	Styrol-Acrylnitril (-Polymer)
SB	Polystyrol mit Elastomer auf Basis Butadien modifiziert
SI	Silicon
SP	Gesättigter Polyester
UF	Harnstoff-Formaldehyd (-Harz)
UP	Ungesättigter Polyester

¹ Auszug aus DIN 7728 Teil 1, 4.78. Siehe auch Fußnote 1 auf der nächsten Seite.

² Alte Form. Siehe Fußnote 2 auf der nächsten Seite.

Kurzzeichen für verstärkte Kunststoffe nach DIN 7728¹

FK	Faserverstärkter Kunststoff
WK	Whiskerverstärkter Kunststoff
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
AFK	Asbestfaserverstärkter Kunststoff
BFK	Borfaserverstärkter Kunststoff
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
MFK	Metallfaserverstärkter Kunststoff
SFK	Synthesefaserverstärkter Kunststoff

Beispiele:

Cu-MFK	Kupferfaserverstärkter Kunststoff
PA6-SFK	Polyamidfaserverstärkter Kunststoff
PF-PA6-SF	Polyamid 6-Faserverstärktes Phenolharz
UP-GF	Glasfaserverstärkter ungesättigter Polyester
PC-GF30	Polycarbonat mit 30 % Glasfaserverstärkung

¹ Auszug aus DIN 7728 Teil 2, 3.80. Wiedergegeben mit Genehmigung des DIN Deutschen Instituts für Normung e. V. Maßgebend für das Anwenden der Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 4-10, 1000 Berlin 30, erhältlich ist.

² (Zu Seite 9) Die heute übliche Schreibweise lautet "...ethylen". Es ist derzeit eine Neufassung der Norm in Arbeit, bei der auch in allen ähnlichen Stoffbezeichnungen jeweils das ä durch ein e ersetzt wird.

BAUWEISEN UND WERKSTOFFE IM AUTOMOBILBAU

**UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG
DER ANFORDERUNGEN AN SICHERHEIT,
ÖKONOMIE UND UMWELTBELASTUNG**

EINLEITUNG

Die vorliegende Arbeit soll eine Übersicht über den derzeitigen Stand der Entwicklungen bei den Werkstoffen im Automobilbau geben sowie Trends für die mittlere Zukunft, d. h. einen Zeitraum von 10 bis 15 Jahren, aufzeigen. Es wird diskutiert, wo bei Bauweisen und Werkstoffen mit vorzüglich besten Zukunftsaussichten die Probleme liegen, die dem Durchbruch bislang entgegenstehen, oder wo am ehesten Fortschritte zu erwarten sind. Damit soll ein Ausblick der mittelfristig als wahrscheinlich zu erwartenden Technologie gegeben werden, um Hilfestellung bei Entscheidungen über die Verwendung bestimmter Bauweisen oder Werkstoffe zu leisten. Es werden die Vor- und Nachteile solcher Alternativen erläutert, die für die zukünftigen Entwicklungen maßgebend sein dürften und aufgrund derer bestimmte Pfade bessere Zukunftsaussichten haben als andere.

Die Beschränkung auf die mittlere Zukunft erfolgt, da man für die weitere Zukunft auf Spekulationen angewiesen wäre. Nicht erwartet werden können daher längerfristige Zukunftsprognosen und sonstige Voraussagen über Entwicklungen oder technologische Durchbrüche, die nicht schon heute konkret abzusehen sind.

Aufbauend auf einem kurzen Rückblick wird zunächst der derzeitige Stand der Technik beschrieben, diskutiert und ein Ausblick mittels der zuvor gewonnenen Erkenntnisse gegeben, bei dem auch übergeordnete Gebiete wie Fragen der Umweltbelastung oder der Ressourcen angesprochen werden. Die Einschätzungen werden ergänzt durch eigene Erfahrungen bei der Arbeit am Forschungs-Pkw "UNI-CAR" und die Auswertung der Erkenntnisse aus Experten- und Firmenbefragungen sowie der Literatur. Als anschauliches Ergebnis wird ein exemplarisches, fiktives Lastenheft eines Fahrzeugs mit den Mitteln der mittelfristig zu erwartenden Technologie gezeigt. Einige spezielle Erfahrungen mit dem UNI-CAR werden im Anhang ausführlicher beschrieben.

Der Nutzen der Arbeit kann gesehen werden im Aufzeigen der mit neuen Werkstoffen verbundenen Problematiken, in einem Überblick, einem Ausblick und einer Entscheidungshilfe für Arbeiten auf diesem Gebiet, so z. B. für das Konstruieren neuer Bauteile aus verschiedenen Werkstoffen. Als Leser wird derjenige angesprochen, der sich einen Überblick darüber verschaffen möchte, wohin die Entwicklung gehen könnte und welche Probleme mit alternativen Werkstoffen auftauchen, die aufgrund der häufig interessengeprägten Veröffentlichungen nur als Randerscheinungen behandelt werden. Die häufig von den praxisrelevanten Problemen abgehobenen theoretischen, übergeordneten Erwägungen sollen relativiert und auf die anwendungstechnischen Fragen bezogen werden. Nicht oder nur am Rande angesprochen werden sollen Themen wie Technologiefolgenabschätzung, Innovationsmechanismen, Prognoseverfahren, Arbeitsmarkt, Fertigungstechnik oder Werkstofftechnik im Detail, Design, Marketing usw. zugunsten der Diskussion anwendungstechnischer Fragen der Werkstoffe. Auf derartige Aspekte wird nur tiefer eingegangen, sofern konkrete Wechselwirkungen abzusehen sind, die deren Einsatz ausdrücklich fördern oder behindern.

Die Arbeit entstand im Anschluß an eine Studie der Technischen Universität Berlin, die in Kooperation mit dem Massachusetts Institute of Technology zur Zukunft des Automobils durchgeführt wurde (siehe z. B. [3], [4], [5]). Sie basiert auf den Erfahrungen bei der Bearbeitung des vom Bundesminister für Forschung und Technologie geförderten Projekts "Auto 2000" (siehe z. B. [2], [6], [7]), auf der in verschiedenen Datenbanken gefundenen Literatur, auf Informationen aus der Industrie (siehe [1]), nicht zuletzt auf eigenen Konstruktions-, Fertigungs- und Erprobungserfahrungen mit dem Forschungs-Pkw "UNI-CAR" (siehe z. B. [8], [9], [10], [11]).

Aspekte aus dem Themenkreis "Forschungsautos" nehmen in dieser Arbeit demzufolge auch entsprechend viel Raum ein. In Kapitel 1 hat daher der Rückblick den Schwerpunkt bei den wichtigsten Projekten dieser Art. Als Ergänzung werden im Anhang A 1 exemplarisch für das "UNI-CAR" die Entwicklung von Karosserieteilen aus Kunststoff, die Werkstoffwahl und damit zusammenhängende Probleme ausführlicher erläutert.

Ein Anstoß für die Arbeit war auch die Problematik der Wertung von Gegenüberstellungen der Werkstoffe und Bauweisen nach verschiedenen Kriterien und mit differenzierten und kritisch gewogenen Argumenten, wie sie in der Literatur vorliegen. Sie ist der Versuch, Trends nicht durch Fortschreibung bisheriger Entwicklungen oder mit sonstigen statistischen Methoden, sondern durch Gegenüberstellung der derzeit sichtbaren Vor- und Nachteile abzuschätzen und am Beispiel zu erläutern.

1 RÜCKBLICK

1.1 DIE ESV-, RSV- UND IVS-PROJEKTE

Wer sich für die Fragen der Bauweisen und Werkstoffe zukünftiger Automobile interessiert, wird nicht zuletzt an die zahlreichen Experimentier- und Forschungswagen denken, mit denen die Firmen bei passenden Gelegenheiten neben auffälligem Design meist auch ihre Vorstellungen der kommenden Technologien präsentieren. Auch in dieser Arbeit soll damit begonnen werden, zunächst einige aktuelle Vertreter dieser Art zu untersuchen, um Hinweise auf die Gestaltung und die Werkstoffe des Pkws im nächsten Jahrzehnt zu erhalten. Zuvor soll jedoch ein kurzer Rückblick die Geschichte der wichtigsten Projekte zur Entwicklung und Vorstellung modernster Technik in ausgeführten Fahrzeugmodellen rekapitulieren. Ausgangspunkt sind dabei die ursprünglich in den USA staatlich initiierten Sicherheitsprogramme, deren Zielrichtungen sich im Laufe der Zeit deutlich in Richtung Umweltfreundlichkeit und Ressourcenschonung geändert haben und damit auch die Wandlung des öffentlichen Interesses widerspiegeln.

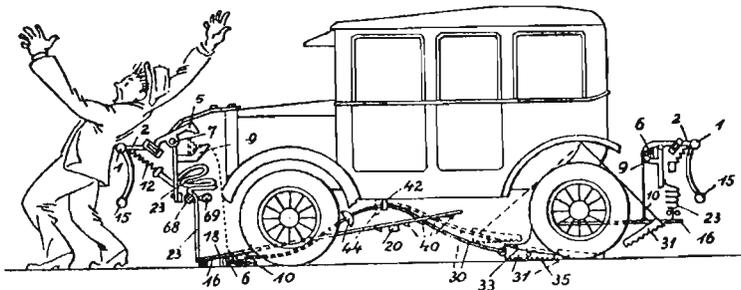


Bild 1: Fußgängerauffangvorrichtung, gefunden in einer Patentschrift von 1932 [12].

Bemühungen, durch konstruktive Maßnahmen die Gefährdung von Menschen innerhalb und außerhalb des Personenkraftwagens zu verringern, sind fast ebenso alt wie das Auto selbst. Auch heute fast selbstverständliche Dinge wie Knautschzonen, steife Fahrgastzellen, Sicherheitsgurte oder nachgiebige Lenksäulen haben lange bis zu ihrer Serieneinführung gebraucht, bis Probleme in der Technik und nicht zuletzt der Akzeptanz des Mehraufwandes überwunden werden konnten (wobei Fehlentwicklungen wie in Bild 1 gezeigt nicht ausgeschlossen waren ...).

Unter dem Eindruck steigender Unfallzahlen und zunehmender öffentlicher Kritik an unzureichender Verwirklichung von Sicherheitsmaßnahmen regte das US-Department of Transportation 1968 ein Programm zur Hebung der Straßenverkehrssicherheit an. Die Ergebnisse sollten in die Gesetzgebung einfließen. Ab 1970 bauten die Firmen Fairchild Hiller, American Machine & Foundry (AMF) und General Motors Experimentier-Sicherheitsfahrzeuge (Experimental Safety Vehicles, ESV) der für Amerika damals repräsentativen 1800 kg-Klasse (4000 lbs), wobei die Unfallvorbeugung, Verletzungsminderung, Vorgänge nach dem Unfall, Fußgängersicherheit und Fahrzeugsicherheit während des Stillstands beachtet werden sollten; der Eigenschutz stand jedoch deutlich im Vordergrund. Später beteiligten sich auch eine Reihe nichtamerikanischer Firmen mit entsprechend den Verhältnissen in den verschiedenen Ländern modifizierten Anforderungen an dem Projekt. Während der Bearbeitung fand, resultierend aus den Ergebnissen, eine Wandlung in den Zielgrößen und Einflußfaktoren statt. Die erhofften Fortschritte in der Entwicklung von Sicherheitskomponenten und Gesetzgebung fielen jedoch nicht in dem erwarteten Maße an, da durch die einseitige Verlagerung des Schwerpunkts auf das Crashverhalten weder für den Gesetzgeber noch für die Industrie verwertbare Fahrzeugprototypen entstanden.¹

¹ Siehe auch [13], [14].

Aus diesen Gründen wurde 1973 ein Neustart in Form des RSV-Programms (Research Safety Vehicle) vorgenommen. Allgemeines Programmziel war nun auch nicht mehr allein die Erarbeitung der sicherheitstechnischen, sondern auch der wirtschaftlichen und ökologischen Anforderungen an ein fertigungstechnisch befriedigendes Serienfahrzeug für die Mitte der 80er Jahre, dessen Konzept von vornherein auch Kraftstoffverbrauch, Umweltbelastung und Kosten einbezog. Die zu beachtenden Randbedingungen waren demzufolge die künftige Verkehrsstruktur, Siedlungsstruktur, Bevölkerungsstruktur, die Unfallsituation, biomechanische Spezifikationen, Qualität der Aktiven Sicherheitsmerkmale, Nutzen/Kosten-Analysen und auch gesellschaftspolitische Zielsetzungen. Ein wesentlicher Unterschied zum ESV-Projekt war, daß beim RSV - abgesehen von einer Gewichtsbegrenzung auf 3000 lbs - die Spezifikationen nicht vorgegeben waren, sondern innerhalb der Untersuchungen entwickelt werden sollten [15]. Es entstanden ein Calspan- und ein Minicars-RSV sowie Studien bei Ford, AMF, Renault, Peugeot, Toyota, Nissan, Volvo und Volkswagen, deren Eigenschaften die Betonung der Wechselwirkungen zwischen einzelnen Zielsetzungen und das Abgehen von detaillierten Vorgaben erkennen lassen.¹

Tests in verschiedenen Ländern mit den Fahrzeugen fielen nicht in allen Punkten befriedigend aus und zeigten Schwächen der üblichen Meßmethoden, große Streuungen oder schwierig in kausalen Zusammenhang mit dem realen Geschehen zu bringende Meßwerte, z. B. bei Verletzungs- oder Fahrsicherheitsdefinitionen. Die Diskussion der Ergebnisse offenbarte erneut die schon beim ESV-Programm bestehende unterschiedliche Haltung der US-Regierung auf der einen Seite sowie der Industrie und den Regierungen der anderen beteiligten Länder auf der anderen Seite zur Frage der Erarbeitung und Umsetzung von Forschungsergebnissen in Sicherheitsgewinne im Straßenverkehr.²

¹ Siehe auch [16].

² Siehe auch [14], [17].

Die steigenden Energiekosten und die zunehmende Beachtung von Fragen der Rohstoffverfügbarkeit und Umweltbelastung führten zum IVS-Programm (Integrated Vehicle Systems), bei dem neben der Sicherheit noch stärkeres Gewicht auf Kraftstoffverbrauch, Emissionen, Stilistik, Reparaturfreundlichkeit, Betriebskosten und Kundenakzeptanz gelegt wurde unter Beibehaltung der Kopplung zwischen Forschungs- und Gesetzgebungsprogramm. Bild 2 zeigt eines der Fahrzeuge aus diesem Programm. Mit analytischen Prognosemodellen sollten Bewertungsmodelle neuer Technologien, Wechselwirkungen zwischen Zielsetzungen und Effektivitätsuntersuchungen von Gesetzgebungen untersucht werden. Die Studien-, Planungs- und Entwicklungsphasen sollen 1986 abgeschlossen werden.¹

Die Ergebnisse aus diesen Programmen auf dem Gebiet der Bauweisen und Werkstoffe werden exemplarisch anhand einiger ausgewählter und detaillierter untersuchter Fahrzeuge in Kapitel 2 vorgestellt.



Bild 2: IVS-Beitrag IRVW III, 1984 [20].

¹ Siehe auch [14], [18], [19].

1.2 DAS FORSCHUNGSPROJEKT "Auto 2000"

Dem IVS-Gedanken nahe kommt in Deutschland das 1978 vom Bundesministerium für Forschung und Technologie als Beitrag zur Sicherung eines längerfristig wirksamen Technologievorsprungs ausgeschriebene Forschungsvorhaben "Demonstration automobiltechnischer Forschungsergebnisse in integrierten Gesamtkonzepten von Personenwagen-Versuchsmodellen". Projektziel war es, das technologische Potential aussichtsreicher Einzellösungen in ihrem Zusammenwirken aufzuzeigen und so verbesserte Entscheidungsgrundlagen zu schaffen [6]. Die Forschungsfahrzeuge sollten grundsätzlich serienfähige Konzepte aufweisen, jedoch auch die Realisierung innovativer technologischer Ansätze ermöglichen. Die Schwerpunkte waren:

- Energie- und Ressourcenschonung,
- Umweltfreundlichkeit,
- Sicherheit,
- Wirtschaftlichkeit und Nutzwert.

Parallel zu den Einzelvorhaben sollten zur Abschätzung der Auswirkungen veränderter technologischer Eigenschaften von Kraftfahrzeugen die verkehrstechnischen und volkswirtschaftlich/gesellschaftlichen Randbedingungen analysiert und prognostiziert werden.

Den Fahrzeugherstellern bot das Projekt die Möglichkeit, im Entwicklungsstadium befindliche neue Technologien und Baugruppen auf ihre praktische Eignung zu erproben. Unter Berücksichtigung der vorgegebenen Richtwerte konnten so die Firmen vorhandene Ideen und Lösungsmöglichkeiten aus den Labors und Prüfständen mit bereits existierenden Konstruktionsprinzipien modernen Automobilbaus verbinden. Die Einteilung der zu bauenden Fahrzeuge in verschiedene Klassen bot die Chance, den auch in Zukunft verschiedenartig erwarteten Transportbedürfnissen (und dem Marktsegment der Firmen entsprechenden) gerecht werdende Konzeptionen zu

verwirklichen. Es entstanden Prototypen in den drei Gewichtsklassen bis 1250 kg, 1250 kg bis 1700 kg und 1700 kg bis 2150 kg, wobei Volkswagen in der untersten Klasse ein Fahrzeug in der Größenordnung des VW Golf vorstellte, Audi in der mittleren Gewichtsklasse ein Fahrzeug entsprechend dem Audi 100 und Mercedes ein Fahrzeug entsprechend seiner S-Klasse. Eine Hochschularbeitsgemeinschaft aus Instituten der Universitäten in Aachen, Berlin, Darmstadt und Stuttgart orientierte sich an der mittleren Klasse [2].

Zur Vorstellung der Fahrzeuge auf der Automobilausstellung in Frankfurt 1981 präsentierten auch andere Firmen entsprechende Studien, die ähnliche Zielsetzungen erkennen ließen, z. B. Ford mit der Probe II (Basis Sierra) oder Opel mit dem Tech 1 (Basis Kadett). Die augenfälligsten Neuerungen bei diesen Forschungsfahrzeugen lagen bei sparsameren Hubkolbenmotoren mit Schallkapseln, aufwendigen Getrieben und Regelungssystemen, niedrigen c_w -Werten, verstärktem Einsatz von Elektronik und intensiver Anwendung von Aluminium und Kunststoffen an den Karosserien mit tragenden Strukturen aus Stahl. Entwicklungsschwerpunkte beim letzten Punkt waren die Reduzierung des Gewichts im Hinblick auf die Einsparung von Kraftstoff, die Integration von Bauteilen mit dem Ziel der Montagekostensenkung, die Verbesserung der Gesamtqualität und die höhere Sicherheit bei kalkulierbaren Mehrkosten [20].

In den folgenden Jahren verschoben sich die Schwerpunkte mehr zu kleineren Wagen hin wie dem Opel Junior, dem VW Student oder dem Renault V.E.S.T.A., bei denen ebenfalls die Anwendung von Kunststoffen, neue Fertigungstechniken und Bauweisen sowie geringer Luftwiderstand besonders berücksichtigt wurden. Interessante Anwendungsbeispiele für Aluminium und Magnesium finden sich im 1983 vorgestellten Volvo LCP.

2 BAUWEISEN UND WERKSTOFFE VON FORSCHUNGSAUTOS, DARGESTELLT ANHAND EINIGER AUSGEWÄHLTER BEISPIELE

2.1 DIE FORSCHUNGS-PKWS DES PROJEKTS "AUTO 2000"

Bei den im Rahmen des Projekts "Auto 2000" in der Bundesrepublik Deutschland vorgestellten Fahrzeugen¹ (die Bilder 3 bis 6 zeigen die zur IAA 1981 vorgestellten Prototypen) ist weitgehend aufgebaut worden auf bekannten Technologien und Konzepten. Keines der Fahrzeuge besitzt eine Vollkunststoff- oder Aluminiumkarosserie bzw. eine überzeugende Mischkonstruktion; alternative Wege bleiben auf Einzelkomponenten beschränkt. Kunststoff erhält dort den Vorzug, wo bei Einzelkomponenten Formgebungsprioritäten durch dessen Einsatz vorteilhaft berücksichtigt werden können oder Funktionsvorteile wie z. B. bei Fußgängerschutzmaßnahmen dafür sprechen. Bei der von Audi-NSU gezeigten und bekannter Technik entsprechenden vormontierten Bodengruppeneinheit auf GFK-Basis, dem eingelegten Kunststoffdach (Bild 7) oder dem Vollkunststoffsitz bei Volkswagen liegt der Schwerpunkt der Entwicklung bei einer Fertigungstechnologie, die zur Ablösung der konventionellen Werkstoffe führen könnte. Die Fertigung dieser Komponenten birgt ein Integrations- und Automatisierungspotential im Sinne von Einzelteilereduzierung und Kosteneinsparung; der höhere Aufwand für Lackierung, Befestigung und Abdichtung dieser Teile muß jedoch ausgeglichen werden. Ein Gewichtsvorteil ist mit Vollkunststoffsitzen gegenüber gewichtsoptimierten Seriensitzen derzeit nicht erzielbar [1]. Räumlich verformte Sandwichteile sind noch nicht problemlos in Großserie zu fertigen und bedeuten bei Verwendung von GFK auch nicht in jedem Falle eine Gewichtsersparnis.

¹ Siehe auch [2], [6], [8], [9], [10], [21] bis [33]; Gegenüberstellungen und detaillierte Werkstoffangaben in Tabellenform auf Seite 371 bis 379 im Anhang, Erläuterung der angesprochenen Werkstoffe in Kapitel 3.1 bzw. der Abkürzungen Seite 7 bis 10.



Bild 3: Audi Forschungs-Pkw "Auto 2000".



Bild 4: Daimler-Benz Forschungs-Pkw "Auto 2000".



**Bild 5: Forschungs-Pkw UNI-CAR der Hochschul-
arbeitsgemeinschaft (Prototyp 1).**



Bild 6: Volkswagen Forschungs-Pkw "Auto 2000".

Auffällig ist der starke Kunststoffeinsatz für Hauben und Deckel der Karosserie, während für die Türen vorwiegend Aluminium zum Einsatz kommt. Zur Energieabsorption im Frontbereich z. B. beim Low-Speed-Test wird Kunststoff (PUR oder PC)¹ bevorzugt. Die Tragstrukturen und die beim Crash mit höherer Geschwindigkeit energieabsorbierenden Bereiche der Karosserien sind dagegen stets aus Stahl, wobei die Rahmenbauweise mechanische Stabilität und Insassenschutz mit der möglichen Montage von Bauteilen aus anderen Werkstoffen verbinden soll. Hier stellt sich auch die größte Gewichtseinsparung ein. Allein eine Studie von Porsche, die im Rahmen des Projekts nur bis zur Lastenheftphase verfolgt wurde, mündete in ein Fahrzeug mit vollständig aus Aluminium gefertigter Karosserie.²

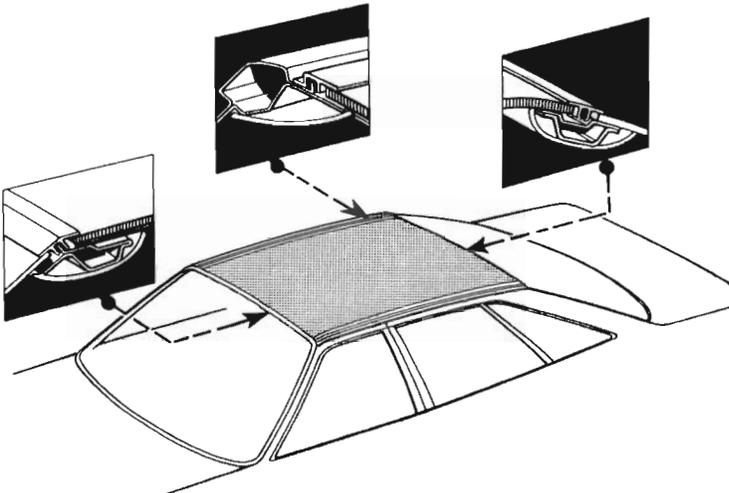


Bild 7: Eingeklebtes Sandwich-Dach des Audi-Forschungs-Pkw aus Kunststoff [20].

¹ Abkürzungen siehe Seite 7 bis 10.

² Siehe auch [34], [35], [36].

Die verwendeten Karosserieteile oder Stoßfänger aus PUR sind, wie auch Serienwagen schon gezeigt haben, technisch realisierbar, der Serieneinführung dürfte jedoch der bekannt hohe Aufwand für Nacharbeiten und Lackierung noch entgegenstehen. Frontteile aus PC bzw. Blends z. B. aus PBTP mit PC als Komponente für erhöhte Schlagzähigkeit sind zwar Stand der Technik, benötigen aber ebenfalls viel Erfahrung in der Fertigungstechnik, damit Lackierung und Schlagzähigkeit befriedigend ausfallen.¹

Bei den Innenausstattungen der Fahrzeuge sind Neuerungen an Werkstoff und Bauweise kaum zu bemerken, da hier die Kunststoffe in vielfältiger Form und Anwendung schon in der Großserie dominieren. Entsprechendes gilt auch für den Fortschritt der Elektronik bei den Instrumenten, abgesehen vom Trend zu LCD-Anzeigen.

Teilweise wird auch Glas durch Kunststoff, meist Polycarbonat oder Acrylglas, ersetzt; jedoch nur, wo keine hohen Ansprüche an die Abriebfestigkeit oder die Steifigkeit gestellt werden. Windschutz- und Kurbelscheiben sind bei allen Fahrzeugen konventionell, wenn auch dünner als bisher, während z. B. Scheinwerferstreuscheiben, feststehende Seiten- und Heckfenster aus PMMA oder PC vorgestellt wurden. Die Kunststoffscheiben haben jedoch noch keine befriedigende Lebensdauer und Widerstandsfähigkeit gegen unsanfte Behandlung (siehe 3.2.2.2).

Bei mechanischen Komponenten an Fahrwerk oder Motor wird bei Neuentwicklungen Aluminium der Vorzug gegeben. Die Kunststoffhinterachse des Volkswagen-Prototyps hat noch keine befriedigende Dauerfestigkeit; dem in der Temperaturfestigkeit unter Extrembedingungen noch problematischen Kunststoffrad stehen Leichtmetallräder bei den anderen drei Prototypen gegenüber. Das Daimler-Benz-Forschungsauto besitzt eine kohlefaserverstärkte Kardanwelle; ansonsten

¹ siehe auch [21], [37], [38], [39].

finden sich nur noch wenige entsprechend hochbelastbare Teile aus diesem Werkstoff, obwohl in letzter Zeit häufig von den Rohstofflieferanten und verschiedenen Fahrzeugherstellern derartige Komponenten gezeigt wurden. Neue Keramikwerkstoffe z. B. in der Mercedes-Gasturbine wurden noch nicht vorgestellt, sollen sich aber weiter in der Erprobung befinden.

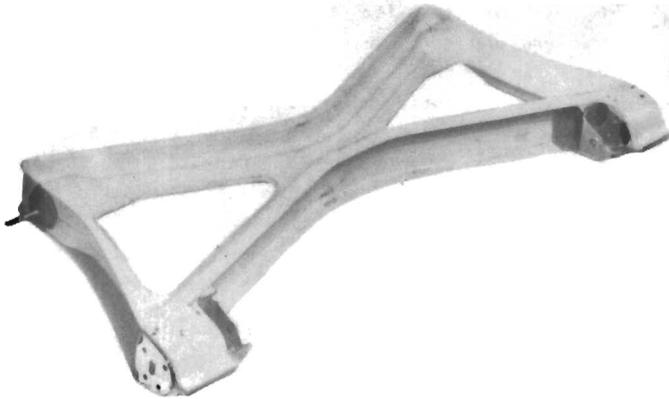


Bild 8: Kunststoffhinterachse des VW-Forschungs-Pkw "Auto 2000", 1981 [20].

Die in Bild 8 gezeigte Hinterachse besteht aus zwei verklebten Halbschalen aus SMC mit 65 % unorientiertem Glasanteil mit durchlaufenden Fasern nur an der Querverrippung; die Anschlußteile sind aus Aluminium. Dadurch konnten 7,8 kg bzw. 50 % Gewicht gegenüber der Stahlausführung am VW Golf eingespart werden. Ein Serieneinsatz kommt vorerst wegen zu hoher Kosten nicht in Frage.

Abgesehen von verschiedenen interessanten Detaillösungen besitzt keines der Fahrzeuge Komponenten, die grundsätzlich neue und kurzfristig realisierbare Aspekte in Material, Form oder Fertigung aufzeigen, die nicht schon von früheren Fahrzeugen oder für andere Anwendungen her bekannt sind; bezogen auf die Anwendung in der Großserie könnten diese aber durchaus grundsätzlichen Charakter bekommen. Revolutionäre Veränderungen sind allerdings auch kaum zu erwarten, da bei derart komplexen und eingespielten Mechanismen wie der Automobilindustrie das Risiko bei radikalen Umstellungen viel zu groß ist. Fertigungstechnische Probleme und hohe Kosten dürften vorerst bei vielen Komponenten die erzielbaren Gewichtsvorteile mit neuen Werkstoffen nicht ausgleichen können. Die konventionelle Metalltechnologie besitzt in der Großserie nach wie vor deutliche Vorteile z. B. bei den Lackier- und Nacharbeitskosten und der Verbindungstechnik.

Man kann allerdings feststellen, daß durchaus einzelne Komponenten aus nicht-konventionellen Werkstoffen - wie an den Forschungsfahrzeugen gezeigt - schon den Weg in die Serie gefunden haben. Der Audi 100 von 1982 beispielsweise besitzt einen Aggregateträger in der Tür und einen Türrahmen aus einer Aluminium-Schweißgruppe, einen Wagenheber aus Leichtmetall sowie eine Reserveradmulde und Radhäuser vorn aus Kunststoff. 38 % der Rohkarosserie sind aus verzinktem Blech oder Zincometal. Der Ford Sierra bekam Stoßfänger aus Polycarbonat (PC/PBTP, bei der Luxusversion mit PUR-Schaumeinlage), eine Scheinwerfer/Kühler-Verkleidung aus in Wagenfarbe lackiertem ABS. Der Mercedes 190 hat eine Unterboden-Motorraumverkleidung aus glasmatteverstärktem Polypropylen (PP-GM) sowie Stoßfänger, aufgebaut aus verschiedenen Kunststoffen wie SMC, PUR, PC und mod. PP/EPDM (Bild 9).¹

¹ Siehe auch [40], [41], [42], [43]. Weitere Literatur zum BMFT-Projekt Forschungs-Personenwagen siehe z. B. [6] bis [11], [21] bis [36], [44], [45]; zusätzliche Hinweise auf Seite 242.

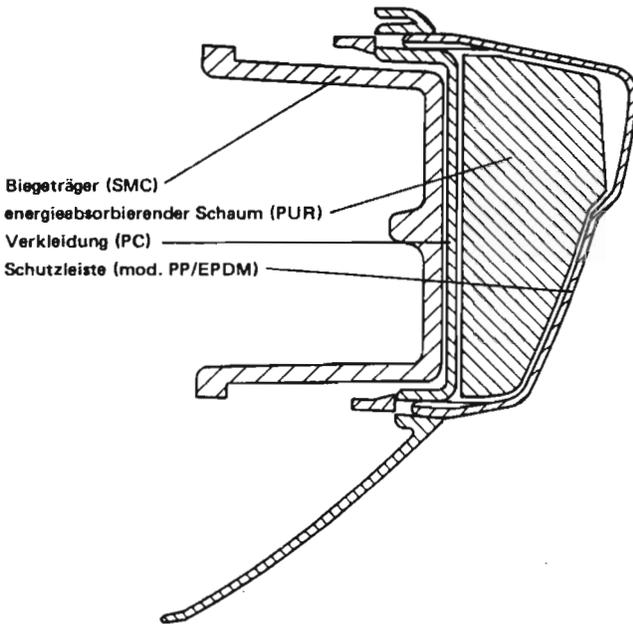


Bild 9: Beispiel aufwendiger Substitution an einem Großserienfahrzeug: Stoßfänger des Mercedes 190 [46].

Weitere Substitutionen werden folgen, wenn ein deutlich wirtschaftlicheres Verfahren zur Herstellung komplizierter, räumlich geformter Sandwichelemente, von SMC-Teilen mit überzeugender Oberfläche ohne Nacharbeiten und geringem Gewicht oder mit anderen Fasern und entsprechenden Verarbeitungs- und Montageverfahren entwickelt werden [38]. Intensive Arbeiten zur Lösung der Großserienprobleme sind im Gange und lassen Fortschritte erwarten. Aluminium könnte günstiger werden, wenn die Gewichts- und damit Kraftstoffeinsparung die Mehrkosten z. B. wegen drastisch höherer Benzinpreise schneller amortisieren würde; vorausgesetzt, die Werkstoffkosten steigen nicht im selben Maße.

2.2 WEITERE FORSCHUNGSFAHRZEUGE

Die überwiegende Mehrzahl weiterer in den letzten Jahren vorgestellter Forschungsfahrzeuge baut ebenfalls weitgehend auf bekannten Konzepten¹ auf. Auffallend ist häufig die meist übernommene tragende Karosseriestruktur eines entsprechenden Serienmodells oder zumindest die in der gleichen Form übernommene Bodengruppe unter Verwendung hochfester Stähle für besonders belastete Bereiche unter der Außenhaut. Bei diesen Komponenten ist eine Gewichtsersparnis in der Regel mit überproportionalen Mehrkosten verbunden, da Stahlblech durch die Steifigkeit und Dauerfestigkeit bei angepaßter Dimensionierung keine durchschlagenden Gewichtsnachteile im Vergleich zu den auf dem Markt verfügbaren Kunststoffen hat. Aluminium würde zwar leichter bauen, muß aber mit ähnlichen Fertigungsverfahren, in einigen Punkten auch aufwendiger, verarbeitet werden, so daß der erheblich höhere Werkstoffpreis sich nur bei Betrachtung der gesamten Energiebilanz von Rohstoffgewinnung über Lebensdauer bis zum Recycling amortisieren würde (siehe 4.7 und 4.8). Fahrzeuge mit selbsttragenden Kunststoffkarosserien bleiben vorerst die Ausnahme.

Auf den folgenden Seiten sollen einige Beispiele ausführlicher vorgestellt werden. Im Anhang befinden sich dazu ab Seite 371 Tabellen, in denen die Forschungsfahrzeuge nach Baugruppen aufgegliedert gegenübergestellt wurden.

- FIAT VSS

Deutlich wird diese Bauweise der Forschungsfahrzeuge beispielweise am in Bild 10 gezeigten FIAT VSS (siehe auch Bild 76 und Tabelle Seite 374 ff). Ein Gerippe aus Stahlblech stellt die Basis für eine weitgehend variable Kunst-

¹ Einige grundsätzliche Anmerkungen dazu siehe unter 2.3.

stoffkarosserie dar. Funktionsvorteile der Kunststoffe wie ihre Elastizität bei Verwendung an Stoßfängern und das geringe Gewicht bei lediglich formgebenden Teilen der Außenhaut können voll genutzt werden. Weitere Vorteile verspricht man sich durch die Montage in Baugruppen, da die tragenden Strukturen in bewährter Technik am Band im Punktschweißverfahren zusammengefügt und lackiert werden können, während die Kunststoffbaugruppen parallel vormontiert und lackiert werden. Durch den Einsatz hochfester Stahlbleche erhält das Fahrzeug die notwendigen Eigenschaften für den Crash-Test, ohne daß die geringere Energieaufnahme der Kunststoffe durch zusätzliche Blechverstärkungen und damit höherem Gewicht ausgeglichen werden müßte. Eine hohe Lebensdauer des VSS soll durch Verwendung verzinkter Bleche und durch die Kunststoffaußenhaut erreicht werden. Front- und Heckteil sowie die Stoßfänger sind aus PC gefertigt, welches eine gute Schlagzähigkeit hat. Hier wird dem Spritzguß¹ der Vorzug gegenüber dem Reaktionsguß¹ gegeben. Heckklappe, Türen und die seitlichen Karosserieteile bestehen aus SMC, d. h. GF-UP. Für die Türverstärkungen wird auf HSLA-Stahl zurückgegriffen. Motorhaube und Dach sind aus glasfaserverstärktem Polyester-schaumstoff.

Da bei diesem Fahrzeug keine neuen Werkstoffe verwendet wurden, steht hier das Konzept der tragenden Stahlstruktur mit anhängbaren Komponenten aus anderen Werkstoffen im Vordergrund. Es zeigt seine Vorzüge weniger in der Materialauswahl im Detail als durch die Fertigungs- und Montageverfahren sowie durch die Variabilität der Karosserie. Die Gewichtsersparnis durch die Kunststoffteile geht teilweise wieder verloren durch Maßnahmen zur Versteifung der verbliebenen Stahlstruktur.²

¹ Siehe dazu Kapitel 3.4.

² Siehe auch [47] bis [53].

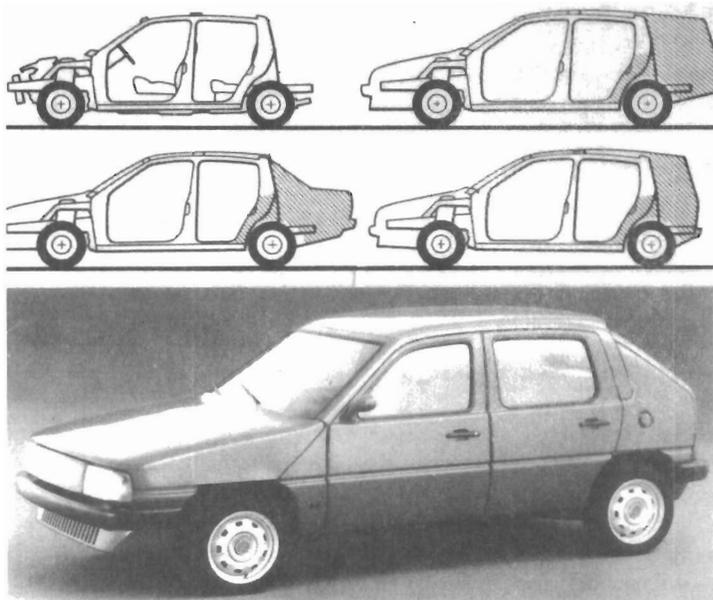


Bild 10: FIAT VSS [53].



Bild 11: Minicars RSV [17].

- Minicars RSV

Eine im Prinzip ähnliche Bauweise zeigt der Minicars-RSV (siehe Bild 11) mit seinem Body-Glove-Konzept. Stoßfänger, Hauben, Klappen, Türen, Leuchteinheiten usw. aus Kunststoff bedecken fast die gesamte Karosserie, so daß praktisch alle Teile der Außenhaut demontierbar bleiben. Die tragende Struktur besteht wiederum aus Stahlblech, wobei in weiten Bereichen Hohlprofile ausgeschäumt wurden, um mit geringem Gewicht hohe Energieaufnahme zu erreichen. Ob dieser hohe Aufwand in ein serienfähiges Fertigungsverfahren umgesetzt werden kann, bleibt dahingestellt.¹

Das Ausschäumen von Trägern ist seit langem bekannt, hat sich aber aus vielerlei Gründen nicht in der Großserie durchgesetzt. Hier sind z. B. zu nennen das zusätzliche Gewicht und der Fertigungsaufwand, die Feuchtigkeitsaufnahme und damit Korrosionsprobleme sowie die geringere Reparaturfreundlichkeit [1]. Bei Minicars war allerdings die Crashesicherheit der Hauptschwerpunkt der Entwicklung.

- Peugeot Vera

Näher am Basisfahrzeug blieb Peugeot mit dem Vera (siehe Bild 12 und Tabelle Seite 374 ff). Hier sollte eine möglichst große Energieersparnis im Betrieb erzielt werden durch optimierten Motor, verbesserte Aerodynamik und Leichtbau. Neben einer Vielzahl von alternativen Werkstoffen sind aber auch konventionell gefertigte Teile insbesondere bei der Mechanik beibehalten, jedoch gewichtsoptimiert worden.²

Die Karosserie besteht weitgehend aus Stahlblech, in sich tragende, sicherheitsrelevante Bereiche aus hochfestem

¹ Siehe auch [17], [54] bis [57].

² Siehe auch [58] bis [67].



Bild 12: Peugeot Vera [20].

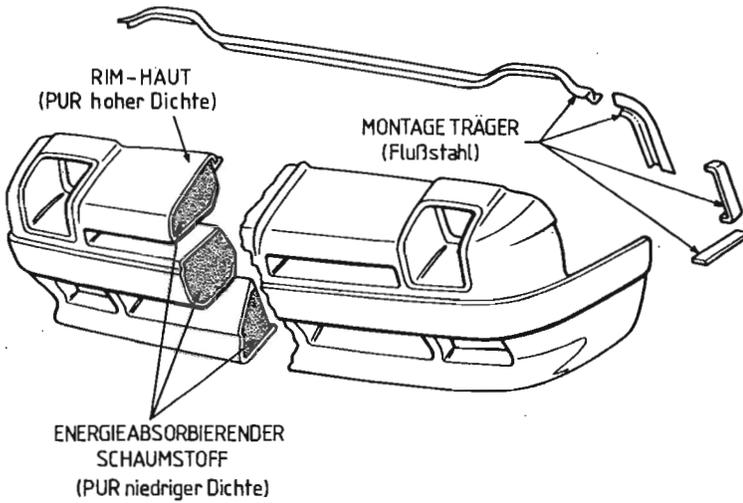


Bild 13: Kunststoff-Frontteil des Calspan RSV (äußere Form sonst wie Chrysler Simca 1308) [68].

Stahl. Die Gewichtsersparnis sollte durch die Summe von Detailverbesserungen und Änderungen an beweglichen Karoserieelementen erzielt werden. Bei Hauben, Klappen, Radkästen und auch bei den Rädern sind verschiedene Kunststoffe wie PUR, PP, ABS, GFK und CFK verwendet worden.

Zum Vergleich hat man auf einer Seite die Türen aus SMC und auf der anderen aus Aluminium hergestellt. Ein Gewichtvergleich ergibt:

Stahl	11,1 kg	100 %
SMC	7,6 kg	70 %
Aluminium	4,5 kg	40 %

- Calspan RSV

Weiteres Beispiel für die Orientierung an der Serie und Änderung nur da, wo es die gewünschte Funktion oder deutliche Vorteile zweckmäßig erscheinen lassen, ist der Calspan RSV. Selbst der Einsatz hochfester Stähle ist auf die sicherheitsrelevanten Abschnitte der Karosserie beschränkt worden. Auf andere Metalle, die nach der Verschrottung nur schwer wiedergewonnen werden können, wurde so weit wie möglich verzichtet. Energiebilanz und Ressourcenschonung waren die wesentlichen Gesichtspunkte bei der Werkstoffauswahl. Größere Kunststoffteile sind lediglich die für den Fußgängerschutz gedachte Softnose (Bild 13) und der Heckstoßfänger, da damit auch die FMVSS 215 erfüllt werden kann. Aus Aluminium sind ebenfalls aus Recyclinggründen nur demontierbare Teile wie z. B. die Motorhaube.¹

- Audi Quattro Rallye

Daß interessante Werkstoffanwendungen nicht nur bei Forschungsfahrzeugen zu finden sind, zeigt beispielsweise die

¹ Siehe auch [68] bis [71]; Tabelle auf Seite 377 ff.

Rallye-Ausführung des Audi Quattro. Hier fällt besonders der Einsatz der Aramidfaserverstärkung an hochbeanspruchten Teilen wie dem Ölwannenschutz und in Verbindung mit Kohlefasern auch am Lüfterträger auf. Kohlefaserverstärktes Epoxidharz wurde für die temperatur- und schwingungsbelasteten Ansaugrohre gewählt.¹

- Serienfahrzeug 1982, VW Passat

Zum Vergleich mit den Forschungsfahrzeugen ist in die Tabellen ein VW Passat² exemplarisch für einen typisches Großserienprodukt aufgenommen worden. Die Palette der Anwendungen der verschiedensten Kunststoffe ist umfangreich und zeigt deutlich, daß sehr viele der sich für eine Substitution konventioneller Werkstoffe anbietenden Möglichkeiten auch bereits heute ausgeschöpft worden sind. Die gefundenen Lösungen mögen noch lange nicht optimal sein; die Vielfalt der Werkstoffe läßt eine pauschale Einteilung in konventionell oder neuartig jetzt aber nicht mehr zu, da für jedes konkrete Einzelteil eine Ablösung durch eine andere Variante sofort und ohne Modellwechsel denkbar und ein genereller Trend dabei kaum noch überschaubar ist.

In den Tabellen im Anhang sind neben den zuvor besprochenen Fahrzeugen weiterhin noch der Audi Quartz³ und der Porsche 995⁴ nach Baugruppen geordnet aufgeführt worden. Die Details entnehme man der Gegenüberstellung.

Interessant sind in diesem Zusammenhang auch der Volvo LCP, Bild 14, oder der in Bild 22 gezeigte Pontiac Fiero. Der LCP (Light Component Project) zeichnet sich durch eine Reihe sehr interessanter Anwendungsbeispiele alternativer

¹ Siehe auch [72], [73].

² Siehe auch [74]; Tabellen auf Seite 377 ff.

³ Siehe auch [75], [76]; Tabellen auf Seite 374 ff.

⁴ Siehe auch [34], [35]; Tabellen auf Seite 377 ff.

Werkstoffe aus. In einer Firmenschrift werden Innovationen und Vorteile gegenübergestellt ([20], Auszug):

Aluminium in der tragenden Struktur	Gewichtseinsparung, Rückgewinnungsmöglichkeiten
Magnesium in Rädern, Fahrgestellteilen und Motor	Gewichtseinsparung, Rückgewinnungsmöglichkeiten
Aluguß in Bremsscheiben und Bremstrommeln. Spezielles Eisenpulver als Verschleißfläche	Große Gewichtseinsparung beim ungefederten Gewicht
Magnesiumgehäuse für das Lenkgetriebe	Gewichtseinsparung, weniger Einzelteile
Seitenscheiben und Kofferraumdeckel aus silikonbeschichtetem Polycarbonat	Gewichtseinsparung
Verstellbares Pedalgestell aus Kunststoff	Gewichts- und Kosteneinsparung, optimierte Fahrposition
Polyurethanfolie als Ersatz für herkömmlichen Außenlack	Große Umweltvorteile, wenn dieses Verfahren durchführbar ist



Bild 14: Volvo LCP [20].

(Weitere Literatur zu verschiedenen Forschungsfahrzeugen siehe z. B. [77] bis [112]; darunter ab [96] vornehmlich Literatur zum UNI-CAR.)

2.3 ANMERKUNGEN ZUR WERKSTOFFWAHL BEI FORSCHUNGSAUTOS

Die Betrachtung von Forschungsfahrzeugen ist häufig mit der Vorstellung verbunden, der Großteil der dargestellten Fahrzeugteile aus alternativen Werkstoffen sei eine Neuentwicklung und ab jetzt technisch möglich. Die Anfertigung eines Fahrzeugteils aus einem bestimmten Werkstoff sagt jedoch nur wenig aus über die Eignung für eine Serienproduktion, auch wenn verschiedene funktionelle Vorteile überzeugend klingen. Ein Punkt ist die Verfügbarkeit eines Rohstoffes zu einem kalkulierbaren Preis. In der Regel sinken die Kosten zwar mit der Menge des produzierten und verarbeiteten Materials, letztlich entscheidend sind aber, einwandfreie Funktionsgüte voraussetzend, die Kosten des fertigen Teils am auslieferungsbereiten Fahrzeug und die Akzeptanz durch den Kunden.

So werden seit Jahrzehnten immer wieder Karosserien aus glasfaserverstärktem Kunstharz vorgestellt und verschiedene Sportwagen in Serie, wenn auch kleinen Stückzahlen (z. B. GM Corvette), produziert. Neuestes Beispiel aus Deutschland ist die verkürzte Sportversion des Audi Quattro mit kohlefaserverstärkter Karosserie [94]. Nicht allein der Preis von rund 200 000 DM, sondern ebenso die extrem aufwendige Fertigung sprechen gegen höhere Produktionsziffern. Auch Pkws mit Aluminiumkarosserie hat es in Serie gegeben (z. B. Panhard Dyna, [95]), kohlefaserverstärkte Kunststoffe und Magnesiumlegierungen sind aus Luftfahrt und Rennsport lange bekannt.

Die Massenproduktion unterliegt Anforderungen und Bedingungen, bei denen die eigentliche Neuheit des Werkstoffs bzw. der Fortschritt, am fertigen Fahrzeug unsichtbar, im Produktionsprozeß in der Fabrik auftreten muß und nicht nur in der Realisierbarkeit eines Teils aus einem bestimmten Werkstoff. Der Fortschritt ist dabei stets in der Summe der einzelnen Änderungen über der Zeit zu sehen.

Bei der Untersuchung der Forschungsfahrzeuge muß beachtet werden, daß die Hersteller häufig nicht alle Möglichkeiten für Neuerungen ausschöpfen konnten, da einige Teile wie z. B. Spritzgußartikel nur in relativ aufwendigen, für die vorgesehenen Stückzahlen zu teuren Werkzeugen in ausreichender Qualität herzustellen sind, jedoch die notwendigen Werkzeugkosten im Hinblick auf die entfallende Serienfertigung der Prototypen nicht vertretbar waren. Entsprechende Beachtung ist jedoch auch umgekehrt z. B. Schweißkonstruktionen aus Aluminium, Laminaten aus GFK oder diversen Klebetechniken zu schenken, die seit Jahrzehnten bekannt und für Prototypen vorteilhaft sind, sich aber bislang in der Großserie nur für spezielle Anwendungen durchgesetzt haben.

Betrachtet man die zuvor beschriebenen Forschungsfahrzeuge unter diesen Aspekten, wird an vielen Stellen deutlich, daß allein daraus eine Aussage über die Zukunftschancen einer Neukonstruktion oder interessanten Substitution nicht möglich ist, auch wenn verschiedene Anwendungen an einer Vielzahl von Prototypen wiederholt auftauchen. Zum Beispiel sind räumlich ausgedehnte GFK-Sandwich-Elemente nach wie vor zum großen Teil Handarbeit. Auch SMC-Teile sind nach Aussagen der Halbzeughersteller nur dann als Metallsubstitution wirtschaftlich interessant, wenn der Einsatz hochintegrierter Multifunktionsteile möglich wird.

Die Auswahl der Beispiele in Kapitel 2.2 sollte keine Wertung darstellen, hat aber gezeigt, wohin der Weg mittelfristig gehen dürfte. Die Mehrzahl der untersuchten Fahrzeuge besitzt tragende und energieaufnehmende Karosseriestrukturen aus Stahlblech, teilweise mit hochfestem Stahl an den besonders beanspruchten Bereichen. Alternative Werkstoffe sind meist an Anbauteilen, Türen, Klappen, Stoßfängern usw. zu beobachten. Mechanische Komponenten sind überwiegend konventionell.

3 BAUWEISEN UND WERKSTOFFE VON HEUTIGEN FAHRZEUG-KOMPONENTEN, STAND DER TECHNIK UND AKTUELLE TRENDS

3.1 DIE GEBRÄUCLICHSTEN WERKSTOFFE

In diesem Kapitel soll zunächst eine Einführung in die besprochenen Werkstoffe, ihren Aufbau und ihre Eigenschaften gegeben werden. Die Beschreibung von Anwendungen nach Baugruppen folgt in 3.2.1 bis 3.2.6, während in 3.3 die Werkstoffanteile am heutigen Pkw behandelt werden. In 3.4 werden einige spezielle Aspekte erwähnt, die bei der Anwendung moderner Technologien zunehmend an Bedeutung gewinnen dürften. In Kapitel 6 werden dazu einige Trends dargestellt; Werkstoffanteile z. B. in 6.2.2.

3.1.1 Kunststoff

Von den im Automobilbau verwendeten Werkstoffen haben die Kunststoffe die mit Abstand größte Vielfalt in Erscheinungsform und Anwendungsbereich, so daß sie hier ausführlicher erläutert werden sollen.¹ Die Eigenschaft des Kohlenstoffs, sich mit anderen Elementen zu den unterschiedlichsten, auch sehr langen Molekülketten verbinden zu lassen, ist die Ursache für diese Vielfalt. Makromoleküle lassen sich zwar auch aus anderen Stoffen, z. B. auf Siliziumbasis oder auch aus natürlichen Stoffen als Ausgangsbasis, bilden, in der Regel wird aber unter "Kunststoff" zuerst eine synthetische organische Kohlenstoffverbindung verstanden.

Die Makromoleküle für die meisten Kunststoffe entstehen durch Verbinden verschiedener kleinerer Moleküle bei der Polyreaktion. Die Ausgangsstoffe sind je nach bereits vorhandener Länge der Molekülketten gasförmig, flüssig, plastisch oder fest, wobei mit zunehmender Kettenlänge bzw. höherem Polymerisationsgrad der plastische und schließlich auch ein fester Zustand zu erwarten ist. Die

¹ Nach [1], [108], [113].

Erstarrung wird bei niedrigen Temperaturen oder bei zunehmendem Polymerisationsgrad erreicht. Sie entspricht nicht dem festen Zustand kristalliner Stoffe. Der anscheinend feste Kunststoff stellt eher eine eingefrorene, amorphe oder teilamorphe Masse dar, deren Plastizität von der Temperatur, aber auch von der Beweglichkeit der Moleküle aufgrund ihres Aufbaus, der Moleküllänge und von der Häufigkeit von Verknüpfungsstellen verschiedener Molekülketten, der Vernetzung, abhängt.

Die Kunststoffe lassen sich in drei Hauptgruppen ordnen:

- Thermoplaste (Plastomere)
- Elastomere
- Duromere.

- Die Thermoplaste

Die Thermoplaste sind unvernetzt und lassen sich durch Erwärmung wieder erweichen und neu formen, vorausgesetzt, es kommt nicht zu einer gravierenden chemischen Veränderung bei Anwendung oder Verarbeitung. Sie lassen sich wiederum in amorph und teilkristallin unterscheiden. Bei den amorphen Plastomeren handelt es sich um Stoffe ohne Vernetzungen und ohne kristalline Bereiche (d. h. ohne eine periodische Wiederkehr bestimmter Anordnungen der Moleküle), die eine Gebrauchstemperatur unterhalb der Einfrier-temperatur haben, z. B. das Polyvinylchlorid (PVC)¹. Unregelmäßig angeordnete Seitengruppen haben zur Folge, daß trotz genügender Beweglichkeit der Moleküle kein geordneter Aufbau erreicht werden kann und damit auch keine teilkristallinen Strukturen entstehen können, z. B. wie beim Polymethylmethacrylat (PMMA) oder dem Polystyrol (PS). Bei geeigneter Molekülstruktur und damit zusammen-

¹ Eine Übersicht über die Kurzbezeichnungen nach DIN 7728 befindet sich auf Seite 9.

hängend entsprechender Beweglichkeit ist es jedoch Teilen der Makromoleküle möglich, mit anderen so geordnet nebeneinander zu liegen, daß sich kristalline Bereiche bilden, welche als zweite Phase zu einer Verfestigung des Kunststoffes führen. Man kann nun teilkristalline Thermoplaste erzeugen, bei denen die verbleibende amorphe Phase plastisch ist, z. B. Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyacetal (POM), oder Stoffe mit eingefrorener amorpher Phase wie z. B. Polyamid (PA) im Gebrauchstemperaturbereich.

- Die Elastomere

Bei den Elastomeren liegen Koppelungen der Molekülketten durch physikalische oder chemische Vernetzung an verschiedenen Stellen vor. Der Kunststoff läßt sich elastisch verformen, da sich die Molekülketten eingeschränkt bewegen, ausrichten oder dehnen lassen, nach Wegfall der äußeren Belastung aber wieder in die Ausgangslage zurückziehen. Die das elastische Verhalten bewirkenden Verbindungen können sowohl durch Molekülgruppen mit physikalischen Anziehungskräften als auch durch chemische Bindung entstehen. Als Beispiel für die chemische Vernetzung sei die Vulkanisation des Kautschuks genannt. Bei der zuerst genannten Gruppe können durch Erhöhung der Temperatur die Anziehungskräfte zwischen den Molekülen unwirksam und der Stoff dadurch plastisch werden. Beispiele für diese thermoplastischen Elastomere sind das PVC-weich oder das thermoplastische Polyurethanelastomer. Die als Karosserieaußenteile verwendeten Polyurethane, z. B. die Polsterungen am Forschungs-Pkw UNI-CAR für den Fußgängerschutz, sind chemisch vernetzte Elastomere.

- Die Duromere

Bei den Duromeren liegt der Kunststoff praktisch nicht als Knäuel von Kettenmolekülen vor, sondern als dreidimensionales Netzwerk oder Gitter. Dieser Aufbau kann durch Vernetzung der Kettenmoleküle erreicht werden, oder der Kunststoff kann direkt aus sogenannten monomeren Einheiten zum Netzwerk reagieren, wie z. B. das Harnstoffduomer (UF). Die Duromere lassen sich durch Temperaturerhöhung nicht wieder erweichen, da dies eine Auftrennung der Vernetzungsstellen und damit eine chemische Veränderung bedeuten würde; der Kunststoff zersetzt sich. Durch Einbau geeigneter anderer Stoffe kann auch erreicht werden, daß die Makromoleküle wieder etwas beweglicher werden. Auf diese Weise kann z. B. die Schlagzähigkeit erhöht werden.

Die Kunststoffe können als homogener, massiver Stoff auftreten, als flächen- oder linienhafte Gebilde wie Folien oder Fasern, als Schaumstoff, als verstärkter oder gefüllter Werkstoff durch Einbau von Fasern oder Pulvern. Vor der Verarbeitung können sie als homogene Flüssigkeit, als Lösung, Dispersion oder Pulver, jeweils auch nach Komponenten getrennt, vorliegen. Die dadurch erreichbare Variationsbreite der Eigenschaften und die Möglichkeit der Verarbeitung zu Verbundwerkstoffen stellt einen Hauptvorteil der Kunststoffe dar.

Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul der nicht orientierten und nicht verstärkten Kunststoffe liegen deutlich unter den entsprechenden Werten der Metalle. Orientierte oder verstärkte Kunststoffe oder Verbundwerkstoffe erreichen aber auch vergleichbare Zahlen. So zeichnen sich z. B. Polyamidfasern durch sehr hohe Zugfestigkeiten und Kohlefasern (die allein eigentlich kein Kunststoff sind) auch durch einen E-Modul in der Größenordnung des Stahls aus.

In der Regel wird die größere Dehnung der Kunststoffe bei Biegebelastungen durch das niedrigere Gewicht mehr als ausgeglichen; wird auf hohe Dehnsteifigkeit der Bauteile Wert gelegt, sind Metalle, insbesondere die Leichtmetalle, jedoch meist überlegen. Bei Einwirkung äußerer Kräfte über längere Zeit kann es bei vielen Kunststoffen trotz der Vernetzung zu einem Aneinandergleiten der verknäulten Molekülketten kommen, dem Kriechen. Bei kurzzeitigen Beanspruchungen ähnelt das Verhalten eher demjenigen fester Stoffe. Kunststoffe weisen auch ohne Oberflächenbehandlung keine Korrosion auf.

Die wesentlichsten Vorteile der Kunststoffe lassen sich nach Aussagen der Verarbeiter und Anwender [1] wie folgt zusammenfassen:

- Geringes Gewicht,
- Hohe Elastizität,
- gute Korrosionsbeständigkeit,
- große Arbeitsaufnahme bei Dehnung,
- bei Orientierung hohe gerichtete Festigkeit,
- Schwingungsdämpfung,
- Schalldämmung,
- Wärmeisolation,
- elektrische Isolation,
- direkte Wiederverarbeitbarkeit bei Thermoplasten.

Nachteile in den Materialeigenschaften von Kunststoffen gegenüber Metallen werden in [2] so zusammengefaßt:

- Die Spannungs-Dehnungs-Kurve vieler Kunststoffe zeigt überhaupt keinen Proportionalbereich. Vielfach ist eine Streckgrenze kaum oder gar nicht erkennbar.
- Der Elastizitätsmodul von Kunststoffen kann für Zug- bzw. Druckbelastungen unterschiedlich sein.
- Der Elastizitätsmodul von Kunststoffen ist im Vergleich mit dem der Metalle generell sehr niedrig.
- Die Eigenschaften der Kunststoffe sind oft anisotrop.

- Die mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe sind im allgemeinen abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit.
- Die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen sind zeit- und temperaturabhängig.
- Im Gegensatz zu Metallen zeigen Kunststoffe unter Dauerbelastung ein ausgeprägtes Kriechverhalten.
- Kunststoffe verlieren mit der Zeit an Reißfestigkeit, auch bei nur statischen Belastungen.
- Die Eigenschaften von Kunststoffen können unter dem Einfluß von Umwelteinwirkungen nennenswert variieren.

Die ersten vier Punkte können je nach Anwendungsfall allerdings auch eher als Vorteile aufgefaßt werden. Die Anisotropie z. B. ist eine häufig gewünschte Eigenschaft.

Die Verbundwerkstoffe können deutlich andere Verhaltensweisen als homogene Kunststoffe aufweisen. Ihre Eigenschaften hängen dann wesentlich von den Füll- oder Verstärkungsstoffen ab, so daß typische Nachteile gegenüber Metallen mitunter völlig ausgeschaltet werden können.

Bild 15 zeigt die Anteile der verschiedenen Kunststoffe untereinander in den Fahrzeugbaugruppen [114], über der Zeit [116] sowie am Gesamtverbrauch im Pkw-Bau [122] in Westeuropa, Bild 16 die Entwicklung des Verbrauchs der verschiedenen Kunststoffe. Die Zahlen dieser herangezogenen wiedergegebenen Quellen liegen dabei im Rahmen derer der Mehrzahl anderer Veröffentlichungen. Veränderungen über der Zeit zeigen sich hauptsächlich in der deutlichen Zunahme des Polyurethans, während das Polyvinylchlorid seine Spitzenposition eingebüßt hat. Überdurchschnittliche Zunahmen zeigen auch das Polystyrol und das Polypropylen.

Werkstoff	Karosserie	Fahrwerk	Motor	Getriebe	Elektrik	Gesamt
PVC	24,0 %	0,5 %			3,5 %	28,0 %
PUR	28,0 %	0,9 %		0,1 %		29,0 %
PE	0,9 %		3,0 %		0,1 %	4,0 %
PA	1,0 %	0,1 %	1,1 %		0,3 %	2,5 %
GPK	2,3 %	0,4 %	1,6 %		0,3 %	4,5 %
FPO	1,4 %					1,4 %
PP	8,5 %		0,3 %		0,2 %	9,0 %
PCM	1,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,2 %	1,5 %
PS	0,6 %	0,2 %			0,7 %	1,5 %
ABS	15,5 %				0,5 %	16,0 %
PMMA					2,0 %	2,0 %
PC					0,6 %	0,6 %
Gesamt	83,3 %	2,2 %	6,1 %	0,2 %	8,2 %	100 %

Kunststofftyp	[116] 1968	[116] 1972	[116] 1976	[116] 1979	[122] 1980
PVC	38,9 %	18,9 %	24,2 %	13,6 %	13 %
PUR	21,1 %	29,3 %	17,9 %	31,6 %	22 %
PP	1,7 %	3,2 %	16,0 %	10,7 %	23,5 %
PA	5,1 %	4,8 %	10,2 %	10,0 %	5,5 %
PP, UP	2,8 %	1,2 %	3,6 %	7,2 %	11,5 %
PMMA	2,8 %	1,2 %	3,6 %	7,2 %	2 %
ABS					7,5 %
PS	17,2 %	31,2 %	18,4 %	16,6 %	
PE	7,3 %	6,2 %	4,4 %	6,1 %	
PCM	1,1 %	0,7 %	0,9 %	1,2 %	
PC	0,3 %	0,1 %	0,5 %		
PTFE	0,03 %	0,01 %	0,02 %	0,1 %	
PVB	1,1 %	0,6 %	0,7 %	0,9 %	
Sonstige	0,6 %	0,3 %	0,2 %	0,1 %	16,5 %
Gesamteinatz	35,5 kg	69,3 kg	58,6 kg	105,5 kg	1320 000 t

Bild 15: Anteile der verschiedenen Kunststoffe in den Pkw-Baugruppen [114], über der Zeit [116] sowie am Gesamtverbrauch [122] in Westeuropa.

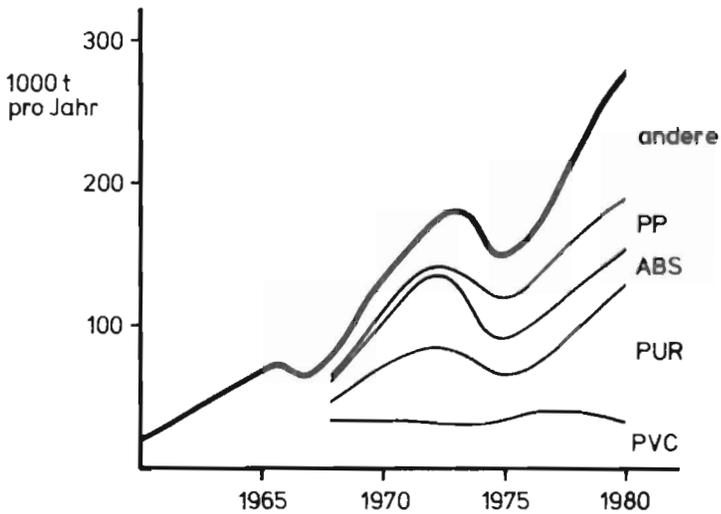


Bild 16: Entwicklung des Verbrauchs an Kunststoffen in der Bundesrepublik Deutschland¹.

¹ Siehe dazu z. B. auch [114] bis [124] sowie weitere Angaben in Kapitel 3.3 auf Seite 109 und die Bilder 140 bis 144.

3.1.2 Stahl und Eisen

- Der Aufbau der Metalle

Die Metalle¹ unterscheiden sich von den anderen chemischen Elementen durch ihre besondere Art der Atombindung. Die metallische Bindung ist dadurch gekennzeichnet, daß die Elektronen der äußeren Schalen nicht einem Atom bzw. Molekül zugeordnet sind, sondern als sogenanntes Elektronengas die Bindung der Atome mit praktisch richtungsunabhängigen Anziehungskräften und die gute elektrische Leitfähigkeit bewirken. Dadurch liegen die Metalle in Strukturen dichtester Kugelpackungen vor, d. h. als Kristalle verschiedener, teilweise temperaturabhängiger Gitterformen.

Die Atome eines Metallkristalls lassen sich theoretisch gegeneinander verschieben, indem die Ebenen aufeinander abgleiten. Die realen Kristalle sind jedoch nie völlig fehlerfrei aufgebaut, so daß das mechanische und physikalische Verhalten von Zahl und Art der Gitterfehler oder den eingelagerten Fremdatomen abhängt. Da es zum Wandern von Gitterfehlern wie Leerstellen oder den Versetzungen kommen kann, genügen relativ geringere Kräfte, um plastische Verformungen hervorzurufen. An Hindernissen wie den Korngrenzen kommt dieses Abgleiten zum Stillstand, bis sich unter dem Einfluß der aufgebrachtten Spannungen neue Konfigurationen bilden; das Material kann sich also in Abhängigkeit von Verformungen verfestigen. Da ein metallischer Körper in der Regel aus einer Vielzahl von Kristalliten aufgebaut ist, wird er sich erst dann plastisch verformen, sobald auch in den Kristalliten ausreichende Spannungen erreicht werden, die demjenigen am Ort der Krafteinleitung benachbart sind. Die dazu notwendige Spannung wird als Streckgrenze bezeichnet, an der der

¹ Siehe auch [125], [126].

elastische Bereich bzw. die sogenannte Hooksche Gerade in den plastischen Bereich übergeht. Sie ist jedoch nicht immer scharf ausgeprägt. Die Eigenschaft der Metalle, sich im festen Zustand über das elastische Verhalten hinaus verformen zu lassen, hebt sie von anderen Werkstoffen ab.

In der Regel werden Metalle als Legierungen, Mischungen verschiedener Metalle, verwendet, wobei sich die Eigenschaften auch durch Zugabe weiterer Stoffe, vor allem Kohlenstoff und Silizium, weiter beeinflussen lassen.

Die verschiedenen Metalle werden üblicherweise in die folgenden Gruppen aufgeteilt:

- ° Die Leichtmetalle,
z. B. Magnesium, Aluminium, Titan, Beryllium.
- ° Die niedrigschmelzenden Schwermetalle,
z. B. Zink, Zinn, Blei, Quecksilber.
- ° Die hochschmelzenden Schwermetalle,
z. B. Eisen, Chrom, Nickel, Kupfer.
- ° Die sehr hoch schmelzenden Schwermetalle,
z. B. Wolfram, Tantal, Molybdän.

3.1.2.1 Bleche

Die Bedeutung des Stahlblechs für den Automobilbau zeigt sich heute in seinem Anteil rund 60 % am Fahrzeuggewicht. Typische Vorteile sind sehr hoher Elastizitätsmodul, Temperaturbeständigkeit und gute plastische Formbarkeit. Typische Nachteile sind hohes spezifisches Gewicht und Korrosionsanfälligkeit. Auch beim Stahl gibt es eine große Variationsbreite der Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften. So kann man die im Fahrzeugbau üblichen Bleche beispielsweise in folgende Kategorien unterteilen [127]:

- Kaltgewalzte Feibleche
 - Höherfeste Feibleche
 - Warmgewalzte Sonderbaustähle
 - Wasservergütete Baustähle
 - Oberflächenveredeltes Feiblech.
- Kaltgewalzte Feibleche

Unter die kaltgewalzten Feibleche fallen die weichen, unlegierten Stähle, die wegen guter Umformeigenschaften aufgrund der geringeren Formfestigkeit überwiegend im Karosseriebau verwendet werden.

Hier kommen jedoch auch die allgemeinen Baustähle zum Einsatz, da sie aufgrund erhöhter Kohlenstoff-, Silizium- oder Mangangehalte höhere Zugfestigkeits- und Streckgrenzenwerte bei entsprechend verminderten Bruchdehnungswerten ergeben.

Die mikrolegierten Sondertiefziehstähle zeichnen sich durch ein sehr günstiges Tiefziehverhalten, Alterungsfreiheit, Nichtauftreten von Fließfiguren, aber auch durch höhere Herstellungskosten aus, so daß sie in der Regel nur für besonders anspruchsvolle Tiefzienteile wie z. B. Ölwannen gewählt werden.

- Höherfeste Feinbleche

Unter die höherfesten Feinbleche fallen die mikrolegierten, höherfesten Ziehgüten, die durch Zulegieren von Niob, Vanadium oder Titan eine Teilchen- und Feinkornhärtung erhalten. Da Verarbeitungs- (insbesondere Kaltumformbarkeit, Schweißbarkeit) und Festigkeitseigenschaften gegenläufig sind, finden sie hauptsächlich zur Wanddickenverminderung an Rahmen- und Abkantteilen Verwendung.

Kaltfeinbleche mit erhöhten Phosphorgehalten können die Festigkeitseigenschaften der mikrolegierten Ziehgüten erreichen, lassen sich aber leichter verarbeiten, da sie relativ günstige Bruchdehnungswerte und Rückfederungseigenschaften vergleichbar denen der unlegierten Feinbleche aufweisen.

Eine neue Entwicklung stellen die Dual-Phase-Stähle dar, bei denen sich ein Zweiphasengefüge aus Ferrit mit 20 % eingelagertem Martensit bildet. Die besonderen Vorzüge liegen in der starken Kaltverfestigung und Steifigkeit schon bei kleinen Verformungsgraden. Bei niedrigen Ausgangswerten der Streckgrenzen, damit günstigem Verhalten beim Tiefziehen, sind Teile hoher Festigkeit und Steifigkeit herstellbar. Eine weitere Verfestigung kann sich durch Temperatureinwirkung z. B. in der Lackierstraße einstellen.

- Warmgewalzte Sonderbaustähle, wasservergütete Baustähle

Perlitarme warmgewalzte Sonderbaustähle und wasservergütete Baustähle finden weniger im Pkw- als im Nutzfahrzeugbau Verwendung und sollen daher hier nicht weiter beschrieben werden.

- Oberflächenveredeltes Feinblech

Bei den oberflächenveredelten, kaltgewalzten Feinblechen ist zunächst das feuerverzinkte Feinblech zu nennen. Der Forderung nach erhöhtem Korrosionswiderstand bei weiterhin guten Verarbeitungseigenschaften kann hiermit befriedigend entsprochen werden. Während sich die Umformbarkeit wie bei unbeschichteten Blechen verhält, sind Punktschweißbarkeit und Lackiereigenschaften etwas ungünstiger. Überdies sind Absauganlagen für die giftigen Zinkdämpfe vorzusehen.

Bei den elektrolytisch verzinkten Feinblechen lassen sich geringere Schichtdicken der Zinkauflage erreichen. Dieses Material wird daher vornehmlich im Innenbereich verwendet.

Feueraluminiertes Feinblech besitzt eine besonders gute Korrosionsbeständigkeit bei erhöhter Temperatur und gegen aggressive Medien. Es eignet sich daher beispielsweise besonders für Abgasanlagen.

Verbleites Feinblech wird aus weichem, unlegierten Stahl hergestellt, indem dieser durch eine flüssige Bleilegierung geführt wird. Die Schmierwirkung des Bleiüberzuges verbessert die Umformeigenschaften, wobei auch bei extremen Verformungen kein Abplatzen des Überzuges auftritt. Es läßt sich schweißen, jedoch müssen Dämpfe abgesaugt und Elektroden häufig gereinigt werden. Für Anwendungen wie Kraftstoffbehälter und -leitungen hat sich Hart- und Weichlöten bewährt, da der Korrosionsschutz voll erhalten bleibt.

Zincrometal oder Inmozinc sind schweißbare, zinkstaubhaltige, mehrschichtige Grundierungen, die vornehmlich im Bereich der Bodengruppe und unzugänglichen Hohlprofilen eingesetzt werden. Die einseitige Beschichtung auf der Außenseite erlaubt eine Lackierung ohne zusätzliche Maßnahmen.

3.1.2.2 Gußwerkstoffe

Die zweite Gruppe der Stahl- und Eisenwerkstoffe stellen die Gußwerkstoffe dar. Für den Fahrzeugbau sind zu nennen:

- Eisenguß
- Stahlguß
- Temperguß

Die Eisen-Kohlenstoff-Gußwerkstoffe unterscheiden sich im wesentlichen durch Menge und Ausscheidungsform des Legierungselementes Kohlenstoff. Hoher Kohlenstoffgehalt ergibt gute Gießeigenschaften, durch Ausscheidungen in Lamellenform jedoch geringe Duktilität. Bei geringem Kohlenstoffgehalt wie bei Stahlguß kehrt sich dieses Eigenschaftsbild um. Zwischen diesen Extremen liegen Sorten wie der Kugelgraphitguß, bei denen hoher C-Gehalt die Vergießbarkeit fördert, nach der Erstarrung das Graphit jedoch in kugelförmiger Form vorliegt und höhere Duktilität bewirkt. Der Temperguß unterscheidet sich hiervon durch die Art der Wärmebehandlung.

- Gußeisen mit Lamellengraphit

Den größten Mengenanteil im Fahrzeugbau nimmt Gußeisen mit Lamellengraphit ein. Es zeichnet sich neben der Preisgünstigkeit durch ausgewogene Gebrauchseigenschaften wie Verschleißwiderstand, Bearbeitbarkeit oder Temperaturwechselbeständigkeit aus.

- Gußeisen mit Kugelgraphit

Gußeisen mit Kugelgraphit dagegen findet wegen der höheren Festigkeit und Zähigkeit bei ebenfalls guter Bearbeitbarkeit zunehmend Verwendung, z. B. für Bremsbacken, Nockenwellen, Auspuffkrümmer.

Schmelztechnische Schwerpunkte bei der Weiterentwicklung des Gußeisens für Motoren- und Fahrzeugteile sind¹:

Erhöhung der Festigkeitseigenschaften, Verbesserung der Zerspanbarkeit durch Verminderung von Gefügeunterschieden, Verminderung von Eigenspannungen und verdeckten Gußfehlern, Verbesserung der Dichtigkeit, der Wärmeleitfähigkeit und des Korrosionsverhaltens. Gewichtseinsparungen sind jedoch nicht nur durch Modifikationen am Material, sondern ebenfalls durch verbesserte Maßhaltigkeit der Formen zu erreichen. Durch Einführung von Hochdruckpreßformmaschinen konnten an Zylinderblöcken Einsparungen von 10 % erzielt werden.

¹ Siehe auch [128], [129].

3.1.3 Aluminium

Dieses Leichtmetall wird überwiegend aus dem Bauxit, einem Mineral aus Al_2O_3 , Fe_2O_3 , H_2O , SiO_2 u. a., gewonnen, wobei der Gewinnungsprozeß relativ viel elektrische Energie erfordert. Es wird fast ausschließlich in Form von Legierungen verwendet, welche sich in die folgenden 4 Gruppen einteilen lassen ([2], [130], [131], [132]):

- Nicht aushärtbare Knetlegierungen

Sie sind vom Typ AlMn, AlMg und AlMgMn. Die Typen AlMg und AlMgMn sind ab Mg-Gehalten von ca. 2,5 % gut schweißbar. Hohe Festigkeiten werden mit steigendem Gehalt an Legierungselementen und Kaltumformgrad erzielt. Kennzeichnend ist die gute Korrosionsbeständigkeit.

- Nicht aushärtbare Gußlegierungen

Sie sind vom Typ AlSi und AlMg und finden vorwiegend Verwendung im Sand- oder Kokillenguß bei guten Fließeigenschaften. Die in DIN 1725 genormten Umschmelzlegierungen G-, GK-, GD-AlSi8Cu3 und -AlSi6Cu4 können dieser Gruppe zugerechnet werden, da Aushärtungsvorgänge nur zu einer geringen Steigerung der Festigkeit gegenüber dem Zustand unmittelbar nach dem Gießen führen.

- Aushärtbare Knetlegierungen

Sie sind vom Typ AlCuMg, AlZnMgCu, AlZnMg und AlMgSi. Während die erstgenannten beiden Typen vorrangig in Luft- und Raumfahrt verwendet werden, haben die beiden letzteren, vor allem AlMgSi, weite Verbreitung im Fahrzeugbau gefunden. Kennzeichnend für den Typ AlMgSi ist die hohe Korrosionsbeständigkeit, gute Strangpreßbarkeit und Schweißbarkeit. In den USA werden auch Stoßfänger aus AlZnMgCu und Karosserieteile aus AlCuMg hergestellt.

Aushärtbare Knetlegierungen weisen die höchsten Festigkeitswerte auf. Die Ausbildung des Gefüges kann durch Temperatursteuerung beeinflußt werden; es kann zum Effekt der Altershärtung kommen.

- **Aushärtbare Gußlegierungen**

Sie sind vom Typ AlSiMg und AlCuTi bzw. AlCuTiMg. Es kommt zur Bildung intermetallischer Phasen; dadurch verbessertes Verschleiß- und Gleitverhalten und erhöhte Härte. Für den Fahrzeugbau hat der Typ AlSiMg die größte Bedeutung; er wird z. B. für Zylinderköpfe oder Sicherheitsteile im Fahrwerk verwendet.

Der Werkstoff Aluminium weist mit seiner hohen gesicherten Verfügbarkeit ein wegen breiter Streuung der Bauxit-Vorkommen geringes Importrisiko auf; mit einer Verknappung ist nicht zu rechnen. Die Preisentwicklung verlief bis 1980 stetig unterhalb der Inflationsrate, tendiert jetzt aber wegen der engen Koppelung mit den Energiepreisen weiter nach oben [130].

Bauteile aus Aluminium können mit dem halben Gewicht vergleichbarer Stahlteile auskommen und sind häufig auch leichter als Teile aus den üblichen Kunststoffen. Für die Verwendung im Kraftfahrzeug müssen Bleche vor Korrosion geschützt werden; bei Gußteilen kann eine ausreichende Lebensdauer durch die richtige Wahl der Legierung sichergestellt werden. Neben dem geringen Gewicht zeichnen gute thermische und elektrische Leitfähigkeiten dieses Material aus. Die Wärmeleitzahl z. B. ist dreimal höher als die von Eisen. Die Schmelztemperatur liegt mit 658°C bei weniger als der Hälfte der von Eisen, wodurch es gut gießbar ist. Aluminiumschrott erfordert bei der Wiederaufbereitung deutlich weniger Energie als Primärmaterial; dieses Metall ist aber sehr legierungsempfindlich und eignet sich in der Regel nicht zur Wiedergewinnung von Knetlegierungen.

3.1.4 Keramik, Glas

- Keramik

Die Grundsubstanzen für Keramik-Werkstoffe, Tonerde und Sand, sind in großen Mengen auf der Erde vorhanden. Hauptsächlich werden chemische Verbindungen der Elemente Sauerstoff, Stickstoff oder Kohlenstoff mit Metallen, d. h. Oxyde, Nitride oder Carbide zu Keramik verarbeitet. Pulver oder entsprechende Mischungen aus diesen Stoffen werden bei ca. 1500 °C gebrannt und ergeben Teile, deren wichtigste Eigenschaften sind:

- gute Festigkeit bei hohen Temperaturen,
- hart und spröde,
- schlechte Wärmeleitung,
- geringe Wärmeausdehnung,
- relativ leicht im Vergleich zu Metallen,
- verschleißfest.

Die geringe Zähigkeit ist der Hauptnachteil der Keramik. Während Metalle Spannungsspitzen bei schlagartigen Belastungen oder hohen Flächenpressungen durch örtliche Verformungen abbauen, werden keramische Bauteile zerstört. Die Festigkeiten liegen bei normalen Temperaturen weit unter denen von Stahl, bei hohen Temperaturen verliert dieser jedoch sehr stark und fällt dann unter die Werte der Keramikwerkstoffe. Hier ergeben sich Vorteile, da an verschiedenen Bauteilen wie z. B. Turbinenlaufrädern teure Metall-Legierungen ersetzt werden können. Weitere typische Einsatzgebiete wären Brennkammern, Kolbenmulden, Abgaskanäle oder Turbolader.¹

Typische keramische Werkstoffe sind nach [134] Siliziumnitrid und -karbid, Zirkonoxid, Aluminiumtitanat.

¹ Siehe auch [133].

- Glas

Technisches Glas besteht meist aus Natron-Kalk-Silikat-Schmelzen im amorphen, unterkühlten Zustand. Glas hat keine kristalline Struktur und geht ohne festen Schmelzpunkt in einen zähflüssigen Zustand über. Die Gebrauchstemperatur liegt unterhalb der Erweichungstemperatur von ca. 500 °C. Die Druckfestigkeit (400 bis 1200 N/mm²) ist wesentlich höher als die Zugfestigkeit (30 bis 90 N/mm²). Spannungsfreies Glas kann man spanend bearbeiten. Es ist empfindlich gegen Stoß und schroffe Temperaturänderungen, beständig gegen Säuren, weniger beständig gegen Laugen.¹

Flachglas wird in Europa heute nach praktisch dem gleichen Gemengesatz hergestellt. Der Elastizitätsmodul liegt bei 75000 N/mm², die Wärmeausdehnung bei 87×10^{-7} mm/mm °C. Bei der Verarbeitung zu Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG, durch Wärmebehandlung vorgespanntes Glas) ändert sich der E-Modul um ca. 1 - 2 % nach unten. Beim Verbund-Sicherheitsglas (VSG, Verbund aus äußeren Glasscheiben mit Kunststoffzwischenlage) liegt der E-Modul bei ca. 85 % gegenüber einer festen, nicht verklebten Platte. Je nach der Dicke der Klebeschicht aus PVB zwischen den beiden Platten, ein typischer Wert ist 0,76 mm, und dem Feuchtigkeitsgehalt dieser Folie tritt ein Gleiteffekt ein, der bei kleineren Schichtdicken geringer wird.²

Beim ESG werden durch Abschrecken der heißen Glasplatte in ihrer endgültigen Gestalt, z. B. mit Luft, in der Oberfläche Druckeigenstressungen erzeugt, so daß die Biegefestigkeit etwa den drei- bis achtfachen Wert normaler Gläser erreicht. Auch Temperaturwechselfestigkeit und Schlagfestigkeit werden deutlich gesteigert. Beim Bruch zerfällt ESG in kleine Krümel ohne scharfe Kanten.¹

¹ Nach [135].

² Nach [1].

3.2 MATERIALANWENDUNGEN NACH PKW-BAUGRUPPEN

3.2.1 Tragende Strukturen

- Kunststoff

Nach zahlreichen Versuchen in den vergangenen Jahrzehnten, komplette Karosserien aus Kunststoff oder Aluminium herzustellen, wird heute differenzierter vorgegangen. Geringere Dauerfestigkeit, Steifigkeit und Energieaufnahme von Kunststoffen sprechen gegen den Einsatz an hochbeanspruchten Teilen der PKW-Karosserie (z. B. [136], [137]). Eine wesentliche Gewichtersparnis an hochbelasteten Teilen ist oft nur mit teuren, hochfesten Faserverbundwerkstoffen zu erreichen, wobei die Mehrkosten gegenüber Stahlblech auf absehbare Zeit auch durch Bauteilintegrationen oder vereinfachten Korrosionsschutz nicht ausgeglichen werden können (siehe auch [37], [138], [139], [140], [141], [142] sowie Kapitel 4.2, Dimensionierung).

Die oft zitierte Korrosionsbeständigkeit der Kunststoffe bedeutet nicht, daß diese eine praktisch unbegrenzte Lebensdauer haben. Es können Probleme wie z. B. das der Alterung auftreten, welche u. a. zu einem Abfall der Schlagzähigkeit führt. Ebenso schränkt die Empfindlichkeit vieler Kunststoffe gegen UV-Strahlung und Dauerfeuchte den Einsatz für witterungsbeanspruchte Teile ein. Eine Oberflächenbeschichtung, die im Idealfall nicht notwendig sein sollte, kann daher für den Einsatz am Kraftfahrzeug unerlässlich werden. Fertigungstechnisch kann dies unter Umständen aufwendiger werden als Korrosionsschutzmaßnahmen an Metallteilen. Auch eine ungeeignete Lackierung kann zur Verringerung der Schlagzähigkeit führen. Mechanische Belastungen über längere Zeiträume können auch bei geringeren Beanspruchungen zum Problem werden, da einige Kunststoffe u. a. zum Kriechen oder zum Abbau durch mechanische Belastung neigen, wodurch Spannungsrisse auftreten können. Wasseraufnahme durch den Kunststoff verringert Zugfestig-

keit und E-Modul; als Anhaltswert wird z. B. 25 % im Laufe von 20 Jahren genannt für GF-UP [143], ca. 20 % für PA-GM 30 im Vergleich trocken zu luftfeucht [144]. Unter Umständen muß auch ein biologischer Abbau beachtet werden. Bild 17 zeigt einen Vergleich der Zugfestigkeiten verschiedener Werkstoffe.¹

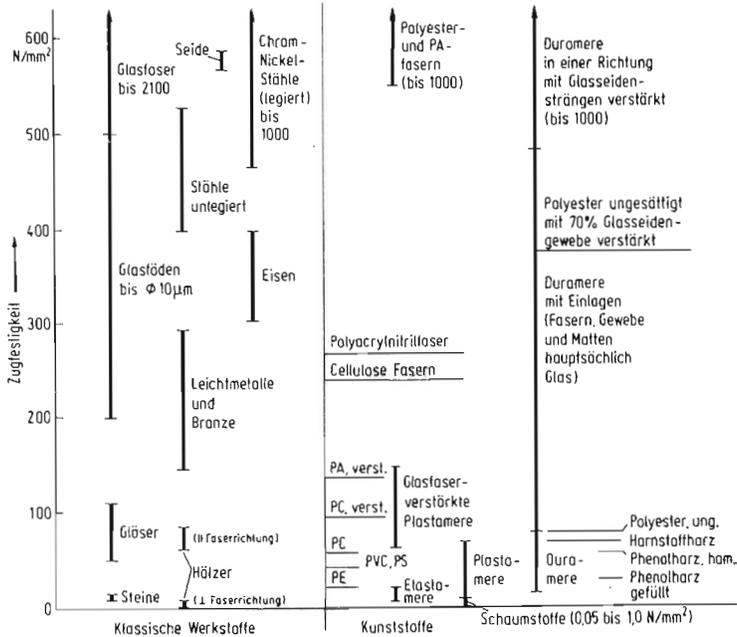


Bild 17: Vergleich der Zugfestigkeitsbereiche wichtiger Werkstoffgruppen [108].

Die Auswahl der Verstärkungs- bzw. Füllstoffe kann diese Probleme allerdings mindern. Ausreichende Steifigkeit, Festigkeit und Energieaufnahme sind mit Kunststoffkonstruktionen sicherlich auch zu erreichen, doch existieren

¹ Siehe auch [38], [108], [113], [144], [145].

bislang kaum wirtschaftliche Fertigungsverfahren, um z. B. ganze Bodengruppen oder Tragskelette in Großserie herzustellen. Dies wäre jedoch eine Bedingung, um mit den ausgereiften Verfahren in der Blechverarbeitung konkurrieren zu können, wenn, wie schon zuvor gesagt, Materialkosten, Fertigungskosten, Gewichtersparnis oder Lebensdauer keine gravierenden Vorteile bringen. Bild 18 zeigt als Beispiel für die Integration von Kunststoffen in tragende Bereiche die Faserverbundwerkstoff-Bodengruppe des Forschungs-Pkws von Audi. Sie besteht aus innerem Schweller und Schließteil und ist umlaufend mit der Struktur verklebt, im Bereich Rückwand, Tunnel und Schweller zusätzlich durch Umhörkeln der Strukturteile befestigt. Die Hauptlasten werden zwar nach wie vor durch den Stahlrahmen aufgefangen, die Sandwichflächen sollen durch ihre Schubsteifigkeit aber auch zur Stabilität beitragen.

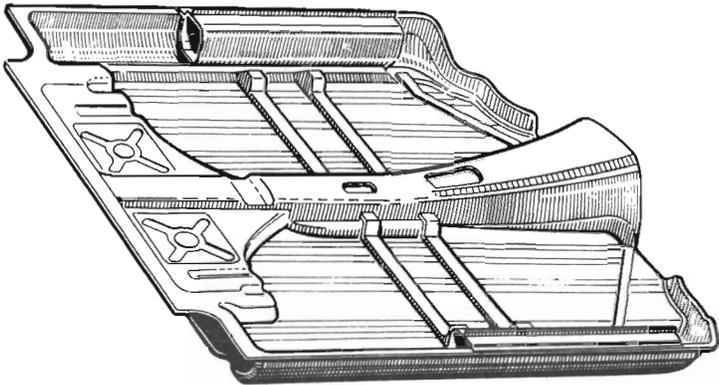


Bild 18: GFK-Bodengruppe des Audi-Forschungs-Pkw [20].

Ein an Bedeutung gewinnendes Problem bei der Einführung von Kunststoffkarosserien ist das Recycling. Stahl oder auch Aluminium lassen sich nahezu vollständig wiederaufbereiten; bei Stahl meist ohne Qualitätseinbuße für die

Werkstoffeigenschaften, bei Aluminium dagegen mit der "Einbahnstraße" Knet- zu Gußlegierungen. Bei steigenden Mengen von Kunststoffen in Altfahrzeugen müssen in Zukunft ebenso sinnvoll recyclingfähige Kunststoffe bzw. wirtschaftlichere Verfahren dazu geschaffen werden.¹

- Aluminium

Unter den Leichtmetallen kommt dem Aluminium und seinen Legierungen die mit Abstand größte Bedeutung zu. Magnesiumlegierungen haben beispielsweise eine ungünstige Korrosionsbeständigkeit und, was noch mehr für Titanlegierungen gilt, zu hohe Materialkosten für einen wirtschaftlichen Einsatz.²

Selbsttragende Karosserien aus Aluminium sind seit Jahren bekannt, siehe Bild 19. Elastizitätsmodul und spezifisches Gewicht erlauben deutliche Gewichtseinsparungen bei gleicher Steifigkeit gegenüber Stahl ohne Einbuße bei der Energieaufnahmefähigkeit. Aufgrund der ungünstigen dynamischen Festigkeitseigenschaften sind an kritischen Stellen Verstärkungen notwendig, die über den rein rechnerischen Ausgleich des E-Moduls gegenüber Stahl hinausgehen. Die im Prinzip gleiche Verarbeitung und Flügertechnik wie von Stahl sprechen für die Großserienfähigkeit; dagegen sprechen hauptsächlich die Materialkosten.³

Die große Sauerstoffaffinität des Aluminiums sorgt für die schützende Oxydschicht an der Oberfläche, bedingt jedoch wegen des aufwendigeren Herstellungsprozesses mit hohem Energiebedarf sehr hohe Materialkosten. Die Fertigung von Blechkonstruktionen ist ebenfalls aufwendiger und teurer, obwohl das in der Stahlblechverarbeitung ausgereifte Punktschweißverfahren in angepaßter Form übernommen werden kann. Probleme bringen der dreifach höhere Strombedarf und

¹ Siehe auch [130], [146].

² Nach [1]; siehe auch [147].

³ Nach [1]; siehe auch [114].

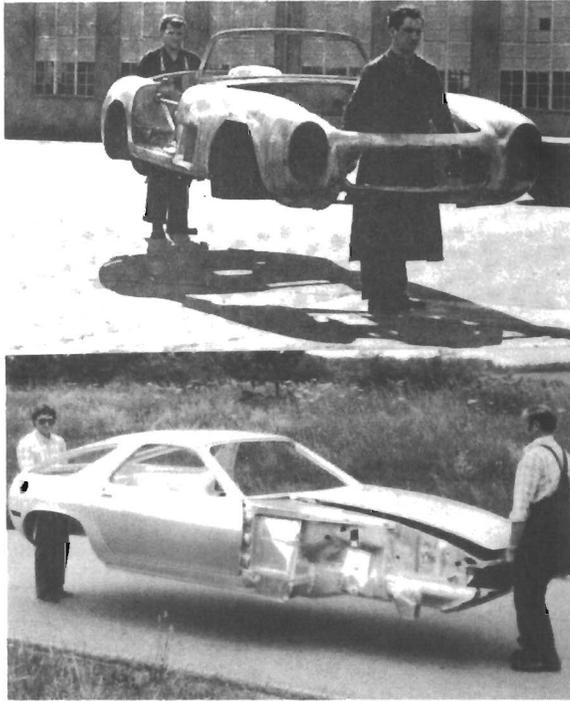


Bild 19: Selbsttragende Karosserien aus Aluminium beim Mercedes 300 SL aus den 50er Jahren und einer Studie des Porsche 928 von 1981 [148], [149].

die geringeren, z. T. bei einem Zehntel liegenden Elektrodenstandzeiten, die schlecht leitenden, je nach Alter bzw. Anlieferungstand der Bleche unterschiedlich starken Oxidschichten und die geringere Festigkeit der Schweißpunkte, die nur etwa 40 % der Festigkeit von Stahlschweißpunkten erreicht. Die Flanschbreiten müssen größer gewählt werden, um den größeren Elektrodendurchmesser und das verstärkte Ausweichen von plastischem Randzonenmaterial zu kompensieren. Einige Legierungen sind anfällig für Rißbildungen in

der Umgebung der Schweißpunkte. Andere Schweißverfahren wie z. B. Elektronenstrahl- und Laserschweißungen oder Kombinationen mit Löt- oder Klebetechniken befinden sich in der Entwicklung ([1], [150]).

Beachtet werden muß auch der gegenüber Stahlblech doppelt so hohe Ausdehnungskoeffizient, wodurch Fugenbreiten und Verzug in der Lackieranlage zu Problemen führen können. Hier kann es zu einer Wärmeaushärtung kommen, die allerdings auch positiv ausgenutzt werden kann. Verklebungen von Aluminiumblechen mit Stahl führen ohne ausreichende Elastizität des Klebers zur Beulung des Aluminiumteils bei Wärmeeinwirkung. Grundsätzlich müssen beim Einsatz von Aluminium wesentlich höhere Bauteiltoleranzen in Kauf genommen werden, die auch durch die ohnehin schon aufwendigen Umformtechniken kaum zu verhindern sind. Zu Problemen können auch schon kleinste Qualitätsschwankungen in den Chargen des Material- bzw. Halbzeuglieferanten führen. Bei tiefen Temperaturen dagegen zeigt Aluminium aufgrund seiner Kristallgitterstruktur ein günstiges Verhalten; es tritt keine Versprödung ein.¹

Entgegen weit verbreiteter Meinung neigen die heutigen Aluminiumbleche für die Karosserie durchaus zur Korrosion, einige umformtechnisch günstige Legierungen wie z. B. die AlMgSi-Typen zur interkristallinen Korrosion und Mischbauweisen leicht zu Kontaktkorrosion.¹

Der geringere E-Modul des Aluminiums von 70 kN/mm^2 gegenüber 210 kN/mm^2 bedeutet, daß ein Aluminiumbauteil mit größerer Blechdicke ausgeführt werden muß, wobei man je nach Legierung und Gestaltung mit der 1,2- bis 1,5-fachen Dicke des vergleichbaren Stahlteils rechnen muß. Andererseits empfiehlt sich dadurch Aluminium dort, wo Stahlbleche aus fertigungstechnischen Gründen nicht so dünn gemacht werden können, wie es ihre Steifigkeit theo-

¹ Siehe auch [151], [152].

retisch erlauben würde. Die gegenüber Stahl möglichen Bauteil-Gewichtsreduzierungen von bis zu 50 % machen Aluminium hinsichtlich der zukünftigen Anforderungen an den Kraftstoffverbrauch attraktiv. Es sind jedoch noch erhebliche Entwicklungsarbeiten erforderlich, um den Materialpreis und die Fertigungskosten zu senken. Türen und Klappen z. B. aus Aluminium werden sich im Verhältnis zum Stahl kaum verbilligen, da der höhere Energieaufwand der Rohstoffgewinnung sich, vielleicht im Gegensatz zum Fertigungsaufwand, im Zuge steigender Energiepreise eher noch negativer als bisher auswirken dürfte, während sich der Fertigungsaufwand auch mit neuen Legierungen bestenfalls angleichen kann.¹

- Stahl

Wegen der zunehmenden Bedeutung des Leichtbaus mit Hilfe von Kunststoffen und Leichtmetallen werden seitens der Stahlindustrie Anstrengungen unternommen, verschiedenen Anforderungen besser zu genügen. Hochfeste niedriglegierte Stähle lassen insbesondere an hochbelasteten, bislang in großen Wanddicken ausgeführten Bereichen Gewichtseinsparungen erwarten; sie sind z. T. schon Stand der Technik. Eine andere Variante sind Dual-Phase-Stähle, deren Festigkeit beim Umformvorgang steigt, oder Stähle niedriger Festigkeit, aber besserer Tiefziehfähigkeit, für kompliziertere Formen. In der Entwicklung befinden sich z. B. auch beim Verzinken aufhärtende Legierungen. Diese würden Verfahren ermöglichen, bei denen die Preßteile gefertigt, zusammengefügt und dann erst die für diese Schritte eher nachteilige höhere Festigkeit und die Korrosionsschutzschicht erzeugt werden, indem die Karosserie (zumindest teilweise) in ein Zinkbad getaucht wird. Dies geschieht, wie in Bild 20 gezeigt, z. B. beim Renault Espace.²

¹ Nach [1]; siehe auch [147], [153].

² Siehe auch [1], [147], [154], [155], [156], [157].

Stähle höherer Festigkeit eignen sich besonders für die inneren, tragenden Karosseriestrukturen, da bei Außenblechen in Hinblick auf Beulsteifigkeit und Korrosionsanfälligkeit ohnehin schon minimale Blechdicken verwendet werden und hochfeste, aber dünnere Bleche kaum Vorteile bringen. Wo tatsächlich mit den Materialdicken heruntergegangen werden kann, könnten Gewichtsreduzierungen von 25 bis zu 40 % (bei überwiegender Zug-Druck-Beanspruchung) und über den Materialpreis auch geringe Kostenersparnisse erreicht werden (grobe Anhaltswerte: konventioneller Stahl 1 DM/kg, HSLA 10 - 20 % teurer). Die schlechten umformtechnischen Eigenschaften schränken jedoch die Einsatzmöglichkeiten ein und regen die Entwicklung weiterer Stahlsorten mit Eigenschaften zwischen konventionellen und hochfesten Qualitäten an. Hauptprobleme dabei sind meist Kosten und Verfügbarkeit der neuen Stahlsorten [1].



Bild 20: Korrosionsschutz und Materialverfestigung durch Tauchen der Rohkarosserie in Zink (Renault Espace, [154]).

Da alle üblichen Stahlqualitäten keine ausreichende Korrosionsbeständigkeit haben, sind wegen der in letzter Zeit steigenden Anforderungen an die Lebensdauer unterschiedliche Schutzsysteme in Entwicklung. Die rostfreien Sorten sind wegen der fünfmal so hohen Preise unwirtschaftlich. Feuerverzinkte Bleche sind hier aussichtsreicher, stellen aber höhere Anforderungen an die Lackiersysteme. Mit Zinkstaubdispersionen beschichtete Bleche wie u. a. Zincrometal erfordern besondere Maßnahmen beim Umformen, um eine Beschädigung der Deckschicht im Werkzeug zu vermeiden, erleichtern aber die Lackierung. Beschichtete Feibleche stellen erhöhte Anforderungen an die verwendeten Schweißverfahren, wobei Elektrodenstandzeiten und Beeinträchtigungen der Oberflächenveredlung beachtet werden müssen.¹

¹ Siehe auch [1], [114], [147].

3.2.2 Karosserie

3.2.2.1 Außenhaut

Im Bereich der Außenhaut der PKW-Karosserie erscheint die Einführung alternativer Werkstoffe aussichtsreicher als bei den tragenden Strukturen. Abgesehen von Anbauteilen wie Hauben, Deckeln, Türen, Kotflügeln oder Stoßfängern kommen hier auch geringer belastete Teile wie Dächer, Front- und Heckschürzen usw. in Frage. Generell sind die meisten Karosseriebauteile weniger festigkeits- als vielmehr steifigkeitskritisch zu betrachten. Eine ausreichende Steifigkeit läßt sich z. B. durch Aluminiumeinsatz bei Gewichtsminderungen von bis zu 50 % erreichen.

Bei Ansprüchen an Steifigkeit und Formbeständigkeit in der Qualität von Stahl ist mit Kunststoffteilen zwar nur eine geringe Gewichtsersparnis zu erzielen, für Außenteile mit überwiegender Verkleidungsfunktion oder festigkeitskritischer Auslegung ist dieses Material dagegen vorteilhaft einsetzbar. Größere Einsparungen sind bei Verwendung handelsüblicher Kunststoffe in der Regel über weitgehende Bauteilintegrationen möglich, wodurch sich meist auch Kosteneinsparungen in der Fertigung ergeben.

Werden Maßnahmen zum Ionenausgleich im Phosphatbad der Lackierstraßen getroffen, lassen sich Stahl- und Aluminiumteile gemeinsam behandeln, wobei serienmäßig ein Standard erreichbar ist, bei dem kein Unterschied der lackierten Flächen mehr zu erkennen ist. Kunststoffteile sind hier wegen der für die heutigen Lackierstraßentemperaturen meist nicht ausreichenden Wärmeformbeständigkeit und der Notwendigkeit unterschiedlicher, genau abgestimmter Grundierungen im Nachteil.¹

¹ Siehe auch [1], [147].

- Kunststoff

Die wichtigsten Gründe für den Einsatz von Kunststoffen für Karosserieteile sind Gewichtseinsparung, rationellere Fertigung durch Integration mehrerer Bauteile und Vermeidung von Korrosion. Die erzielbaren Gewichtseinsparungen sind jedoch begrenzt, da wegen des niedrigen E-Moduls mit geringerer Steifigkeit der Bauteile gerechnet werden muß. So wird für ein Fahrzeug z. B. in der Größe des VW Golf geschätzt, daß die erreichbaren Gewichtsreduzierungen bei 20 kg liegen [52]. Großformatige Teile, die in weiten Temperaturbereichen formstabil sein sollen, werden üblicherweise mit Glasfasern verstärkt, sei es in Form von SMC oder RRIM, und sind unter Umständen sogar schwerer als ein Stahlblechteil. Da auch höhere Materialkosten und nicht immer befriedigende Eigenschaften der Oberfläche und/oder Lackierung die Verwendungsmöglichkeiten einschränken können, ist die Materialsubstitution nur dann wirtschaftlich interessant, wenn der Einsatz eines Multifunktionsteils möglich wird. Neue Entwicklungen zielen meist auf kürzere Taktzeiten und bessere Oberflächen. Bei Karosserieteilen, die zur Energieaufnahme dienen, müssen bei der Substitution durch Kunststoff unter Umständen zusätzliche Verstärkungen vorgesehen werden, die die Gewichtersparnis wieder aufheben können.¹

Bild 21 zeigt den Gewichtsvergleich einiger Serienfahrzeuge mit Stahl- oder Kunststoffkarosserien. Bei den aufgeführten Fahrzeugen mit überwiegend aus Kunststoff gefertigter Außenhaut ist allerdings eine Gewichtersparnis gegenüber gleich großen Serienprodukten konventioneller Machart mit selbsttragender Stahlkarosserie nicht zu erkennen. Es ist anzunehmen, daß die notwendige Aufbausteifigkeit aus einem entsprechend schweren Stahlgerippe geholt wird, während der Kunststoff als äußere Verkleidung nur an wenigen Stellen Stahlteile voll ersetzt.

¹ Siehe auch [1], [38], [158], [159], [160], [161].

Marke, Typ	Werkstoff	Länge	Gewicht
TVR Tasmin	Kunstst.	4,013 m	1050 kg
Pontiac Fiero	Kunstst.	4,072 m	1117 kg
Matra Murena	Kunstst.	4,070 m	1050 kg
Alpine A 310 V 6	Kunstst.	4,250 m	1040 kg
VW Scirocco	Stahl	4,050 m	855 kg
Renault 9	Stahl	4,063 m	854 kg
Triumph Acclaim	Stahl	4,090 m	809 kg
Opel Manta	Stahl	4,443 m	1040 kg
Ford Capri S	Stahl	4,376 m	1030 kg
BMW 320	Stahl	4,326 m	1050 kg
Audi Coupé	Stahl	4,349 m	1032 kg
Chevrolet Corvette	Kunstst.	4,483 m	1413 kg
Chevrolet Camaro	Stahl	4,771 m	1414 kg

Bild 21: Vergleich von Personenwagen mit Stahl- und Kunststoffkarosserie (Zahlen nach [162]).

Die Karosserien der in Bild 21 angeführten Fahrzeuge bestehen überwiegend aus glasfaserverstärktem Polyester bei den größeren Elementen und Polyurethan bei Stoßfängern. Der in Bild 22 auf der nächsten Seite abgebildete Pontiac Fiero ist der modernste Vertreter dieser Fahrzeuge in Mischbauweise.

Für den Einsatz als großflächige Außenteile sind seit einiger Zeit Thermoplaste in der Entwicklung, die verbesserte Benzinbeständigkeit und Kälteschlagzähigkeit aufweisen. Es handelt sich dabei hauptsächlich um modifizierte Produkte auf PA-6-, EPDM-, PBTP- und PC-Basis, die sich in automatisierten Spritzgießverfahren wirtschaftlich verarbeiten lassen sollen. Auf Grund des günstigen Granulatpreises dürfte sich auch ABS weiter durchsetzen, da dessen Lackierbarkeit und Formbeständigkeit für

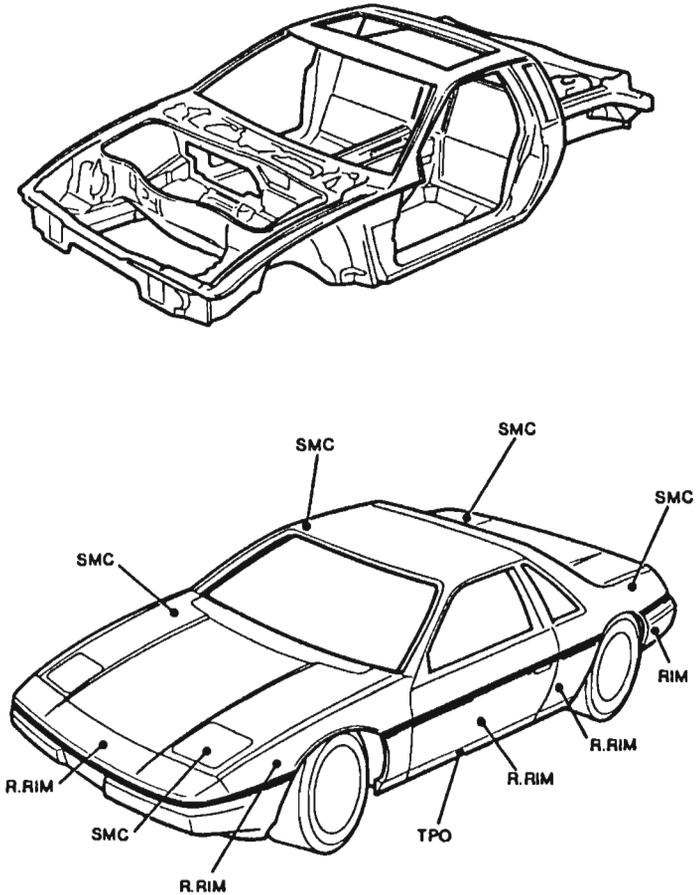


Bild 22: Die Rahmenbauweise des Pontiac Fiero; oben die tragende Stahlstruktur, unten die äußeren Karosserieteile aus verschiedenen Kunststoffen [52].

Großserienprodukte ausreicht. Beim Kühlergrill eines modernen deutschen Mittelklassewagens konnte durch die Umstellung von GF-PA (15 % Glasfaseranteil) auf ABS eine Halbierung der Materialkosten von ca. 10,- DM auf 5,- DM erreicht werden. (Den Endverbraucher kostet das Teil dann allerdings über 330,- DM, inclusive Lackierung in Wagenfarbe. Das Ersatzteil allein kostet 160,- DM + Mehrwertsteuer. Andere Firmen werden ähnlich kalkulieren.)¹

Zum Vergleich die ungefähren Preise einiger gängiger Rohmaterialien (1983, [1]):

PA 6 (Polyamid, Granulat)	12 DM/kg
PC (Polycarbonat, Granulat)	10 DM/kg
RRIM (Polyurethan, glasfaserverstärkt)	7 DM/kg
SMC (Polyester, glasfaserverstärkt)	5 DM/kg
ABS (Acryl-Butadien-Styrol, Granulat)	5 DM/kg
PP (Polypropylen, Granulat)	4 DM/kg
PVC (Polyvinylchlorid, Granulat)	2 DM/kg

Die weiteren Entwicklungsarbeiten betreffen auch Kotflügel, Türen und Klappen, die im Hinblick auf Konstruktion, Fügetechnik und Lackierung eine intensive Zusammenarbeit von Fahrzeughersteller, Rohstoffproduzent und Verarbeiter erfordern. Derzeit werden schon selbsttragende Stoßfänger und Spoiler hergestellt, die je nach Vorgabe der Fahrzeughersteller eingefärbt oder lackiert werden. Die Auswahl der Füllstoffe ist hierbei von besonderer Bedeutung. So erhöhen Kurzglasfasern die Festigkeit, aber auch die Anisotropie. Pulver- bzw. kugelförmige Einlagerungen sind günstiger, wenn ein besseres Schwindungsverhalten gefordert wird; ein wichtiges Kriterium gerade für Außenteile. Vorbedingungen für die Einführung solcher Teile sind [163]:

- Einfache Flugesysteme für die Verbindung von Metall mit Kunststoffen,
- Möglichkeiten zum Ausgleich verschiedener Wärmedehnungen,

¹ Siehe auch [1], [3], [163], [164].

- Montagemöglichkeiten von Thermoplastteilen nach der Elektrolyse,
- gleiche Decklackierung von Kunststoff und Metall zur Erzielung einer exakten Farbgleichheit.

Für Stoßstangen bzw. -verkleidungen oder Prallflächen usw. hat auch PP gute Aussichten auf breitere Verwendung, da es sich hier um Teile handelt, die bei meist ohnehin genarbter Oberfläche nicht nach höchsten Ansprüchen lackiert werden müssen. Das PP kann hier den Vorteil des Massenkunststoffes mit niedrigem Preis und bei Einfärbung auch geringen Fertigungsaufwandes ausspielen. In der nachfolgenden Gegenüberstellung nach [40] und [165] mit dem anderen derzeit favorisierten Thermoplast für derartige Anwendungen, dem PC, werden Vor- und Nachteile angeführt:

Polypropylen

Preis ca. 4 DM/kg
für Granulat

Gewicht Stoßstange vorn
und hinten ca. 12 kg

Geringerer Werkzeuginnen-
druck (ca. 300 bar),
dadurch leichtere Werkzeuge

Guter Materialfluß im Werk-
zeug, weniger Schnittstellen

Größere Betriebssicherheit

1 min höhere Zykluszeit pro
Teil, höhere Investitionen
für Maschinen und Werkzeuge

Nicht lackierbar

Neigung zum Verzug

Größere Fertigungstoleranzen
sind zu berücksichtigen

Polycarbonat

Preis ca. 8 DM/kg
für Granulat

Gewicht Stoßstange vorn
und hinten ca. 7 kg (2,5 mm)

Hoher Werkzeuginnendruck,
d. h. größere Maschinen
und stabilere Werkzeuge

Mehr Anspritzstellen
und damit Bindenähte nötig

Prozeßkontrolle nötig

Geringere Zykluszeit,
geringere Investitionen

Gute Lackiermöglichkeit
Helle Farben weniger Benzin-
und UV-beständig

Gute Temperaturbeständigkeit

Gutes Crashverhalten

Zu Kosten, Fertigung und Lackierbarkeit lassen sich zwar mitunter abweichende Aussagen finden, im allgemeinen treffen diese Angaben aber auch für andere Karosserieteile zu (siehe auch Bild 148).

- Sandwichteile

Auch für die Verwendung im PKW-Bau interessant ist die Sandwich-Bauweise, da damit torsions- und biegesteife Platten geringen Gewichts geschaffen werden können. Als Material kommen neben den faserverstärkten Kunststoffen (Glas-, Kohle-, Aramidfasern) auch Deckhäute aus Aluminium oder Stahl mit dünnen festen PP- oder PVC-Kernen in Frage. Letztere lassen sich auch als Halbzeug herstellen und vergleichsweise gut formen, ein Hauptvorteil gegenüber den aus dem Flugzeug- und Bootsbau bekannten Konstruktionen mit leichtem Schaum- oder Wabenkern. Abgesehen von den

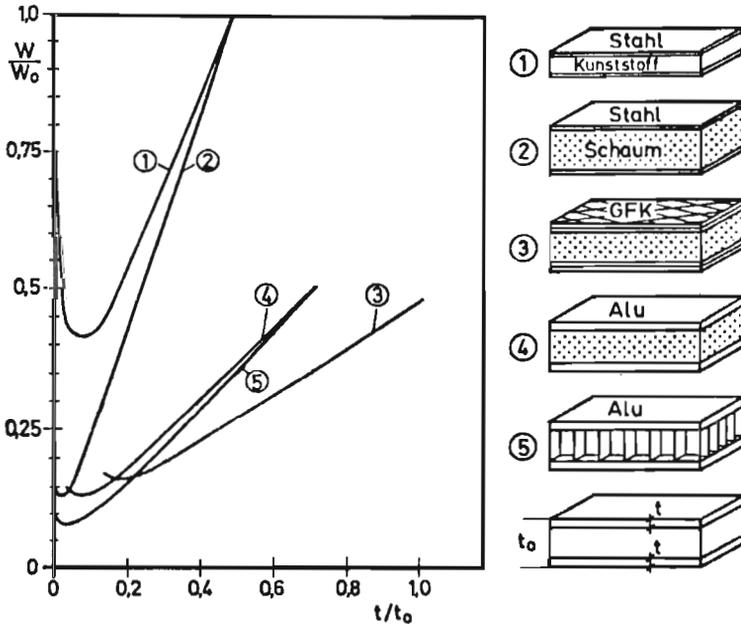


Bild 23: Gewicht von Sandwich-Konstruktionen gleicher Steifigkeit bei variiertem Dimensionierung [1], [166].

bei allen Versionen höheren Kosten gegenüber Stahl und meist auch Aluminium ist häufig die Gewichtersparnis nicht so groß wie theoretisch denkbar, da die Deckschichten aus fertigungstechnischen Gründen (bei Metallen auch wegen des Korrosionswiderstandes) kaum so dünn hergestellt werden können, wie es die Rechnung ergäbe. Bild 23 zeigt z. B., daß ein Stahl/PUR-Schaum/Stahl-Sandwich bei Biegebelastung u. U. leichter ausfallen könnte als bei Verwendung von GFK für die Deckschichten.

Bei stark gekrümmten Teilen verlieren sich einige Vorteile der Sandwichbauweise aus mechanischen Gründen, so daß sich eher Teile wie Motorhauben oder (fensterlose) Klappen für diese Bauweise anbieten. Bei geringer Beanspruchung z. B. durch Temperatur oder Öffnungsmechanismen ergeben sich deutliche Gewichtsvorteile auch gegenüber anderen Kunststoffkonstruktionen. Für weitgehend ebene Platten wie z. B. Kofferraumböden sind auch Sandwichmaterialien aus Metall im Gespräch, die aus sehr dünnen Blechen ähnlich wie Wellpappe aufgebaut und verklebt sind. Auf Durchbiegung und Verwindungssteifigkeit bezogen, ist dieses Sandwich gegenüber entsprechendem Vollmaterial 75 % leichter bei Temperaturbeständigkeiten bis 145° Celsius. Eine gute Schwingungsdämpfung bieten Konstruktionen aus zwei miteinander verklebten Blechen ohne Zwischenlage.¹

Die Fronthaube des auf Seite 21 abgebildeten Audi-Forschungsautos ist z. B. eine Aluminium-Sandwichkonstruktion aus zwei dünnen Al-Schalen und einem Hartschaum-Kern. Sie ist Teil einer den Motor schallisolierenden Kapsel und zusätzlich in denjenigen Bereichen gezielt verformbar, in denen besondere Verletzungsgefahren für Fußgänger im Falle einer Kollision bestehen. Ein Serieneinsatz ist allerdings vorerst nicht zu erwarten.²

¹ Siehe auch [1], [36], [75], [76], [157], [159], [160], [166], [167], [168].

² Siehe auch [2], [20], [36].

- Aluminium

Da die Fertigungstechnik bei der Verwendung von Aluminium als Karosserie-Außenteil kaum Möglichkeiten für Einsparungen gegenüber Stahlblech bietet, ist die Amortisation nur bei Betrachtung der Energieeinsparungen beim Betrieb der Fahrzeuge zu sehen. Wegen des niedrigen spezifischen Gewichts bei relativ hoher Steifigkeit sind Bauteil-Gewichtsreduzierungen bis zu 50 % möglich, wie sie sonst nur noch mit den bislang weit teureren Kohlefaserwerkstoffen erreicht werden können, siehe Bild 24. Es sind jedoch noch erhebliche Entwicklungsanstrengungen auf dem Gebiet der Fertigungssicherheit erforderlich. Herstellungsschwierigkeiten und Materialkosten bleiben aus der Sicht der Fahrzeugfabrikanten mittelfristig Haupthindernis für den Serieneinsatz.¹

Karosserieteil	Werkstoff	Gewicht Aluminium (kg)	Gewicht Stahl (kg)
Türaußenblech Türinnenblech	AlMg0,4Sil,2 AlMg4,5Mn	2 x 9,5	2 x 19
Sicherheitsverstärkung	St52 vergütet Sonderanalyse		2 x 2,0
Verstärkungsbleche	AlMg4,5Mn / AlMg5w *)	2 x 2,0	
Kotflügel Außenhaut Stegblech	AlMg0,4Sil,2 siehe *)	2 x 4,0	2 x 8,0
Motordeckel Außenhaut Innenteil Verstärkung	AlMg0,4Sil,2 AlMg4,5Mn siehe *)	7,6	15,2
Stoßfänger vorn (USA)	AlZnMg1ZrF46	7,6 (11,0)	11,4 (16,5)
Stoßfänger hinten (USA)	AlZnMg1ZrF46	9,3 (14,5)	14,0 (21,7)

Bild 24: Aluminiumkarosserieteile beim Porsche 928 im Vergleich zu einer Stahlausführung [140].

¹ Siehe auch [114], [146], [152], [157], [169], [170].

- Stahl

Für Stahlblech als Außenhautwerkstoff sprechen nach wie vor die niedrigsten Kosten, die ausgereifte Fertigungstechnik, die Oberflächenqualitäten, der Beitrag zur Stabilität und Energieaufnahme, die Verfügbarkeit sowie die bekannten Reparatur- und Recyclingmöglichkeiten. Dagegen sprechen hauptsächlich das hohe Gewicht, insbesondere bei Bauteilen, bei denen die guten Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften nicht ausgenutzt werden, und die Korrosionsempfindlichkeit. Bestrebungen der Stahlerzeuger, hochfeste Bleche zur Wanddicken- und damit Gewichtsreduzierung einzusetzen, stoßen an Grenzen, da die Beulsteifigkeit der dünneren Bleche und die Umformeigenschaften nicht ohne weiteres befriedigen. Die Energieaufnahmemöglichkeiten und der Korrosionswiderstand würden durch geringere Blechdicken ebenfalls negativ beeinflusst.¹

Für den Korrosionsschutz werden bevorzugt bessere Beschichtungs- bzw. Lackiersysteme entwickelt und feuerverzinkte Bleche eingesetzt. Bei letzteren konzentrieren sich die Arbeiten auf optimale Zinkschichtdicken, Probleme der ein- oder beidseitigen Beschichtung für bessere Schweiß- und Oberflächeneigenschaften. Bevorzugte Anwendungsbereiche sind die Bodengruppe, diverse Trägerbleche oder andere vom Decklack unzureichend geschützte Flächen.²

Die Aufwendungen für Korrosionsschutzmaßnahmen stellen ein beträchtliches Handicap des Stahls im Wettbewerb mit Kunststoffen dar, bei denen meist nur die sichtbaren Oberflächen behandelt werden. Kostensenkungen sind beim Kunststoff aufgrund des allgemein höheren Ausgangsniveaus eher zu erwarten als bei der Rostvorsorge an Stahlblechen, so daß sich die zur Zeit noch ungünstigere Position der

¹ Siehe auch [114], [147], [155], [156], [157], [171], [172].

² Siehe auch [1], [114], [147], [173], [174].

Kunststoffe auch aus diesem Grunde zukünftig verbessern dürfte.

Veröffentlichungen über neue Anwendungen alternativer Werkstoffe sind bekanntlich meist interessen geprägt und demzufolge mit besonderer Aufmerksamkeit zu behandeln. So werden z. B. in verschiedenen Quellen ([102], [140]) Kotflügel aus PUR-RRIM beschrieben, die auf weniger als das halbe Stahlgewicht kommen sollen. Eigene Recherchen zu einem Kotflügel des Ford Fiesta ergaben ein Gewicht von 3,25 kg für RRIM mit 20 % Glas und auch nur 3,63 kg für den rohen Stahlkotflügel; das sind (laut Hersteller) max. 3,9 kg für das unterbodengeschützte und lackierte Metallteil. Die Gewichtsersparnis liegt in diesem Falle also zwischen 10 und 20 % und damit weit von obigen Angaben entfernt. Ob ein qualitativ hochwertiger Serienkotflügel aus PUR einschließlich eventuell notwendiger Befestigungs- oder Anschlußteile und fertig lackiert ähnlich niedrig im Gewicht liegt, ist mit der Darstellung eines solchen Prototyps auch noch nicht gesagt.

Da die heutigen Kraftfahrzeuge in ihrer Bauweise primär auf die Verwendung von Stahl ausgelegt sind, bietet konventionelles Stahlblech für PKW-Karosserien den meisten alternativen Werkstoffen gegenüber Vorteile im Preis, der Großserienfähigkeit, der Verfügbarkeit und der ausgereiften Fertigungsabläufe. Der bloße Ersatz einer guten Blechkonstruktion durch ein gleichartiges Teil ist mit keinem anderen Material derzeit wirtschaftlich durchzuführen und in der Regel auch nicht sinnvoll; es sei denn, daß neue Anforderungen an das Teil gestellt werden und materialgerechter konstruiert werden kann.

3.2.2.2 Scheiben, Leuchten

Die Verglasung von Kraftfahrzeugen ist seit langem ein Objekt für Substitutionsbemühungen. Kunststoffe sind für Rückleuchten üblich und werden versuchsweise für Streuscheiben schon eingesetzt. Dort erbringen sie Gewichtseinsparungen von über 50 %. Die Fahrzeugfenster von Serienwagen dürften jedoch auf absehbare Zeit noch nicht aus spezifisch leichteren Werkstoffen wie PMMA oder PC hergestellt werden, da die Lebensdauer derartiger Scheiben wegen mangelnder Lösungsmittel- und UV-Beständigkeit sowie geringer Kratzfestigkeit auch mit entsprechenden Beschichtungen nicht mit Glas vergleichbar ist. Die kratzfesten Beschichtungen (meist Polysiloxane) verbessern zwar die technischen Eigenschaften deutlich und haben ihre Verwendbarkeit an Versuchsfahrzeugen im mehrjährigen Alltagsbetrieb gezeigt; in der Summe der Eigenschaften reicht es aber für einen Durchbruch in die Großserie noch nicht aus, abgesehen von den höheren Kosten. Die Beschichtung ist ein sehr aufwendiges Verfahren, da höchste Reinheit und Gleichmäßigkeit gewährleistet werden müssen. Da die Dehnbarkeit der Beschichtungen nur bei etwa 1,2 % liegt, lassen sich gekrümmte Scheiben nicht aus vorbeschichtetem Plattenhalbzeug formen.¹

Insbesondere bei nicht fest eingeklebten Scheiben kommt der geringe E-Modul als Problem hinzu; 3 mm dünnes ESG fällt gegenüber dickeren Kunststoffscheiben gleicher Steifigkeit und Isolationswirkung nicht schwerer aus, obwohl ein Gewichtsvorteil in der Literatur häufig behauptet wird (siehe Bild 25; zu den bewerteten Gewichtsvergleichen siehe Kapitel 4.2, wo die Ansätze erläutert werden). Dabei werden dann aber Einbußen an Steifigkeit hingenommen oder durch zusätzliche Verstärkungen kompensiert, d. h. die Konstruktionen sind an sich nicht mehr vergleichbar. Bewegliche Kunststoffscheiben lassen sich zwar mit ent-

¹ Siehe auch [1], [175], [176], [177].

	Glas	PC	PMMA
Flächenge- wicht 3 mm	7,2 kg/m ²	3,6 kg/m ²	3,6 kg/m ²
Flächenge- wicht 5 mm	12 kg/m ²	6 kg/m ²	6 kg/m ²
Gewicht gl. Biegesteifig.	1	1,5	1,4
Steifigkeit* prop. E ^{1/2}	1	2,6	2,4

Bild 25: Gewichtsvergleich von Glas- und Kunststoffscheiben (* siehe 4.2).

sprechend steifen Rahmen versehen, diese dürfen aber nicht die Sichtwinkel beeinträchtigen. Selbst die konventionellen rahmenlosen Glasscheiben einiger Serienfahrzeuge sind nicht unproblematisch, da bei hohen Geschwindigkeiten der Dichtungsdruck zu gering werden kann, abgesehen von der Verschleißbelastung der Türdichtung durch die bewegliche Scheibe. Die etwas geringere Isolationswirkung könnte bei Fahrzeugen der unteren Preisregion vielleicht in Kauf genommen werden, die geringere Steifigkeit darf aber die Funktion, sprich einwandfreies Schließen der Fenster auch bei höheren Geschwindigkeiten, nicht beeinträchtigen. Da die Scheiben wegen der besseren Aerodynamik zunehmend möglichst weit nach außen, mit der Karosserieoberfläche bündig, angeordnet werden, wäre ein zusätzlicher Rahmen für Kunststoffscheiben auch von daher ungünstig. Für derartige Scheiben spricht dagegen die Möglichkeit, Rahmen und/oder Befestigungselemente gleich anzuformen und durch rationellere Fertigung Kosten zu sparen.

In einem solchen Maße stark dreidimensional ausgeformte Scheiben wie z. B. die Heckscheibe des Daimler-Benz Forschungs-Pkw (Bild 26) sind aus konventionellem Glas jedoch nicht herstellbar und eröffnen so dem Kunststoff weitere

Marktchancen. Denkbar auch für die nähere Zukunft sind kleine Dreieckscheiben in den hinteren Türen, Fenster in den hinteren Pfosten, wie sie derzeit in den USA in Mode sind, und dergleichen nicht im primären Sichtbereich des Fahrers liegende, eingeklebte Fensterflächen. Heckscheiben aus Kunststoff sind auch mit Beheizung schon vorgestellt worden, mit zunehmender Größe gewinnt aber das Steifigkeitsproblem wieder an Bedeutung, und die Gewichtsersparnis sinkt.

Die hohen Anforderungen an die optischen und mechanischen Qualitäten erfordern sehr präzise, teure Spritzwerkzeuge, da die Schlagzähigkeit von aus plattenartigem Halbzeug geformten und dann kratzfest beschichteten Scheiben aufgrund der Eigenspannungen sinkt (die Verformung von beschichteten Platten ist für Einzelstücke mitunter begrenzt machbar, in der Regel aber wegen der geringen Elastizität der Beschichtung nicht möglich). Derzeit laufen in der



Bild 26: Kunststoffheckscheibe des Daimler Benz Forschungs-Pkw "Auto 2000".

Industrie Versuche, die Randzonen spritzgegossener Scheiben so zu gestalten, daß ein Rahmen angeformt bzw. angeschäumt werden kann, der weitere Funktionen wie die Aufnahme von Zier- und Befestigungselementen übernimmt und die automatisierte Montage als Baugruppe ermöglicht. Dadurch könnte die Verwendung von Kunststoffscheiben wirtschaftlich interessanter werden (Siehe auch A 1.1.3, Scheibenrahmen).

Die Ausrüstung von Personenwagen mit Kunststoffscheiben hat einen nicht zu vernachlässigenden Sicherheitsaspekt. Simulierte Fußgängerunfälle zeigten, daß PC-Scheiben nicht splitterten und großen Verformungen mit relativ hohen Geschwindigkeiten standhielten; geringere Belastungen ertrugen auch PMMA-Scheiben ohne Beschädigung. Da die derzeit geltende Gesetzgebung aber auf Silikatglasscheiben zugeschnitten ist, fallen Prüfergebnisse für Kunststoffscheiben aus dem Rahmen, und so werden diese häufig nicht zugelassen [1].

Ein weiteres Problem ist die mögliche Veränderung der Qualitäten nach längerer Nutzungsdauer. Die Beschichtungen reißen auch bei nur geringen elastischen Verformungen der Scheiben; mit bloßem Auge ist dies kaum zu erkennen. Für einen Serieneinsatz müßten Folgen von Beschädigungen der Beschichtung nach reversiblen Verformungen und mögliche negative Einflüsse genauer untersucht werden, da z. B. die Lösungsmittel- und Kraftstoffbeständigkeit sowie die Schlagzähigkeit deutlich beeinträchtigt werden können. Im allgemeinen wird PMMA als günstiger angesehen als PC, da es UV-beständiger ist und die kratzfesten Beschichtungen besser haften.

Es muß auch bezweifelt werden, daß die Prüfmethode der Kunstglashersteller den nie auszuschließenden unsachgemäßen Reinigungsmethoden oder anderen unsanften Behandlungen durch die Autofahrer in der Praxis Rechnung tragen. Die Härte der dünnen Beschichtung mag ausreichen, wenn wie in den Prüfungen vorgesehen Reibräder mit 5 N Auflagekraft

darüberreiben oder Sandkörner auf die Oberfläche rieseln. Wenn die Körner aber unachtsam mit einem verschmutzten Putzlappen oder hartem Fliegenschwamm in das Material gedrückt werden, bleiben deutliche Spuren zurück. Herkömmliche Glasscheiben haben dagegen eine beachtliche Lebensdauer; in der Studie über ein Langzeitauto [152] wird ein Austausch erst nach 10 Jahren vorgesehen.

	PMMA	PC	VSG	ESG
Spez. Gewicht	+	+	-	-
Schlagzähigkeit	+/o	+	-	-/o
Dehnbarkeit	+	+	-	-
Warmformbarkeit	+	+/-	-/o	-/o
Mechanische Bearbeitbarkeit	+	+	-/o	./.
Kratzfestigkeit	-	-	+	+
Steifigkeit	-	-	+	+
Wärmeausdehnung	-	-	+	+
Wärmeformbeständigkeit	-	-	+	+
UV-Beständigkeit	o	-	+	+
Brandverhalten	-	-	+	+
Kosten	-	-	+	+

Bild 27: Vergleich charakteristischer Eigenschaften von Glas und Kunststoffscheiben.

Bild 27 stellt einige Eigenschaften der zur Diskussion stehenden Scheibenwerkstoffe gegenüber. Die Bewertungen sind dabei nicht immer allgemeingültig und eindeutig zu treffen, da z. B. die Schlagzähigkeit von Glas sicherlich relativ schlecht ist, andererseits eine ESG-Scheibe eine beachtliche Schlagfestigkeit aufweist, wenn die Belastung

entsprechend ihrer Auslegung aufgebracht wird. So hält sie durchaus auch kräftige Schläge mit einem Hammer aus, solange sie nicht örtlich (z. B. durch ein kleines Sandkorn) überlastet wird und die in ihr herrschenden Spannungen den ebenso schlagartigen Bruchvorgang einleiten. Das kann sehr leicht an den Kanten geschehen, wo die Spannungsverhältnisse besonders ungünstig sind. Eine großflächige Belastung in der Mitte wird u. U. besser überstanden als bei einer Acrylglasscheibe oder einer nicht spannungsfrei geformten PC-Scheibe.

Die Warmformbarkeit des Glases an sich ist gut, die nachträgliche Verformung aber schwierig. Die weitgehend nur zweidimensionale Verformbarkeit ist zwar nachteilig, die geforderten optischen Qualitäten von Scheiben (Verzerrungsfreiheit) setzen hier aber ohnehin Grenzen.

Nachfolgend sollen noch einmal die wesentlichen Argumente, wie sie die Glas- und die Kunststoffhersteller sehen, aufgeführt werden. So spricht nach [1] für Glas:

- Die guten optischen Eigenschaften von Glas verändern sich über die Lebensdauer des Fahrzeugs nicht.
- Die Reinigung ist völlig problemlos.
- Glasscheiben sind problemlos zu beheizen.
- Glas kann infrarotreflektierend beschichtet werden, unter der Einschränkung geringerer Kratzfestigkeit dieser Schicht.
- Glas bringt keine Probleme beim Aufkleben von Steuermarken, Etiketten oder dergleichen.
- Glasscheiben versteifen die Karosserie und stützen bei einem Überrollunfall das Dach.
- Einscheiben-Sicherheitsglas ermöglicht den Notausstieg.
- Glasscheiben brechen bei einem Kopfaufprall vor ernststen Schädelverletzungen.

Die angeführten Sicherheitseffekte beim Überrollunfall und betreffs der Schädelverletzungen sind wohl nicht pauschal zutreffend, auch wenn insbesondere VSG-Scheiben zweifellos

geringere Kopfbelastungen hervorrufen als unnachgiebige Blechstrukturen oder unzerbrechliche Kunststoffscheiben.

Gegen Kunststoff spricht nach Meinung der Glasindustrie:

- Die Herstellung ist komplizierter, wenn gleiche optische Eigenschaften wie mit Glas erreicht werden sollen.
- Die optischen Eigenschaften werden nie ganz so gut wie die von Glas.
- Die Herstellung ist teurer.
- Die existierenden Prüfnormen sind nicht auf die besonderen Eigenschaften der Kunststoffe ausgerichtet.
- Die Kratzfestigkeit ist geringer.
- Kunststoffscheiben können sich elektrostatisch aufladen.
- Der Einsatz als Türkurbelscheibe ist wegen der Führung problematisch.
- Die Wärmeausdehnung erreicht den 10-fachen Wert von Glas und wird bei Einspannung im Fahrzeug problematisch.
- Bei einem Bruch einer Kunststoffscheibe ergeben sich gefährliche Schnittkanten.
- Kunststoffscheiben sind nicht beheizbar.
- Kratzfest beschichtete Kunststoffscheiben können nicht gebogen werden.
- Die kratzfesten Beschichtungen sind nicht ausreichend witterungsbeständig.
- Die thermischen Eigenschaften von Kunststoffscheiben sind nicht besser als die von Glasscheiben.

Für Kunststoff spricht nach Meinung der Glasindustrie:

- In Kunststoffscheiben lassen sich bei ausreichender Dicke Gewinde schneiden zur Befestigung von Führungselementen.
- Die Scheiben können in entsprechenden Werkzeugen mit angeformten Führungselementen hergestellt werden; der Preis derartiger Werkzeuge liegt allerdings bei 150 000 DM pro Scheibe.

Für Kunststoff spricht nach Meinung der Kunststoffverarbeitenden Industrie außerdem oder entgegen zuvorgenannter Meinung:

- Kunststoffscheiben haben sich in Versuchsfahrzeugen auch als Türkurbelscheiben bewährt.
- Die Beschlag- und Vereisungsneigung ist geringer als bei Glas.
- Ein Verkratzen tritt bei normaler Behandlung nicht auf.
- Kunststoffscheiben haben wesentlich bessere Gestaltungsmöglichkeiten, was nicht nur die Anformung von Führungshilfen, sondern auch die sphärische Formgebungsmöglichkeit bei Spritzgußergebnissen betrifft.
- Kunststoffscheiben sparen Gewicht.
- Die Prüfnormen für Fahrzeugscheiben können in Zukunft den spezifischen Kunststoffeigenschaften angepaßt werden.
- Kunststoffscheiben können beheizt werden.

Wie die aufgezeigten Widersprüche zu beurteilen sind, wurde teilweise am Beginn dieses Kapitel schon gezeigt. Eigene Erfahrung bei Entwicklung und Erprobung der betreffenden Komponenten des Forschungs-Pkws UNI-CAR zeigten, daß die Kunststoffscheiben keine gute Kratzfestigkeit unabhängig von der Art der Beschichtung hatten und für Scheiben im direkten Sichtbereich als ungeeignet erschienen. Andererseits störte dies z. B. an den Scheinwerferabdeckungscheiben in der Praxis weniger. Versuche, beheizbare Kunststoffscheiben herzustellen, sind zwar zunächst fehlgeschlagen, bei entsprechendem Entwicklungsaufwand aber vielleicht erfolgreicher einzuschätzen. Die Reinigung der Scheiben warf keine Probleme auf, ebenso wie eine elektrostatische Aufladung zumindestens nicht bemerkt wurde. Die unterschiedliche Wärmeausdehnung von Glas und Kunststoff führte bei Glasscheiben in der Soft-Nose ebenfalls nicht zu Problemen; vielleicht wegen der Verklebung mit einer relativ elastischen Masse.

Beim konventionellen Glas wird der Trend zu dünneren Scheiben fortgesetzt werden. ESG (thermisch vorgespanntes Glas) wird bereits mit 3 mm Dicke gefertigt, beim VSG liegt die Grenze derzeit bei 2,0 bzw. 1,5 mm der Außen- bzw. Innenscheibe. Noch dünnere Scheiben (z. B. 1,4/0,76/1,4/0,5 mm, d. h. insgesamt ca. 4 mm VSG mit Innenfolie gegen Schnittverletzungen) sind zwar herstellbar und in Erprobung, die nicht ausreichende Steinschlagfestigkeit steht ihrem Einsatz jedoch entgegen. Weitere Entwicklungen dienen kleineren Krümmungsradien, verbesserten thermischen Eigenschaften und verfeinerten elektrischen Zusatzfunktionen wie fast unsichtbaren Heizungen. Die Scheiben werden zunehmend geklebt, wobei vermehrt Polyurethan-Klebstoffe verwendet werden. Diese müssen zwar sorgfältig vor UV-Strahlung geschützt werden, neigen aber weniger zum Kriechen unter statischer Belastung als z. B. Butyl-Klebmassen. Die Flächen entlang der Verklebung werden bei verschiedenen Produkten mit einem Haftvermittler behandelt, um die Haftfestigkeit zu erhöhen. Diese Primer sind mitunter ebenfalls empfindlich gegen Dauerfeuchte und Sonneneinstrahlung, so daß entsprechende Schutzvorkehrungen getroffen werden müssen. Das Bedrucken der Scheiben mit keramischem Material dient dann sowohl dem Design wie der Klebung.¹

¹ Siehe auch [1], [2], [10], [38], [98], [99], [118], [175], [178].

3.2.3 Mechanische Komponenten, Fahrwerk

- Stahl, Eisen

Bei den mechanischen Komponenten, Motorenteilen, Fahrwerksteilen, Hebeln, Gehäusen usw. ist ein besonders großes Änderungspotential vorhanden. Hier dürften insbesondere Eisenguß- und Schmiedeteile sowie Zinkdruckgußteile ersetzt werden, da hier besonders große Gewichtseinsparungen zu erwarten sind [155]. Für mechanisch oder thermisch höher belastete Bauteile bietet sich Aluminium besonders an; für mäßig beanspruchte Gehäuse, Hebel, Zahnräder usw. dürfte Kunststoff wirtschaftlicher sein, z. B. glasfaserverstärktes PA oder gefüllte Preßmassen. Motorblöcke, Zylinderköpfe, Ventildeckel, Wasserpumpen usw. aus Aluminium gehören bereits zum Stand der Technik, so daß nicht nur Eisen- und Stahlteile, sondern auch Aluminiumteile zu den konventionellen Komponenten gerechnet werden können, für die Substitutionsbestrebungen im Gange sind, gefördert durch den relativ hohen Materialpreis.

Bei mechanischen Elementen, Motoren- und Fahrwerksteilen ist die Frage der Lebensdauer bzw. der Dauerschwingfestigkeit von Bedeutung. Nicht allein die zuvor beschriebenen Alternativen zum Stahl, sondern auch neuere Sorten wie die hochfesten Qualitäten können hier zu Verschlechterungen führen und die erwartete Gewichtsersparnis nicht zulassen. In [179] wurden Radscheiben verschiedener HSLA-Qualitäten auf ihre Eignung untersucht. Gegenüber konventionellem Material gleicher Blechdicke wurde keine verbesserte Dauerfestigkeit, in einigen Fällen bei höherer Ausgangsfestigkeit sogar niedrigere Dauerfestigkeit der Bauteile registriert. Diese Erkenntnisse lassen sich zwar nicht pauschal auf alle dauerbelasteten Bauteile übertragen, zeigen aber, daß Verbesserungen vorliegender Konstruktionen in bezug auf Blechdicke und Gewicht an verschiedenen Stellen mit den neuen Stahlqualitäten nicht immer zu erreichen sind.

- Aluminium

Die Verwendung von Aluminium bei zum Fahrwerk zählenden Bauteilen ist u. a. dadurch begrenzt, daß bei Schmiede- oder Gußteilen die dreidimensionale Vergrößerung aufgrund des geringeren E-Moduls zu beachten ist, die je nach Belastungsfall eine bis zu 1,5-fache Bauhöhe zur Folge haben kann. Bei der Auslegung der Bauteile ist der Kerbfreiheit größere Beachtung zu schenken als bei Stahlteilen. Zudem gibt es Aussagen, daß bei dynamisch beanspruchten Elementen z. B. aus perlitarmen Feinkornstählen mit höherer Festigkeit vielfach durch konstruktive Maßnahmen fast gleich viel Gewicht eingespart werden kann wie durch leichtere Werkstoffe.¹

Aluminiumräder werden seit längerer Zeit in gegossener und geschmiedeter Form angeboten und seit kurzem auch aus Aluminium gepreßt. Den Vorteilen wie größerer Gestaltungsfreiheit, Verringerung translatorischer und rotatorischer, insbesondere der ungefederten Massen um ca. 30 %, stehen zwei-, drei- oder achtfache Kosten im Vergleich zu Stahlrädern gegenüber. Auf dem Lkw-Sektor hätten Gewichtseinsparungen durch Aluminiumräder den Vorteil, daß die Nutzlast entsprechend erhöht werden könnte. Bei den dort herrschenden Größenordnungen der Radgewichte wäre dies durchaus beachtenswert. Die Verhältnisse liegen bezogen auf das konventionelle Stahlrad in etwa wie²:

	Kosten	Gewicht
Stahlblechrad	1	1
Aluminiumgußrad	4	0,8
Magnesiumgußrad	5	0,7
Al-Schmiederad	8	0,7
Al-Blechrad	3	0,6 .

¹ Siehe auch [1], [155].

² Siehe auch [155], [180], [181].

Die Verringerung der ungefederten Massen steht auch bei den Bemühungen im Vordergrund, Brems Scheiben aus Aluminium zu schaffen, indem dauerhafte Beschichtungen mit verschleißfesterem Material z. B. durch Plasmaspritzen aufgebracht werden. Ebenfalls in Frage kommt Aluminium für Rad aufhängungen, wie Bild 28 am Beispiel der Aluminiumquer lenker des UNI-CAR zeigt. Die Reduzierung der Fahrzeug gesamtgewichte macht hier Erleichterungen erforderlich, da mit sich die Fahreigenschaften bzw. der Komfort nicht verschlechtern. Die Mehrkosten leichter Werkstoffe werden von den funktionellen Notwendigkeiten her im Bereich der ungefederten Massen höher sein dürfen und deren Einsatz damit hier wahrscheinlicher sein als in anderen Bereichen.

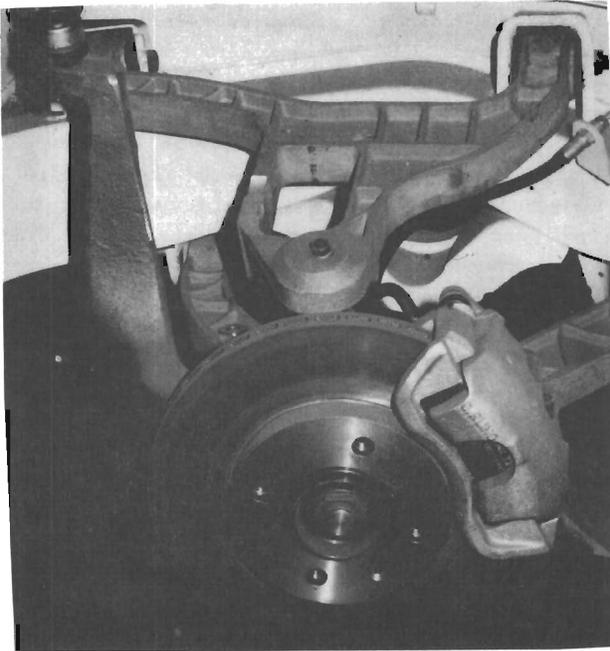


Bild 28: Aluminium-Querlenker des Forschungs-Pkw UNI-CAR.

- Kunststoff

Räder aus Kunststoff sind schon an Serienwagen eingesetzt worden (Citroën SM, außer in der Bundesrepublik Deutschland, dort Leichtmetall) und befinden sich in der Entwicklung (z. B. VW-Forschungsauto "Auto 2000", [20], Bild 29). Diese wird aber erschwert dadurch, daß es sich um ein hochbelastetes Sicherheitsteil handelt, das neben der dynamischen Beanspruchung bei Anordnung der Bremsen in der Radschüssel hohen thermischen Belastungen ausgesetzt ist - ein schwieriges Problem für die von den Kosten her in Frage kommenden Kunststoffe [30]. Der Trend zum negativen Lenkrollradius verstärkt diese Probleme, da die Bremscheiben noch weiter in die Radschüssel wandern. Mit Kunststoffrädern ist daher nur bei Fahrzeugen mit geeigneten Eremskonstruktionen (innenliegende Scheiben- oder Trommelbremsen) und geringeren Ansprüchen an die Belastbarkeit bei Verwendung hochwertiger Duomere zu rechnen. Im Ausland werden sie dennoch schon in naher Zukunft auf den Markt kommen [1].

Probleme bei höher belasteten mechanischen Komponenten aus Kunststoff sind generell die Dauerfestigkeit, die Haltbarkeit an Kräfteinleitungsstellen sowie die Anisotropie. Alternative Werkstoffe, die den technischen Ansprüchen genügen, sind in der Regel zu teuer, um mittelfristig für den Serieneinsatz in Frage zu kommen. Veränderte Preissituationen z. B. bei Kohlefasern oder aramidverstärkten Kunststoffen würde ihnen wahrscheinlich weitere Anwendungsgebiete eröffnen. Ob sich die Kostensituation allerdings mittelfristig entsprechend bessern wird, ist fraglich, da auch bei Preissenkungen für die Fasern erhöhte Aufwendungen für die den hohen Anforderungen entsprechenden Grundwerkstoffe und für die Verarbeitung zu treffen sind.¹

¹ Siehe auch [1], [3], [157].

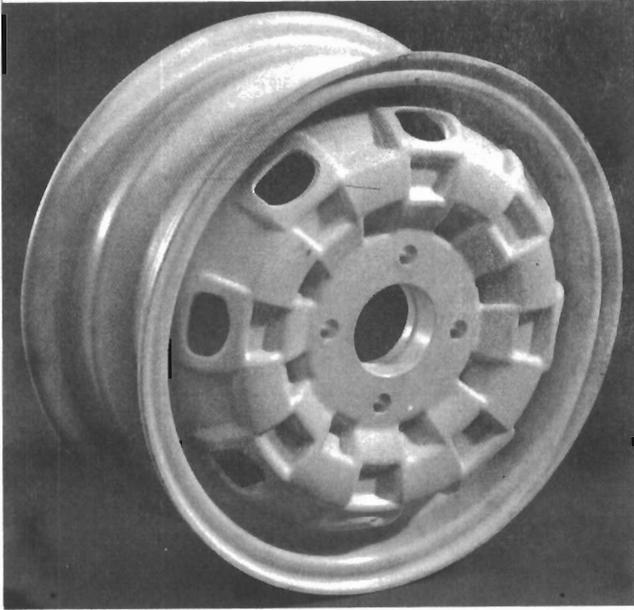


Bild 29: Kunststoffrad des VW-Forschungs-PKW [20].

Bei dem in Bild 29 gezeigten Kunststoffrad des VW-Forschungsautos konnte eine Gewichtersparnis von ca. 40 % erreicht werden gegenüber dem entsprechenden Serienrad aus Stahlblech, obwohl für die gleichförmige Verteilung der Anpreßkraft der Radbefestigungsschrauben eine zusätzliche Druckscheibe benötigt wird. Es besteht aus Vinylesterharz mit 65 % Glasfaseranteil. Die regellose Einbettung der ca. 25 mm langen Fasern würde eine Großserienfertigung gestatten. Die Kosten sollen zwischen denen einer Stahl- und einer Aluminiumfelge liegen. Die Vorteile werden neben der Kostenreduzierung besonders in der Verringerung des Trägheitsmomentes wegen der hier stattfindenden Summierung von Rotation und Translation gesehen.

3.2.4 Motor, Getriebe, Kraftübertragung, Kühlung

Bei den Pkw-Motoren hat der Ersatz der Eisenwerkstoffe durch Leichtmetalle Tradition. Das gilt z. B. für komplette Motorblöcke wegen ihres hohen Anteils am Fahrzeuggesamtgewicht. Die bessere Geräuschdämpfung der Graugußblöcke und die niedrigen Materialkosten haben dem Durchbruch bislang entgegengestanden; neue Gußlegierungen und -verfahren lassen auch von der Gewichts- und Verarbeitungsseite her noch Widerstand gegen die Substitution erwarten. Es werden sogar Vorschläge eines Motorblocks als Stahlschweißkonstruktion anstelle eines Leichtmetallblocks genannt.¹

Aluminium-Motorblöcke lassen sich ebenso durch das noch leichtere Magnesium ersetzen, wie dies z. B. beim Volvo LCP (siehe auch [182], [183]) vorgeschlagen wird. Dem weiter verminderten Gewicht dürften aber noch höhere Kosten und Probleme wie die höhere Korrosionsanfälligkeit gegenüberstehen. Das gilt auch für andere Bauteile wie Getriebegehäuse oder Thermostatgehäuse, deren wirtschaftlichen Einsatz neben den Materialkosten eine bei Berührung mit Salz- oder Schwitzwasser erforderliche Oberflächenbeschichtung entgegenstehen [1].

Auch für Zylinderköpfe, die bei den meisten Konstruktionen der letzten Jahre aus Aluminium hergestellt wurden, wird trotz des höheren Gewichts mitunter wieder Grauguß verwendet ([184], beschrieben: Dieselmotor). Die Vorteile sind die geringere Leitfähigkeit und damit reduzierte Wärmeverluste, was sich insbesondere im unteren Teillastbereich günstig auf den thermodynamische Wirkungsgrad auswirken soll. Außerdem erlaubt die Materialgleichheit von Block und Kopf nachzugsfreie Zylinderkopfdichtungen.

¹ Siehe auch [1], [147].

Bei Komponenten wie den Kolben werden sich die neueren Aluminium-Gußlegierungen (z. B. AlSi12CuMgNi) wegen der ausgewogenen Eigenschaften hinsichtlich Gewicht, Festigkeit, Verschleiß, Wärmeleitfähigkeit und Verarbeitbarkeit mittelfristig nicht wieder verdrängen lassen. Gußeisen behauptet sich allerdings nach wie vor, wo hohe Anforderungen an die Verschleißfestigkeit z. B. wegen der Verwendung minderwertiger Schweröle als Kraftstoff gestellt werden, d. h. eher bei Großdieselmotoren als im Pkw.

Andere Nichteisenwerkstoffe wie Magnesium-, Titan- oder Kupferlegierungen sind den Aluminium-Legierungen aus verschiedenen Gründen als Kolbenwerkstoffe unterlegen. So weist Magnesium zwar ein geringeres spezifisches Gewicht auf, aber der Wärmeausdehnungskoeffizient ist höher, die Wärmeleitfähigkeit und der E-Modul sind niedriger und die Verschleiß- und Notlaufeigenschaften schlechter. Ebenso nachteilig ist die geringere Dauerfestigkeit. Auch beschichtete Kolben eignen sich nur für Sonderfälle wie z. B. den Sporteinsatz, nicht für die Serie.

Titanlegierungen haben hohe Festigkeiten auch bei höheren Temperaturen, eine geringe Wärmeausdehnung und ein Gewicht zwischen Stahl und Aluminium. Nachteilig sind die geringe Verschleißbeständigkeit, die große Freßneigung, die niedrige Wärmeleitfähigkeit, der niedrige E-Modul sowie hohe Werkstoff- und Verarbeitungskosten, u. a. durch die notwendigen Beschichtungen.

Kupferlegierungen haben eine hohe Wärmeleitfähigkeit, einen Ausdehnungskoeffizienten in der Nähe desjenigen der Aluminium-Legierungen, aber ein höheres Gewicht und eine niedrigere Temperaturgrenze. Die gute Wärmeleitung macht den Werkstoff dennoch für partielle Bewehrungen geeignet [185].

Eine bedeutsame Substitution hat mit der Einführung von Wärmetauschern und Kühlern aus Aluminium und Kunststoff stattgefunden, wodurch die bislang üblichen hartgelöteten Kupferbauteile abgelöst wurden. Bis vor einigen Jahren enthielt ein durchschnittlicher europäischer Pkw Bauteile, die ca. 8 kg Kupfer enthielten, ein durchschnittlicher US-Pkw ca. 11 kg. Davon entfielen in Europa allein auf den Wasserkühler ca. 3 - 4 kg Kupfer.

Seit etwa 1975 haben Al-Kühler im Pkw-Bereich Cu/Ms-Kühler substituiert. Gewichtseinsparungen und eine kostengünstige Neukonstruktion wie z. B. gesteckte Al-Kühler für die unteren Leistungsklassen waren dafür entscheidend. Für die oberen Leistungsklassen setzten sich hartgelötete Al-Kühler durch. Das war möglich, nachdem die Ms-Wasserkästen der Kühler durch kostengünstigere Kunststoffelemente ersetzt werden konnten.

Die Substitution ist nach [1] derzeit durchgeführt bei

- Wärmetauschern für Heizungen zu 80 %,
- bei Kondensatoren zu 100 %,
- bei Verdampfern zu 40 %,
- bei Kühlmittelkühlern für Pkw zu 70 %
- und bei Öl-Luft-Kühlern fast zu 100 %.

Es ist abzusehen, daß in Zukunft bis auf Sondermodelle und Kleinsereinfahrzeuge alle Pkws Al-Kühler haben werden. Dadurch wird das Einsatzgewicht von Kupfer im europäischen Pkw auf 4 - 5 kg, also auf rund die Hälfte des früheren Standes, sinken [1].

- Kunststoff

Für den Einsatz von Kunststoffen gilt auch hier, daß bei Bauteilen mit hohen Anforderungen an Steifigkeit oder Schlagfestigkeit in weiten Temperaturbereichen eine Gewichtersparnis fraglich oder nur mit besonders hochwertigen und damit für den Serieneinsatz in der Regel zu teuren Werkstoffen zu erreichen ist. Eine Substitution ist meist nicht sinnvoll, wenn schon an Metallteile erhöhte Anforderungen gestellt werden oder bei alternativen Werkstoffen andere und womöglich weiteren Folgeaufwand bedeutende Eigenschaften zu beachten sind. Ein Beispiel sei ein Ventildeckel aus Kunststoff, der zwar zu realisieren wäre, aber bei einfachem Ersatz des Metallteils durch ein entsprechendes Kunststoffteil zusätzliches Geräuschdämmungsmaterial erforderte und damit u. U. insgesamt sogar mehr Gewicht bedeutete.

Alle Thermoplaste sind anfällig für Oxidation, das bedeutet eine fortschreitende Verschlechterung der Eigenschaften, sobald sie der Luft bei höheren Temperaturen ausgesetzt werden. Durch Zugabe von Stabilisatoren und Verstärkung durch Glasfasern können jedoch ausreichende Gebrauchsdauern für den Einsatz im Motorraum erzielt werden, so daß neben Wasserkästen, Ausgleichsbehältern, Gehäusen usw. zunehmend auch anspruchsvollere Anwendungen wie Lagerkäfige oder Kupplungsteile aus Thermoplasten zu beobachten sind. Selbst für Ansaugrohre bzw. Teile davon wird in Serienwagen schon Kunststoff verwendet, z. B. GF-PA, in Sportfahrzeugen auch CFK. Neben dem Gewicht werden hierfür fertigungstechnische Gründe angeführt, da Einsparungen bei den Gußkernen und glattere Oberflächen erreicht werden. Auf Grund des vergleichsweise niedrigen Preises haben neben PA die verschiedenen PP-Typen große Bedeutung. Neben Kosten und Gewicht spielt bei Kunststoffteilen im Motorraum auch die größere Gestaltungsfreiheit eine Rolle, da

oft enge Einbauverhältnisse vorliegen und entsprechende Metallteile schwieriger zu fertigen sind.¹

Motorblöcke aus kohlefaserverstärktem Epoxidharz oder komplette Motoren aus Kunststoff sind in Japan und den USA zwar schon vorgestellt worden, Veröffentlichungen von Anwendern über Lebensdauererfahrungen, Serienfähigkeit und -kosten fehlen jedoch. Bei dem Kunststoffmotor von Polimotor wird aber schon eine Gewichtsersparnis von 60 % erreicht unter Beibehaltung wesentlicher Komponenten wie Kurbel- und Nockenwelle, Zylinderlaufbuchsen, Ventiltellern usw. aus Stahl. Ob sich die höhere Wärmeisolation dieses Materials spürbar günstig auf den Wirkungsgrad des Motors auswirkt, ohne andere Probleme (langsame Erwärmung, Bedarf klopfesterer Kraftstoffe, höhere Abgastemperaturen und NO_x -Emissionen, Dissoziation, Öltemperaturen, Wärmerestau usw.) nach sich zu ziehen, ist ebenso wie bei Verwendung von Keramik im Brennraum nicht eindeutig geklärt (siehe nächstes Kapitel). Nach [188] sollen ohnehin keine großen Verbesserungen im Kraftstoffverbrauch durch derartige Maßnahmen zu erwarten sein, da die Verluste einer realen Maschine im Heizwert prinzipiell durch das motorische Arbeitsverfahren bei ca. 50 % liegen, der Gewinn eines vollkommenen Prozesses (Otto) demgegenüber nur bei 5 % des Heizwertes des Kraftstoffes.²

Die folgende Übersicht zeigt einige Temperaturen von Teilen im Motor bzw. Motorraum:

Zündkerzen	800°	Auspuffkrümmer	650°
Einlaßventil	400°	Auslaßventil	650°
Zylinderwandung	180°	Zylinderkopfdichtung	170°
Nockenwelle	180°		
Schwingungsdämpfer	50°	Keilriemen	55°
Kraftstoff	35°		

¹ Siehe auch [72], [73], [117], [184], [186], [187].

² Siehe auch [187], [189], [190].

Auch den heute bekannten fortschrittlichsten technischen Kunststoffen bleiben diese Motorenteile verschlossen, wenn auch sogenannte Exoten auf Dauergebrauchstemperaturen von 260 °C kommen statt üblicherweise 150° bis 180° Maximaltemperatur. Verbrennungsräume, Auspuffanlage usw. werden auch beim Kunststoffmotor weiterhin aus Metallen bestehen, für Gehäuse von Nebenaggregaten, Behälter oder Lager eignen sich bereits jetzt eine Reihe von Thermoplasten [158].

- Keramik

Die Verwendung keramischer Bauteile an exponierten heißen und korrosionsbeanspruchten Stellen von Kolbenmotoren soll eine verbesserte Dauerhaltbarkeit dieser Motorkomponenten gegenüber korrosiven Verbrennungsgasen erreichen. Die wärmeisolierenden Auskleidungen der Heißgasräume haben nach [133] als Ziel:

- Verringerte Aufwendungen für die Motorkühlung,
- Erhöhung der Gastemperatur im Abgaskanal,
- Gewichtseinsparung durch Verwendung von Aluminium anstelle von Grauguß, z. B. bei Abgaskrümmern und Turboladergehäusen,
- Verminderung der Schadstoff- und Schallemission,
- Verminderung des Kraftstoffverbrauchs besonders im Teillastbereich durch Verwendung eines Abgasturboladers, ebenfalls mit keramischen Bauteilen.

Kolbenbolzen mit gewichtsreduzierendem Kunststoffkern und beschichtete Leichtmetallzylinderbuchsen befinden sich in der Erprobung, während der Einsatz von Keramik auch in anderen Bereichen des Motors nach wie vor nicht abzusehen ist [1]. Keramikwerkstoffe haben den Vorteil sehr hoher Temperaturbeständigkeit und Druckfestigkeit, haben jedoch eine geringe Zugfestigkeit. Die geringe Wärmeleitfähigkeit und die schlechte Schlagzähigkeit lassen eine Anwendung eher als Verbundwerkstoff erwarten, wobei das stark unterschiedliche Wärmeausdehnungsverhalten zu Metallen Probleme bereitet. Von der Wärmeisolation durch Keramikeinsatz werden zwar den Wirkungsgrad steigernde Eigenschaften erwartet, die höheren Abgastemperaturen derartig umgerüsteter Versuchsmotoren verringerten jedoch den Effekt; bei Otto-Motoren müssen unter Umständen auch Verdichtung und Zündzeitpunkt so weit zurückgenommen werden, daß sich schließlich ein schlechterer Wirkungsgrad als zuvor einstellt. Insbesondere bei Dieselmotoren sind die höheren

Abgastemperaturen günstig, wenn dadurch ein Abgasturbolader günstiger betrieben werden kann. Abgaskatalysatoren von Otto-Motoren arbeiten bei höheren Temperaturen ebenfalls günstiger und sprechen schneller an. Der Effekt kann jedoch auch durch Auskleidung der Abgasleitungen erzielt werden ohne Maßnahmen im Brennraum. Derartige Auskleidungen sind auch vorteilhaft, wenn Aluminium als Krümmerwerkstoff vorgesehen wird oder an anderen Stellen Temperaturen hochbelasteter Metallteile durch Verkleidung mit Keramik gesenkt werden können. So sind hier keramische Kolbenmuldenrandbewehrungen für Leichtmetallkolben, Wirbelkammer- teile bei Dieselmotoren oder Zylinderauskleidungen oberhalb der Kolbenringlaufbahn im Gespräch, aber vorläufig nicht serienfähig. Dazu kommen in Zukunft (USA 1985) Partikelfilter für Dieselmotoren, siehe Bild 30.¹

Bei der Anwendung von keramischen Bauteilen im Ottomotor konnte bisher kein Kraftstoffverbrauchsvorteil festgestellt werden. In erster Linie verspricht man sich eine Verbesserung des Abgasemissionsverhaltens. Die möglicherweise zu erzielende Energieeinsparung durch den Einsatz keramischer Bauteile im Dieselmotor wird im günstigsten Fall auf einige Prozent geschätzt. Bezüglich der Herstellungskosten von Keramikbauteilen wird erwartet, daß zumindest keine Erhöhung im Vergleich zu metallischen Bauteilen eintritt. Ein Preisvorteil dürfte sich ergeben, wo teure Ni-Legierungen durch Aluminium-Legierungen mit Keramikauskleidungen ersetzt werden können. (Diskussion zu [133], [192], [193]).

Einen anderen Anwendungsbereich für keramische Werkstoffe stellen die vielerorts in Entwicklung befindlichen Gasturbinen für den Pkw dar. Hier wirkt sich besonders günstig aus, daß Laufräder und andere hochbelastete Teile aus Keramiken wie z. B. Si_3N_4 oder SiC den höheren Temperaturen standhalten; das gilt auch für Abgasturbolader.

¹ Siehe auch [1], [133], [134], [191], [192], [193].

Die relativ problemlose Verfügbarkeit der häufigsten Grundstoffe wie Aluminium, Silizium, Kohlenstoff, Sauerstoff und Stickstoff spricht ebenfalls für diese Entwicklungen, während die erhofften funktionellen und kommerziellen Vorteile für einen Serieneinsatz vorerst noch nicht überzeugend genug ausfallen; die hohen Forschungsaufwendungen auch in den USA und Japan deuten jedoch auf eine mittelfristig denkbare Wettbewerbsfähigkeit mit dem Hubkolbenmotor hin.¹

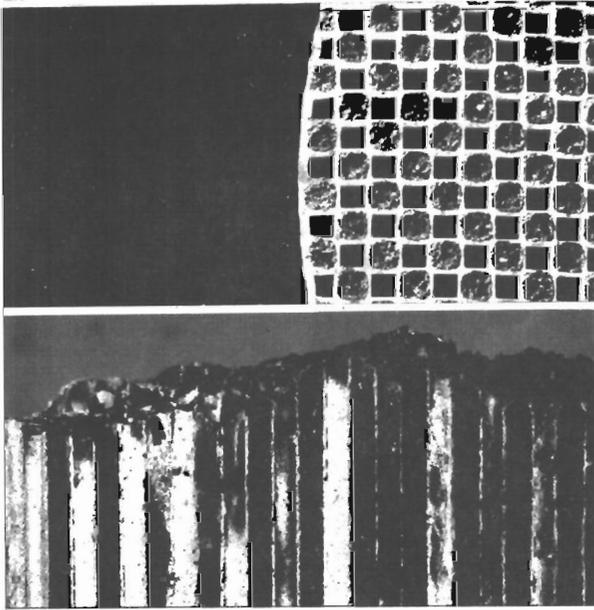


Bild 30: Keramischer Partikelfiltereinsatz von VW für Dieselmotor; oben links neu, rechts beladen mit Ruß, unten Schnitt durch Ein- und Auslaßkanäle [20].

¹ Siehe auch [2], [194], [195].

3.2.5 Innenausstattung

Zwei Drittel aller bislang im Pkw eingesetzten Kunststoffe haben bevorzugt im Innenbereich eingesetzte Werkstoffe wie Filz, Textilien, Holz, Verkleidungs- und Dämmstoffe ersetzt, nur ein Drittel Metalle. Die Innenausstattungen heutiger Fahrzeuge bestehen ebenfalls zu zwei Dritteln aus Kunststoffen, das sind rund 40 bis 100 kg beim kompakten europäischen bzw. beim großen amerikanischen Wagen. PVC, PUR und ABS stellen dabei einen Anteil von 75 %. Typische Anwendungen sind beispielsweise PVC-Folien für Kunstleder-bezüge und -verkleidungen sowie PUR-Schaum für Polster, Sitze, Lenkräder. Zu einer Gewichtsverminderung der Fahrzeuge hat der verstärkte Kunststoffeinsatz allerdings

Marke, Typ	Baujahr	Gewicht	Länge
DKW 1000 S	59 - 63	930 kg	4,23 m
Audi 80 L	72 - 78	835 kg	4,18 m
Audi 80 L	78 - 84	910 kg	4,38 m
DKW Junior	59 - 62	700 kg	3,97 m
VW Derby	78 - 82	700 kg	3,92 m
Ford 17 M P 2	57 - 60	1025 kg	4,38 m
Ford Taunus III	79 - 82	1020 kg	4,34 m
Ford 20 M P 5	64 - 67	1030 kg	4,64 m
Ford Granada 2.0	77 - 85	1300 kg	4,63 m
Opel Kadett A	62 - 65	680 kg	3,99 m
Opel Kadett D	79 - 84	815 kg	3,99 m
Opel Rekord 1700	60 - 62	945 kg	4,43 m
Opel Rekord E 1,7	77 - 83	1100 kg	4,59 m
Opel Kapitän	59 - 63	1340 kg	4,83 m
Opel Senator 2,8	78 - 83	1370 kg	4,81 m

Bild 31: Vergleich der Gewichte typischer Personenwagenmodelle von früher und heute [196].

nicht geführt, da im Gegenzug der Ausstattungsaufwand überproportional gestiegen ist, siehe Bild 31.¹

Da sich die Kunststoffe an allen sichtbaren Ausstattungselementen weitgehend durchgesetzt haben, sind nennenswerte Modifikationen am ehesten am Unterbau von Verkleidungen, Armaturenbrettern, Griffen usw. zu erwarten. Hier sind zu nennen ehemals metallische Träger und Verstärkungen, die zunehmend gespritzt oder gepreßt werden, Holzfaserformteile sowie die Auswahl von preiswerteren Füllstoffen. Der Trend zu aufwendigeren Innenverkleidungen begünstigt verschiedene Kunststoffe wie PP oder ABS gegenüber den konventionellen kaschierten Holzfaserwerkstoffen mit zunehmender Ausformung der Teile.²

Je nach Preislage des Fahrzeugs bzw. Zielgruppe der Käufer zeigt sich jedoch auch ein Festhalten an Aluminium- oder Stahlblechträgern, entsprechend gepolstert und verkleidet, oder Federkernsitzen und konventionellen Schwermatten zur Schalldämmung. So kommt es beispielsweise vor, daß neue amerikanische Wagen zwar moderne Front- und Heckverkleidungen aus flexiblen PUR-Teilen und verschiedene Teile aus SMC besitzen, der Dachhimmel innen dagegen jedoch von kunstlederbezogenen, sichtbar verschraubten Blechleisten gehalten wird. Neu auf den Markt kommende Fahrzeuge haben in der Regel deutlich aufwendigere Oberflächengestaltungen und umfangreichere Verkleidungen, die neben der Befriedigung höherer Komfortansprüche auch Montagevorteile mit sich bringen wie z. B. der Fertighimmel. Bei Dämmstoffen oder Sitzen ist trotz langjährigem Serieneinsatzes von Kunststoffen ein Durchbruch auf Dauer noch nicht erfolgt, da Qualitäts- und Kostenvorteile nicht deutlich genug ausfallen. Speziell bei Sitzen sind neuartige Bauweisen erst zu erwarten, wenn Gewichts-, Fertigungs- und Kosten-

¹ Siehe auch [1], [117], [118], [196], [197], [198], [199], [200], [201].

² Siehe auch [38], [113], [202], [203], [204], [205], [206].

fragen für Vollkunststoffsitzschalen gelöst sind, die Erfüllung der geltenden Sicherheitsbestimmungen vorausgesetzt.¹

Im Zuge der zunehmenden Lebensdauer ist auch dem Langzeitverhalten mehr Beachtung zu schenken. Höhere Lichtbeständigkeit und geringere Anteile von Weichmachern, bessere Abriebfestigkeit und reparaturfreundlichere Befestigungen sind Entwicklungsziele.²

Auf der fertigungstechnischen Seite dürfte sich der Trend fortsetzen, möglichst viele Verkleidungsteile so zu gestalten, daß sie nicht eingepaßt oder -geklebt werden müssen, sondern durch einfache Steck- oder Klemmverbindungen rationell montiert werden können. Bessere Verformungsmöglichkeiten von mit hochwertigen Bezügen versehenem Halbzeug steigern den Komfort und optischen Eindruck, ebenso durchgefärbte Spritzgußteile mit ansprechend genarbtten Oberflächen. Neue Technologien wie Blasformteile, gegossene Häute im Slush-Verfahren usw. haben spezifische Vorteile, dürften die heute üblichen Verfahren jedoch nur ergänzen, nicht ablösen [38]. Inwieweit sich in Zukunft eventuell verschärfte Brandvorschriften mit den heute verwendeten Werkstoffen erfüllen lassen, ist kaum abzuschätzen. Wohnungs- und Flugzeugbrände haben in der Vergangenheit häufig gezeigt, daß viele Opfer zunächst durch die giftigen Verbrennungsprodukte zu Schaden gekommen sind und erst in zweiter Linie durch das Feuer. So setzt z. B. das für Polsterungen im Fahrzeuginnenraum viel verwendete PUR hochgiftige Zyanidverbindungen frei [1], PVC bekanntlich Salzsäuredämpfe.

¹ Siehe auch [1], [197], [207], [208].

² Siehe auch [199], [209].

3.2.6 Ausstattung, Zubehör, Diverses

Der Ausstattungsumfang eines Pkw ist, neben den diversen Versionen von Inneneinrichtung und Karosserie eines Typs, ein häufig stark differierender Faktor mit beachtenswertem Einfluß nicht nur auf die Kosten, sondern auch auf das Gewicht. Das tatsächliche Betriebsgewicht ausgelieferter Fahrzeuge liegt in der Regel deutlich über dem angegebenen Leergewicht und verringert entsprechend die Zuladung. Diverse Servoelemente, Zierteile, Verkleidungen innen und außen, zusätzliche Polster- und Dämmstoffe, elektronische Bauteile und Instrumente, Rammschutzleisten usw. stellen einen Gewichtsanteil, der sich rein technischer bzw. funktioneller Optimierung häufig entzieht, da Design und Käuferwunsch eben nicht immer rationell zu erfassen sind. Dementsprechend groß sind hier die Spannbreiten von Kosten- und Gewichtsaufwendungen und damit Substitutions- und Einsparungsmöglichkeiten. So kann beispielsweise der Ersatz von Zierleisten aus verchromten Metall durch Heißprägefolien Vorteile in einer Größenordnung bringen, an die bei Karosserieteilen oder mechanischen Komponenten nicht zu denken ist [1]. Ähnliches ist bekannt von der Integration elektronischer Bauelemente zu winzigen Einheiten mit äußerst niedrigen Kosten in Großserie. Entsprechend schwer muß hier die Abschätzung zukünftiger Entwicklungen fallen, da zudem neben den technischen Möglichkeiten auch der schlichte Entfall oder die Neueinführung bisher nicht vorhandenen Zubehörs bedacht werden müßte.

Ein weiteres Gebiet von Werkstoffen mit beachtenswertem Gewichtsanteil, das besonders schwer abzuschätzen ist, sind Lacke, Korrosionsschutzstoffe, Verbindungs- und Befestigungselemente, Klebstoffe, Dichtungen, Schmierstoffe und diverses weiteres Kleinmaterial. Bei weiterer Verwendung von Stahlblech für die Karosserieaußenhaut ist von Relevanz, ob neue oder verbesserte Wasserlacke, Lacke mit geringerem Lösungsmittelgehalt oder Pulverbeschichtun-

gen verstärkt angewendet werden. Der Übergang zu Stahlskeletten mit durchgefärbten Kunststoffanbauteilen könnte Füll- und Decklacke entbehrlich machen und Einsparungen in der Größenordnung ermöglichen, wie sie z. B. auch eine Heckklappe aus Kunststoff statt Blech bedeutet. Lacke und andere Beschichtungen haben bei einem Mittelklassewagen einen Gewichtsanteil von immerhin 3 %, wie Bild 32 zeigt. Verzinkte Bleche würden den Einsatz von Wachs verringern, Aluminiumbleche am Stahlskelett dagegen Isoliermaterial erfordern, das bisher nicht notwendig ist. Die zunehmende Verwendung von Klebe-Dicht-Massen anstelle von Gummidichtungen oder Schrauben könnte gestoppt werden, wenn Maßhaltigkeit und Wärmeausdehnungsverhalten von Anbauteilen die Verwendung von Kontaktklebern zulassen oder beispielsweise neuartige Kunststoffschweißverfahren die Montage ohne zusätzliches Material ermöglichten [210]. Die Einsparungen betragen einige Kilogramm; abzuschätzen sind derartige Entwicklungen nur sehr schwer.

	Kleines Fahrzeug		Mittelklassewagen	
	Gewicht	Anteil	Gewicht	Anteil
Fahrgestell	196 kg	28 %	196 kg	22 %
Rohkarosserie	190 kg	27 %	260 kg	29 %
Motor, Kühler, Abgasanlage	111 kg	16 %	167 kg	18 %
Innenausstattung, Einbauteile	53 kg	8 %	80 kg	9 %
Sitze	41 kg	6 %	40 kg	4 %
Glas, Dichtungen	36 kg	5 %	43 kg	5 %
Getriebe, Anlasser	29 kg	4 %	36 kg	4 %
Elektrik	26 kg	4 %	35 kg	4 %
Lack und andere Beschichtungen	8 kg	1 %	27 kg	3 %
Stoßfänger	7 kg	1 %	18 kg	2 %

Bild 32: Verteilung des Fahrzeuggewichts auf die verschiedenen Baugruppen ([119], [211]).

3.3 MATERIALANTEILE BEI HEUTIGEN PKW

Die Anteile der verschiedenen Werkstoffe an den heutigen Personenwagen zu bestimmen, ist außerordentlich schwierig, da die Unterschiede von Modell zu Modell, Firma zu Firma und der Grad der Zerlegung sehr verschieden ist. Eine SMC-Haube ist eben nicht einfach zu 100 % "Kunststoff", sondern in der Regel aus Polyester und Glas gefertigt, mit einer Lackschicht aus einem anderen Kunststoff versehen; die notwendigen Befestigungsteile sind aus Blech und die Schrauben aus Stahl. Dichtungen, Klemmen, Isolierungen, Dekorteile usw. werden häufig nicht gesondert betrachtet, die Füllstoffe in Thermoplasten diesen zugerechnet oder die Bindemittel in Holzfaserwerkstoffen vernachlässigt. In [2] haben die Zusammenbauteile Anteile von 10 bis 20 % am Gesamtgewicht; eine Totalzerlegung gegenüber der Normalzerlegung ergab Unterschiede in Höhe von 7 % bei Eisenwerkstoffen und 4 % bei den Kunststoffanteilen. Letztlich bleibt bei der Komplexität des Gebiets aber doch nur die Beschränkung auf die wichtigsten Werkstoffe mit den zuvor genannten Unzulänglichkeiten, um die Übersichtlichkeit zu wahren.

Für die verschiedenen Werkstoffe liegen die Angaben meist in den folgenden Bereichen:

für Stahl	zwischen	56	und	68 %
für Eisen	zwischen	12	und	17 %
für Gummi	zwischen	3	und	6 %
für Glas	zwischen	2	und	3 %
für Kunststoff	zwischen	4	und	8 %
für Aluminium	zwischen	2	und	4 %
für Blei	zwischen	0,7	und	1,5 %
für Zink	zwischen	0,5	und	1,5 %
für Kupfer	zwischen	0,5	und	1,5 %

Anders sehen die Verhältnisse aus, wenn man nicht die Anteile der Werkstoffe an der Masse, sondern am Volumen des Pkws vergleicht. Dem subjektiven Eindruck, daß z. B. die Kunststoffe einen weit höheren Anteil haben als 4 - 8 %, wird beim volumenmäßigen Vergleich eher entsprochen. So entspricht ein Prozentsatz bei

Stahl	am Gewicht von 56 %	einem am Volumen von 30 %
Eisen	14 %	7 %
Kunststoff	6 %	20 %
Gummi	4 %	14 %
Aluminium	3 %	4 %
Glas	2 %	4 %
Blei	1 %	0,5 %
Zink	1 %	1 %
Kupfer	1 %	0,5 %
Sonstige	12 %	19 %

mit einer Summe der gerundeten Anteile von jeweils 100 %.

Wie der subjektive Eindruck täuschen kann, zeigt das folgende Beispiel. Der Trabant aus der DDR, bekannt als typisches Fahrzeug mit Plastikkarosserie, enthält nur ca. 50 kg Kunststoffe, davon 35 kg Außenteile. Das sind bei einem Wagengewicht von 620 kg rund 8 %, was zwar etwas über dem Durchschnitt, aber durchaus noch im Rahmen gängiger westlicher Vergleichsfahrzeuge mit Ganzstahlkarosserie liegt. Eine Erhöhung des Kunststoffanteils soll bei dieser Konzeption - tragende Strukturen einschließlich der Seitenwände aus Stahlblech - des Wagens nicht mehr möglich sein [I45].

Die Unterschiede in den Werkstoffanteilen zwischen der Bundesrepublik, den USA und Japan liegen mit den Streubreichen der verschiedenen Quellen in den zuvor angegebenen Grenzen, wobei Stahl in Japan etwas nach oben tendiert, Deutschland und die USA in etwa den gleichen Anteil aufweisen und Kunststoff in Deutschland etwas stärker vertre-

ten ist als in den beiden anderen Ländern. Bild 131 auf Seite 380 enthält dazu eine Zusammenstellung aus verschiedenen Quellen von 1973 bis 1981 (siehe auch Kapitel 6.2.2 mit Trendabschätzungen und weiteren Literaturhinweisen sowie exemplarisch dazu die Bilder 141 bis 143).

Eine Umfrage unter Experten aus der Kraftfahrzeugindustrie und Forschungsinstituten im Rahmen des multinationalen M.I.T.-Projekts "Zukunft des Automobils" ergab für 1980 die in Bild 33 gezeigte Verteilung nach Ländern:

Werkstoffe	Japan	USA	BR-Deutschl.
Stahl incl. HSLA	61.0 %	58.0 %	64.1 %
Eisen	9.6 %	15.0 %	10.0 %
Aluminium	3.0 %	5.0 %	3.6 %
Kunststoff (nicht- tragend)	5.2 %	4.0 %	6.8 %
Kunststoff (tragend)	0.0 %	2.0 %	2.3 %
Glas	3.6 %	2.0 %	4.1 %
Gummi	4.8 %	4.0 %	5.4 %
Andere	12.9 %	9.0 %	3.6 %

Bild 33: Werkstoffanteile am Pkw in Deutschland, den USA, und Japan laut Expertenumfrage von 1980 [212].

Die Werkstoffanteile und deren Änderung über der Zeit lassen sich nur schwer verfolgen, da dies in der Vergangenheit selten Thema von Untersuchungen war. Bild 34 zeigt

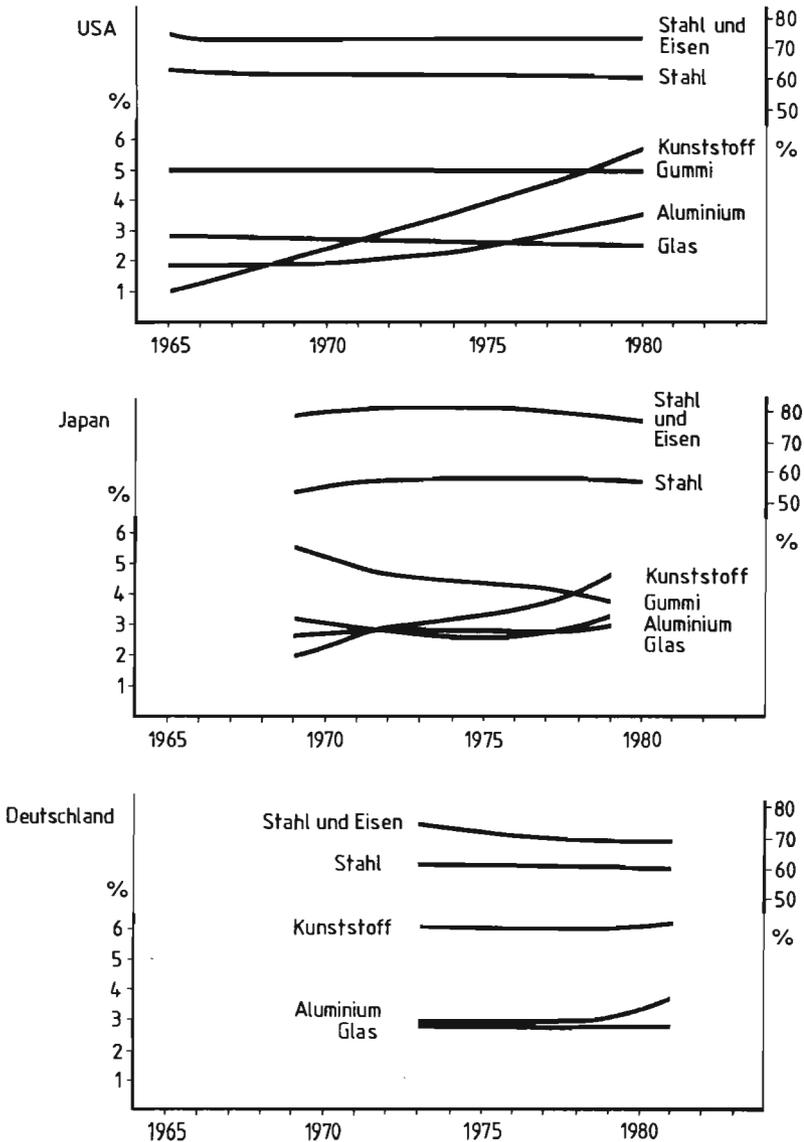


Bild 34: Entwicklung der Werkstoffanteile am Pkw in den USA, in Deutschland und in Japan in den letzten Jahren (Abschätzung nach verschiedenen Quellen).

die Entwicklung der Werkstoffanteile am Pkw in Deutschland, den USA und Japan in den letzten Jahren. Es handelt sich dabei um eine relativ grobe Abschätzung nach Angaben aus verschiedenen Quellen¹, da umfassende und vergleichbare Untersuchungen über längere Zeiträume nicht vorliegen. Meist sind nur einzelne Modelle betrachtet oder unterschiedlich alte Schätzungen verglichen worden, so daß auch diese Darstellung mit entsprechenden Vorbehalten zu lesen ist. Auffallend ist in allen drei Ländern die relative Konstanz des Stahlanteils wie auch die geringen Änderungen bei Aluminium, Glas und Gummi am Pkw.

Die Entwicklung des mengenmäßigen Einsatzes von Leichtbauwerkstoffen in Europa und den USA zeigt Bild 35.

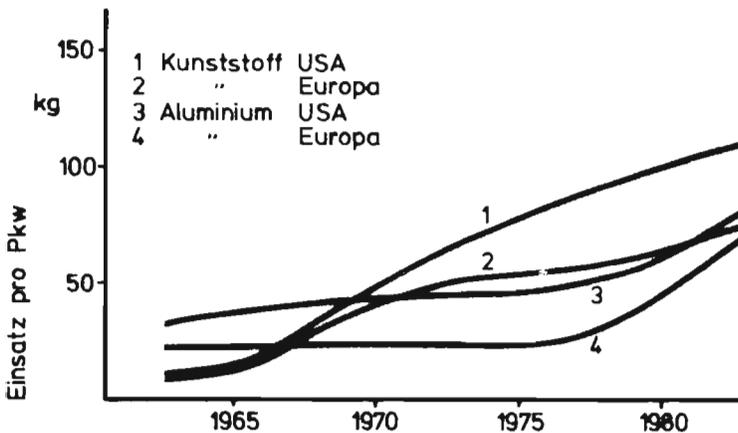


Bild 35: Entwicklung des Einsatzes von Aluminium und Kunststoffen über der Zeit [1]¹.

¹ Zu weiteren Angaben über Materialanteile siehe z. B. auch [37], [109], [114], [116] bis [124], [141], [155], [156], [158], [165], [198], [213] bis [228] sowie Kapitel 6.

3.4 FERTIGUNG

3.4.1 Verarbeitung, Übersicht

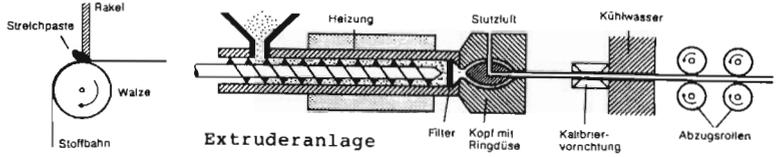
Die Herstell- und Verarbeitungsverfahren von Stahl und anderen konventionellen Werkstoffen sollen an dieser Stelle als bekannt vorausgesetzt werden, so daß sich dieses Kapitel auf einige Aspekte der zunehmend eingesetzten Kunststoffe und Leichtmetalle beschränken kann.

Die Fertigungsverfahren der Kunststoffe sind entsprechend den zahlreichen Erscheinungsformen ebenso vielfältig wie grundverschieden. Das bedeutendste Verarbeitungsverfahren ist das Spritzgießen, insbesondere für Thermoplaste. Bei Duroplasten werden bevorzugt Gieß-, Preß- und Wickelverfahren angewendet. Weitere häufige Verfahren sind das Extrudieren, Blasformen, Warmformen und der Reaktionsguß. Bild 36 zeigt einige der wichtigsten Verfahren der Kunststoffverarbeitung.

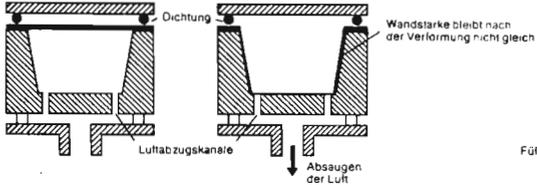
Bei der vorhandenen Verfahrensvielfalt muß hier auf eine detailliertere Beschreibung der gängigen Verfahren verzichtet werden. Man kann davon ausgehen, daß für jede konkrete Anwendung jeweils mehrere Alternativen technisch realisierbar sind. Wirtschaftliche Kriterien ergeben sich dann aus der jeweils günstigsten Kombination von Werkstoff, Bauteilgestaltung und Verarbeitungsverfahren.

Im Fahrzeugbau gehen die Entwicklungen darauf hin, durch Weiterentwicklung der bekannten Verfahren großformatige Bauteile mit höherer Qualität und Wirtschaftlichkeit herstellen zu können. Dies spiegelt sich z. B. an Spoilern und Kühlerverkleidungen verschiedener neuer Serienfahrzeuge aus PC wieder, in diesem Falle ein Spritzgußverfahren, und dem zunehmendem Einsatz faserverstärkter Werkstoffe.¹

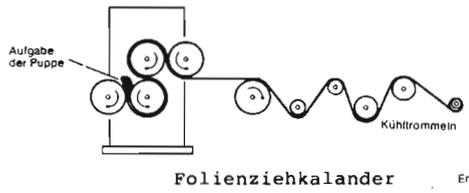
¹ Siehe auch [39], [229], [230], [231].



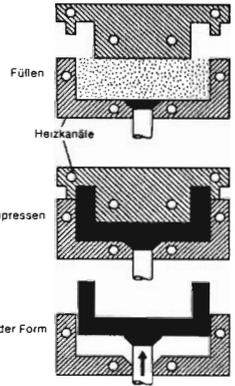
Beschichten



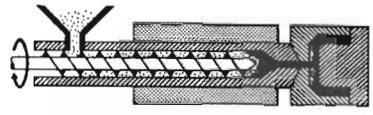
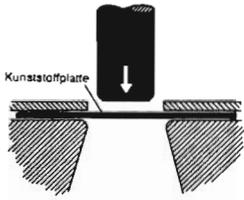
Negativverformung durch Vakuum



Folienziehkalender



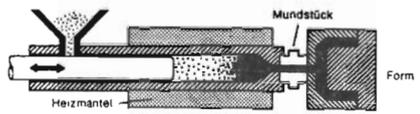
Pressen



Spritzgießen mit Schnecke



Tiefziehen



Spritzgießen mit Kolben

Bild 36: Verfahren der Kunststoffverarbeitung [232].

Auf dem Gebiet der faserverstärkten Kunststoffe (siehe auch 3.4.2.4) wird an der Verbesserung der Oberflächen und der Verringerung von Takt- bzw. Aushärtezeiten gearbeitet. Während bei Spritzgußteilen die Oberflächengüte in der Regel der des Werkzeugs entspricht, ist bei SMC- und RIM-Teilen der Neigung zu Lunkern und Einfallstellen Rechnung zu tragen, insbesondere bei nachfolgenden Glanzlackierungen.

Die Lackierung ist ohnehin bei den meisten Kunststoffen aufwendiger als bei Stahl und Aluminium. Thermoplastische Kunststoffteile lassen sich in der Regel nicht an der Karosserie mitlackieren, während dies bei verstärkten Duromeren wie SMC schon Stand der Technik ist. Thermoplaste, die mitlackiert werden können, befinden sich jedoch vielerorts in der Entwicklung, da man sich von derartigen Spritzgußteilen auch wirtschaftliche Vorteile verspricht. Ob sie jedoch den üblichen hohen Temperaturen von 140 bis 200° standhalten, ist fraglich; Lacksysteme mit geringeren Einbrenntemperaturen (80° z. B. bei PUR-Lacken) sind ebenfalls in der Entwicklung und werden hier für Änderungen sorgen, sobald über eine Reduzierung der Zahl der unterschiedlichen Werkstoffe eine Vereinheitlichung der Grundiersysteme erreichbar ist [1] (siehe auch 3.4.2.3).

Die Montage von Kunststoffteilen ist bei Verwendung formschlüssiger Verbindungen problemlos und ausgereift. Die bei Metallteilen kostengünstigeren und leichter automatisierbaren Schweißverfahren sind jedoch meist nicht anwendbar, da sich nur sich ähnliche Thermoplaste verschweißen lassen.

Das Verkleben von Bauteilen aus Kunststoffen ist auf vielfältige Art möglich und führt zu guten Ergebnissen; diese hängen jedoch stark von der Sorgfalt bei Reinigung und Vorbereitung der zu verklebenden Flächen ab. Entwicklungen sind vielerorts im Gange, durch Automatisierung die noch meist zu hohen Kosten zu senken und weitere Klebverfahren großserienfähig zu machen.

Die Fertigungs- und Montageverfahren von Leichtmetallen sind bei Blechteilen im wesentlichen die gleichen wie bei Stahl, müssen jedoch den entsprechenden Materialeigenheiten teilweise recht aufwendig angepaßt werden. Rationalisierungen gegenüber Stahl sind kaum möglich, sieht man von der aus der leichteren Umformbarkeit resultierenden Verwendbarkeit schwächer dimensionierter Werkzeuge und geringerem Verschleiß ab. Bei verschiedenen Gußverfahren sind Leichtmetalle im Vorteil, ebenso durch das Strangpressen bzw. generell beim Kaltumformen wegen der geringeren aufzubringenden Kräfte und höheren Werkzeugstandzeiten. Druckguß ermöglicht auch geringere Wandstärken und damit weiter vermindertes Gewicht, allerdings bei höheren Investitionen und Fertigungsrisiken.¹

Beim Übergang von Stahl- zu Aluminiumbauteilen der Karosserie ist einigen Fertigungsproblemen deutlich mehr Beachtung zu schenken:

Bei der Werkstoffauswahl ist zu berücksichtigen, daß es bei verschiedenen umformtechnisch günstigen Legierungen neben der Kaltverfestigung im Preßwerkzeug auch zu einer Warmaushärtung beim Lackieren kommen kann, wodurch sich die Eigenspannungsverhältnisse im Bauteil ändern. Der dann auftretende Verzug läßt sich u. U. durch Vorsehen von Sicken oder größeren Aufwand beim Fixieren vor dem Schweißen verringern.

Der höhere Ausdehnungskoeffizient erfordert größere Fugenbreiten und Toleranzen, damit Relativbewegungen z. B. in der Lackierstraße aufgefangen werden können.

Der niedrigere E-Modul hat nicht nur Auswirkungen auf die Dimensionierung der Bauteile, sondern erfordert auch größere Toleranzen wegen der anderen Rückfederungseigenschaften beim Umformvorgang. Die Rückfederungsschwankungen sind etwa dreimal größer als bei Stahlblech und stellen daher erheblich höhere Anforderungen an den Halbzeuglieferanten in bezug auf Chargengleichheit.²

¹ Siehe auch [2], [114], [233], [234], [235].

² Siehe auch [152], [153].

3.4.2 Spezielle Aspekte

3.4.2.1 Kleben

Bei Diskussionen über neue Fertigungstechnologien wird die Sprache meist bald auf das Kleben kommen. Dies ist zwar ein lange bekanntes, durch den zunehmenden Einsatz von Robotern aber auch besonders zukunftssträchtiges Verfahren. Die klassischen Verbindungstechniken im Automobilbau, das Schrauben und das Schweißen, werden zunehmend dadurch ergänzt, da der hohe manuelle und zeitliche Aufwand durch Einführung neuer Verarbeitungsverfahren und Klebstoffe gesenkt und die Konstanz der Qualität verbessert werden konnte. Schon 1958 wurden beim Ford-Modell P3 Motorhauben, Kofferraumdeckel, Dach und Seitenspiegel (mit PVC-Plastisolen) in der Großserie geklebt. Neben den PVC-Klebstoffen treten heute zunehmend heißhärtende Epoxidharze hinzu, besonders in Bereichen mit hohen Festigkeitsanforderungen. Für Aluminium und Kunststoffe werden auch Elastosole auf Kautschukbasis oder 2-Komponenten-Polyurethane sowie Polyacrylate verwendet [1].

Die Klebstoffe lassen sich in drei Klassen einteilen [135]:

Kondensationsklebstoffe werden kalt aufgebracht und zum Abbinden meist Druck und einer kurzen Wärmeeinwirkung ausgesetzt, wodurch die chemische Reaktion der Kondensation abläuft; sie kann auch durch Zugabe von Härtern angeregt werden.

Polymerisationsklebstoffe binden durch Lösungsmittelverdunstung ab. Bei nichtporösen Fügeteilen muß eine bestimmte Ausdünstungszeit abgewartet werden; bei hohen Festigkeitsanforderungen können oft Vernetzer zugegeben werden.

Polyadditionsklebstoffe härten ohne Freiwerden von Spaltprodukten durch eine Additionsreaktion aus. Der feste Klebstoff wird bei erhöhter Temperatur flüssig und härtet nach längerer Zeit aus.

Das Kleben von Bauteilen, insbesondere aus verschiedenen Werkstoffen, macht Differentialkonstruktionen fast beliebiger Zusammensetzung möglich. Damit kann oft eine Funktionskombination mit geringem Aufwand erfolgen oder zu Mikro- oder Leichtbauweisen führen. Es kann aber auch möglich sein, durch die Fertigung mehrerer kleiner, einfacherer Teile, die dann geklebt werden, Fertigungsvorteile zu erreichen.

Der realen Durchführung von Klebungen stehen in der Praxis jedoch oft Schwierigkeiten entgegen. So sind spezielle, zum Teil aufwendige Oberflächenbehandlungen nötig, um dauerhafte Verbindungen zu erreichen. Chemische Verfahren wie Beizen oder Ätzen ergeben bei Aluminium, Magnesium, Kupfer, Glas oder keramischen Werkstoffen höhere Bindefestigkeiten, beim Verkleben von Stahl und Eisen haben sich dagegen die mechanischen Vorbehandlungen bewährt. Die Verwendung von Haftvermittlern ist ebenfalls üblich. Bei Kunststoffen müssen ein eventuelles Anquellen oder unerwünschte chemische Reaktionen durch eindiffundierende Stoffe beachtet werden.

Die bei konstruktiven Klebungen wegen der großen Verbindungsfestigkeit meist nötigen Reaktionskleber weisen oft lange Aushärungszeiten auf, was mit einer Massenfertigung schlecht in Einklang zu bringen ist. Reaktionskleber mit kurzen Aushärzeiten (bis 10 s) weisen auch kurze Topfzeiten auf, so daß ihre Verarbeitung meist nur mit maschineller Mischung und Aufbringung möglich ist. Schwierig können sich weiterhin die Kleberaufbringung und die Maßnahmen zum Zusammenfügen erweisen. Auch die Frage der Kontrolle, die klären soll, ob nun eine auf Dauer einwandfreie Klebung vorliegt, ohne diese Klebung zu zerstören, ist nur partiell gelöst [236].

Eine großseriengerechte Technologie stellt hohe Anforderungen an die Werkstoffe; so sind z. B. allein im Karosserie-Rohbau zu erfüllen [1]:

- Der Klebstoff muß Öl und Fett aufnehmen können, um auch auf ungereinigten Blechoberflächen zu haften.
- Der Klebstoff muß Spaltbreiten von bis zu mehr als 5 mm ausfüllen, ohne herauszufließen.
- Der Klebstoff muß unempfindlich sein gegen die nachfolgende Behandlung wie Entfetten, Phosphatieren, Grundieren, Lackieren.
- Der Klebstoff muß Temperaturen bis über 200°C in den Lacköfen aushalten können.
- Der Klebstoff muß mindestens 6 Monate ohne störende Veränderungen lagerfähig sein.
- Der Klebstoff muß innerhalb der Zeiten der Arbeits-takte verarbeitbar sein.
- Der Klebstoff muß mit den Temperaturen der Grundier- und Lackieröfen aushärten.
- Der Klebstoff muß im gesamten Nutzungsbereich eines Autos, etwa von -40° bis +80°C, funktionsfähig sein.
- Die Klebeverbindungen müssen eine hohe Dauerstands-festigkeit aufweisen.
- Der Klebstoff muß beständig sein gegen Alterung und gegen den Einfluß korrosiver Stoffe.
- Sichere Adhäsion auf unterschiedlichen Blech- und Ölqualitäten auch nach Feuchtlagerung, mit Schweißwasser und im Salzsprühstest muß gewährleistet sein.
- Es dürfen feine Deformationen bei großflächigen, wenig verformten Außenblechen durch Markierung von Klebestellenauftreten; Abstimmung von Festigkeit und Elastizität der Klebstoffschicht.

Für die störungsfreie Verarbeitung sind wichtig:

- Keine abrasiven Füllstoffe.
- Keine Verstopfung in Auftragsautomaten.
- Gutes Fließverhalten in Pumpen und Rohrleitungen.
- Kein Nachtropfen oder Fadenziehen.

Mit der Entwicklung spezieller Klebstoffe kann sich dieses Verfahren heute in die vorgegebenen Produktionsabläufe einfügen. Diese Vielzahl von Bedingungen, die erfüllt

werden müssen, läßt jedoch die Hemmnisse erkennen, die dem verstärkten Einsatz von Klebeverfahren entgegenstehen. Die zunehmende Automatisierung, insbesondere die Verwendung von Auftragsrobotern und mechanisierte Reinigungsverfahren, schaffen günstigere Voraussetzungen; nicht zuletzt auch, weil viele Klebstoffe und Lösungsmittel physiologisch nicht unbedenklich sind. Als Fügeverfahren allein ist das Kleben jedoch noch relativ teuer und mit höheren Fertigungsrisiken behaftet als z. B. Punktschweißen. Dazu kommt der Zeitfaktor, da Klebeverbindungen vielleicht zum eventuell notwendigen Ausrichten noch eine kurze Zeit nachgiebig sein sollen, danach aber möglichst schnell eine hohe Tragfähigkeit erreichen, d.h. aushärten sollen. Mit Klebe-Dicht-Massen eingeklebte Windschutzscheiben z. B. können über Stunden nicht belastet werden, Epoxidharzkleber dagegen schon nach 3 bis 5 Minuten bei Temperaturen zwischen 65 und 120°C.¹

In der Regel soll der Klebstoff weitere Aufgaben übernehmen, die Einsparungen anderer Teile ermöglichen oder Funktionsvorteile erbringen. Als Beispiel sei das Verkleben von Glasscheiben genannt, wodurch die herkömmlichen Gummidichtungen und Klemmleisten eingespart, Dicht- und Toleranzprobleme gemindert und das Gewicht verringert werden kann. Von großer Bedeutung ist das Kleben als zusätzlicher Korrosionsschutz an Bördelkanten oder zur Vermeidung von Schweißpunkten im Sichtbereich. Die Bleche der Aluminium-Türen des Forschungs-Pkws UNI-CAR z. B. sind geklebt (PUR-Klebe-Dicht-Masse), genietet und gebördelt, aber nicht geschweißt. Die Entwicklungsmöglichkeiten sind hier kaum zu übersehen; so werden Zahlen genannt von 500 bis 12000 verschiedenen Klebstoffen auf dem Markt.¹

¹ Nach [1]; siehe auch [2], [141].

3.4.2.2 Punkt-Schweiß-Kleben

Dieses Verfahren bietet neben der Dichtfunktion des Klebstoffes über die Erhöhung der Belastbarkeit der Schweißverbindungen verschiedene Vorteile. Durch die Mitwirkung des Klebstoffes an der Lastaufnahme besteht die Möglichkeit, die Punktquerschnittsfläche zu verringern und den Punktabstand zu erhöhen. Dadurch ergibt sich eine geringere Wärmeeintragung in die zu verbindenden Teile und damit u. U. geringerer Verzug bzw. Richtaufwand. Weitere Vorteile sind die Verringerung der Spaltkorrosion und die Möglichkeit, flüssigkeits- und gasdichte Verbindungen herzustellen.¹

Das Punkt-Schweiß-Kleben soll die Vorteile der beiden Verfahren vereinigen, übernimmt jedoch zwangsläufig auch eine Reihe von deren Nachteilen. Klebeverbindungen können durch die Schweißpunkte sofort fixiert werden, bevor der Klebstoff allein tragfähig ist, alle anderen Arbeitsgänge in Vorbereitungs- und Auftragsphase bleiben jedoch im Umfang unverändert bestehen. Punktschweißverbindungen werden durch den Klebstoff abgedichtet und belastbarer, in der Schweißzone selbst stört der Klebstoff eher und darf auch keine aggressiven Überhitzungsprodukte freisetzen, da die gewünschte Korrosionsschutzwirkung ausbleibt bzw. neue Problemzonen geschaffen werden. Im Anfangsstadium des Verfahrens sind derartige Effekte durchaus aufgetreten; PVC-Kleber z. B. sind wegen der Cl-Anteile ungeeignet. Einige Pyrolyseprodukte sind arbeitsmedizinisch nicht unbedenklich.

In [238] sind einige Eigenschaften von Punktschweißklebeverbindungen und einfachen Punktschweißverbindungen bei Aluminiumblechen verglichen worden. Die statische und dynamische Belastbarkeit konnte durch dieses Verfahren gesteigert werden, reine Klebeverbindungen zeigten aber

¹ siehe auch [237].

mit Ausnahme sehr elastischer Klebstoffe meist gleiche Ergebnisse. Im Dauerschwingversuch können reine Klebeverbindungen größere Festigkeiten erbringen. Das bedeutet, daß bei einem Klebstoffversagen aufgrund von Alterungs- oder sonstigen Einflüssen die Schweißpunkte (anders als bei Stahlblech) keine Sicherungsfunktion übernehmen. Bei statischer Dauerbelastung bieten die Schweißpunkte Vorteile, da das Kriechen des Klebstoffes unterbunden wird. Wenn die Schweißverbindungen aber allein in der Lage sind, die Belastung aufzunehmen, wird der mit dem Kleben verbundene zusätzliche Aufwand in Frage gestellt. Der Vorteil der schnellen Fixierung der Klebeverbindung durch die Schweißpunkte kann auch durch andere Verfahren wie Bördeln oder örtliche Verklammerungen erreicht werden, aber unabhängig von der Oberflächenbeschaffenheit der Teile.

3.4.2.3 Lackierung

Fast alle Fahrzeugteile aus Stahlblech müssen nach der Formgebung bzw. dem Zusammenbau einer Oberflächenbehandlung unterzogen werden, um einen ausreichenden Korrosionsschutz und das gewünschte Aussehen zu erhalten. Die Lackierung besteht meist aus drei bis sieben Schichten. Dabei werden die Teile bzw. die Karosserie gereinigt und anschließend phosphatiert. Danach wird im allgemeinen eine Elektrotauchgrundierung aufgetragen. Der Trend geht dabei weg von positiv geladenen Karosserieblechen zur Kathaphorese, bei der es zu einer kathodischen Abscheidung des Grundiermaterials kommt. Als Vorteile werden geringerer Materialverbrauch bei verbesserter Beschichtungsqualität angeführt [2]. Die Grundierungen werden anschließend in der Regel im Spritzverfahren mit einem Füller und dann mit Decklack überzogen.

Die konventionellen Lacksysteme sind in Europa meist auf Alkyd-Melamin-Basis aufgebaut, während in Übersee mehr Acrylharzlacke verwendet werden. In der Entwicklung für die Anwendung am Pkw befinden sich Pulverlacke, wasserlösliche Lacke und lösungsmittelarme Lacke. Die Entwicklungsziele sind dabei:

- Reinhaltung von Luft und Abwasser,
- Reduzierung des Energieverbrauchs,
- Verkürzung der Spritzzeiten,
- Steigerung der Lackierungsqualität.

Bei den Pulverlacken soll die farbliche Feinabstimmung schwieriger sein, während die Lösungsmittelfreiheit für eine hohe Umweltfreundlichkeit spricht. Die Wasserlacke werden vorraussichtlich bevorzugt für Füller eingesetzt werden, da die Qualität für Decklacke nicht ausreicht. Die günstigsten Entwicklungsaussichten dürften die High-Solid genannten lösungsmittelarmen Lacke haben. Diese Systeme lassen sich mit begrenzten Modifikationen auf konven-

tionellen Lackieranlagen verarbeiten, stellen aber reduzierte Anforderungen an die Abluftreinigungsanlagen bei geringerem Energieverbrauch für das Einbrennen (Bild 37, siehe auch Bild 151 im Anhang, Vergleich des Lösungsmittelgehaltes verschiedener Lacksysteme).¹

Kriterien	High Solids	Wasserlacke	Pulverlacke
Harzentwicklung	normal	normal	schwieriger
Verfügbarkeit der Bindemittel	breite Palette	breite Palette	engere Palette
Herstellungsverfahren der Lacke	normal	normal	schwierig
Änderung der Verarbeitungsgeräte	nein	teilweise	ja
Anteil organischer Lösungsmittel	20 - 30 %	2 - 10 %	0 %
Einbrennenergie	geringer als konv.	höher als konv.	merklich geringer
Nachverbrennung notwendig	abhängig v. Anlag.	abhängig v. Anlag.	nein
Abfallaufbereitung	wie konventionell	teilweise schwierig	keine Probleme
Einsatzbereiche	Grund- u. Decklack	Grundier., Füller	Grundier., 1-Schichtl.

Bild 37: Gegenüberstellung von High-Solid-, Wasser- und Pulverlacken [2], [114], [239].

Die Lackierung von Kunststoffteilen insbesondere für die Außenanwendung ist ein häufig wiederkehrendes Problem. Mit herkömmlichen Alkyd-Melamin-Systemen wäre es möglich, modifizierte teilkristalline Thermoplaste (siehe 3.1) zu

¹ Siehe auch [2], [114].

lackieren und bei 140 bis 160° einzubrennen, deren Schlagzähigkeit leidet jedoch durch den harten Lack. Neue Lacksysteme, z. B. die 2-Komponenten-PUR-Lacke, werden sich günstiger verhalten, da sie elastischer sind, bei 80 bis 120° aushärten (siehe auch 2.4.1) und somit auch Energie sparen; sie haben sich aber bisher nicht durchsetzen können. Die Umstellung der Lackierstraßen setzt voraus, daß Art und Eigenschaften von an der Karosserie mitlackierten Kunststoffen festgeschrieben werden bzw. wenig variieren, da die Lacksysteme dementsprechend eingestellt werden müssen. Solange sich kein neues Material durchsetzen kann, werden die Lackierstraßen weiterhin primär auf Stahlblech ausgelegt. Die örtlich weit über 200° C liegenden Temperaturen in den konventionellen Anlagen verhindern so bis auf weiteres das Mitlackieren von Kunststoffteilen.¹

Die Frage, ob eine Pigmentierung oder eine Lackierung des Kunststoffes günstiger ist, hängt von Faktoren wie dem Produktionsvolumen, Nachbesserungsmöglichkeiten oder den Wanddicken ab. Eine Lackierung ist in der Regel vorzuziehen, wenn Regenerate bzw. preiswertere gefüllte Stoffe verwendet werden oder nur geringe Stückzahlen vorliegen [103].

Die Lackierung von Kunststoffen erfordert zwar keine grundsätzlich neue Technologie, es ist aber unbedingt erforderlich, die Lacksysteme sorgfältig auf den verwendeten Kunststoff abzustimmen. So dürfen die im Lack vorhandenen Lösungsmittel den Kunststoff nicht angreifen, mitunter ist ein geringes Quellen jedoch erwünscht, wenn damit die Haftung erhöht werden kann. Nach dem Aushärten dürfen dann aber keine Spannungen zwischen Lack und Kunststoff entstehen; die Elastizitäten müssen also angepaßt werden. Umgekehrt dürfen aus dem Grundmaterial diffundierende Weichmacher den Lack nicht angreifen oder beim Einbrennen verdeckte Poren aufplatzen lassen.

¹ Siehe auch [1], [10], [163], [235], [239], [240].

Ein häufig auftretendes Oberflächenproblem von SMC, Preßteilen aus Glasfaserharzmatten, läßt sich wie folgt erklären [1]:

Beim Preßvorgang lassen sich kleine Fehlstellen wie Lunker oder Gasblasen praktisch nicht vermeiden. Diese Fehler sind an der Oberfläche des Preßteils nicht zu erkennen. Wird das Teil nun für die nachfolgende Lackierung grundiert, diffundieren geringe Mengen des Lösungsmittels in die Fehlstellen und bringen diese beim Einbrennvorgang zum Aufplatzen. Wird das Teil nun noch einmal gespachtelt und geschliffen, verschließt man zwar die entstandenen Krater oberflächlich, beim Einbrennen des Decklacks brechen die Poren jedoch erneut auf.

Abhilfe bringen hier Maßnahmen zur Verminderung von Zahl und Größe der Poren, gleichmäßigere Gewebeeinlagen und weitere Füllstoffe ("Low Profile", LP) oder das In-Mould Coating (IMC) bzw. Lackfolien. Voraussetzung ist dabei eine gasdichte Versiegelung der Oberfläche durch die in das Werkzeug gespritzte oder eingelegte Grundierung und die Möglichkeit des weitgehenden Verzichts auf Trennmittel. Das In-Mould Coating läßt sich auch bei RIM- und RRIM-Artikeln aus PUR gut zur Oberflächenverbesserung anwenden.

Die Spritzkabinen der Lackieranlagen sind ein typisches Beispiel für das Vordringen von Robotern in der Fahrzeugindustrie. Da Farbnebel und Lösungsmitteldämpfe gesundheitsschädlich sind, fallen bei Einsatz von Maschinen hier physiologische Gefährdungspotentiale weg. Neben höherer Produktivität zieht dies verringerte Aufwendungen nach sich. Allerdings müssen die Abluftreinigungsanlagen auf dem gleichen Standard bleiben. Die Lösungsmitteldämpfe können z. B. durch Nachverbrennung, Kondensations- oder Ab- bzw. Adsorptionsanlagen beseitigt werden. Bei letzteren muß allerdings darauf geachtet werden, daß nicht aus der Abluft- eine Abwasserbelastung wird.

3.4.2.4 Faserverstärkung

Für den Einsatz im Kraftfahrzeug werden heute überwiegend glasfaserverstärkte Kunststoffe (heute häufig, wenn auch nicht nach DIN 7728, allgemein unter Faserverbundwerkstoffe (kurz FVW) eingeordnet) verwendet. Sie zeichnen sich durch ein gutes elastisches Verhalten und Festigkeiten in der Größenordnung von Stahl aus bei einem ca. um 75 % geringeren Gewicht, erreichen jedoch nur 5 bis 15 % des E-Moduls. Als aussichtsreich anzusehen sind ferner die von den mechanischen Eigenschaften her günstigeren Aramid-, Kohle- und deren Hybridfaserwerkstoffe, die aber im Preis derzeit teilweise erheblich über den Glasfaserwerkstoffen liegen und wohl auch mittelfristig nur bei speziellen Anforderungen in Frage kommen. Bild 38 zeigt den Kenntnisstand bei der Verarbeitung von FVW, wie er sich nach Meinung der Fahrzeughersteller heute darstellt.

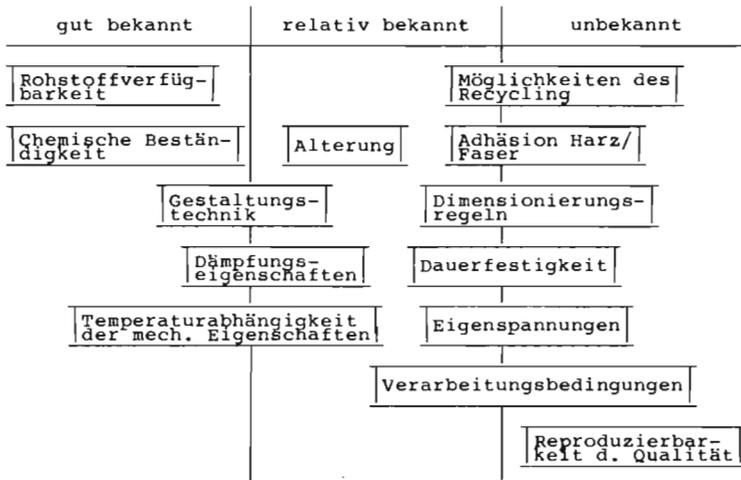


Bild 38: Kenntnisstand verschiedener Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen ([141], ähnlich [116]).

Die Vorteile der FVW gegenüber den Metallen sind [136]:

- geringes Gewicht
- hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit
- gute Dämpfung von Schwingungen
- weitgehende Gestaltungsfreiheit
- gute Korrosionseigenschaften

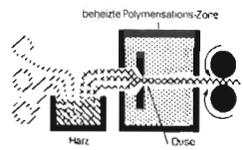
Trotz der guten Korrosionsbeständigkeit ist es ratsam, die FVW mit einer Schutzlackierung zu versehen, um das Eindringen von Wasser und den Einfluß von UV-Strahlungen zu mindern. Für die Anwendung im Großserienfahrzeug sind hauptsächlich Werkstoffe aus preiswerten Fasern und Harzen wie z. B. GF-UP (glasfaserverstärkte ungesättigte Polyester) interessant, sowie Verarbeitungsverfahren, die geringe Taktzeiten bei großen Stückzahlen erlauben wie z. B. die Warmpreß-, Spritzguß- oder die Reaktions-Injektionsverfahren (siehe die Bilder 39, 40 und 146). Die Handlaminier- und die Niederdruckverfahren werden auch in Zukunft nur Kleinserien vorbehalten bleiben, bei denen sich hohe Werkzeuginvestitionen nicht amortisieren würden.

Verfahren	Verstärkungsart	Zeitaufwand
Handlaminierverfahren	Matten, Gewebe, Rovings	groß
Kaltpressen	Matten, Gewebe, Rovings	mittel
Warmpressen von Harzmatten (SMC)	Matten, Rovings	mittel
Warmpressen von Preßmassen (BMC)	geschnittene Fasern	gering
Wickeln	Rovings, Bänder, Endlosfasern	groß
Ziehverfahren	Rovings, Gewebe	gering
Injektionsverfahren	Rovings, geschnittene Fasern	mittel

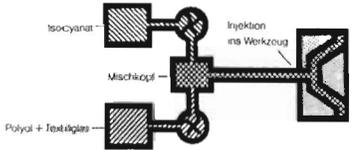
Bild 39: Übersicht über die wichtigsten Verstärkungsarten von Faserverbundwerkstoffen [136].

Verarbeitungsverfahren:

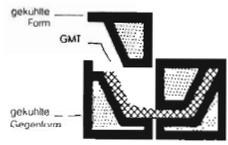
Profiliziehverfahren



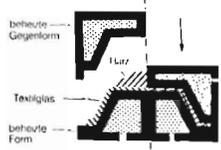
Injektion von verstärkten Reaktionsschaumstoffen (RRIM)



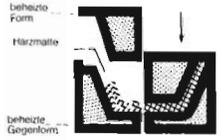
Tiefziehen von glasmattenverstärkten Thermoplasten (GMT)



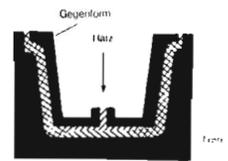
Naßpressen



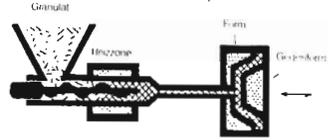
Verpressen von Harzmatten (SMC)



Injektionsverfahren



Spritzgießen von verstärkten Thermoplasten



Spritzgießen von UP-Harzpreßmassen (BMC)

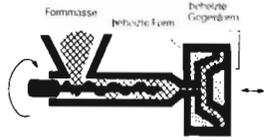


Bild 40: Verarbeitungsverfahren für die faserverstärkten Kunststoffe [1].

Das vornehmlich für flächenhafte Teile geeignete SMC (Sheet Moulding Compound) wird durch Warmpressen von Harzmatten hergestellt. Hier gibt es sehr viele Variationen, die sich vornehmlich in der Art der verwendeten Glasfaserwerkstoffe unterscheiden. Entwicklungsziele sind dabei fehlerfreie Oberflächen, Beeinflussung der Festigkeit nach Beanspruchungsrichtungen, gute Formbarkeit. Die Faserlängen liegen dabei zwischen 25 und 75 mm. Beim XMC werden kontinuierliche Fasern gewickelt, was hohe Fasergehalte und sehr gute mechanische Eigenschaften ermöglicht, da der E-Modul der Glasfasern selbst erheblich über dem der Fertigteile liegt (Bild 146 im Anhang gibt weitere Erläuterungen zu den Verarbeitungsverfahren).¹

Für die Taktzeiten bei der Verarbeitung ist der Zustand der Harzmatten entscheidend, da einerseits ein vorzeitiges Abbinden verhindert werden muß, das Material aber dennoch kurze Reaktionszeiten zeigen soll. Durch geeignete Vorbehandlung des Halbzeugs und Ausbildung der Glasmatten bzw. der Zusätze (mineralische Füllstoffe) kann die Oberflächengüte ("Low Profile") und Verarbeitungsgeschwindigkeit des SMC verbessert werden. Hierbei macht man sich die Eigenschaft mancher Polyesterharze zunutze, nach Zusatz geringer Mengen z. B. von Magnesiumoxyd einen Anstieg der Viskosität zu zeigen und dabei auch ihre Klebrigkeit zu verlieren. Tränkt man das Glasfasermaterial mit dem so behandeltem Harz, entstehen nach dem Eindicken die sogenannten Prepregs, die ausreichend hantier- und lagerfähig sind.²

Beim BMC (Bulk Moulding Compound), einem Spritzpreßverfahren, werden Preßmassen bzw. härtbare Formmassen als Halbzeug verwendet. Darunter versteht man harzartige Duromere als Bindemittel mit den verschiedensten Füllstoffen und kleinen Zusätzen von Farbstoffen, Gleit- und Trennmitteln. Die Harze härten durch Polykondensation (z. B.

¹ Siehe auch [136], [241].

² Siehe auch [242], [243].

Aminoplaste) oder Polymerisation (z. B. Polyester) aus. Fertigungstechnisch günstiger ist der letztere Vorgang, da keine Kondensationsprodukte abgespalten werden, die hohe Preßdrücke und längere Taktzeiten erfordern. Beachtet werden muß die mögliche Orientierung der Fasern beim Eingeben der Massen in die Form entlang der Fließrichtung, die unterschiedliche Schwindung mit Eigenspannungen, anisotrope mechanische Eigenschaften und Oberflächenbeeinträchtigungen zur Folge hat.¹

Eine Variation stellt das ZMC dar, bei dem durch die Ausführung der Maschinen bedingt längere Glasfasern (bis ca. 25 mm) eingebracht und die mechanischen Eigenschaften günstig beeinflußt werden können. Die Vorteile gegenüber dem SMC liegen in den größeren Automatisierungsmöglichkeiten, der besseren Verfahrenskontrolle, besseren Oberflächen und im Materialpreis, Nachteile gegenüber dem SMC in den mechanischen Werten und dem höheren Investitionsaufwand für die Maschinen.²

Bei den thermoplastischen und duromeren Spritzguß- bzw. Reaktionsgußwerkstoffen werden Kurzglasfasern, auf ca. 2 mm Länge geschnitten oder gemahlen, zur Verstärkung eingesetzt; häufig gemeinsam mit weiteren mineralischen Füllstoffen. Die Thermoplaste werden in der Regel als Granulat verarbeitet, das durch Aufheizen plastifiziert und in das Werkzeug gespritzt wird. Dies ist zur Zeit das rationellste und schnellste Verarbeitungsverfahren. Ein Vertreter dieser Thermoplaste ist z. B. das PA 6, das wegen guter mechanischer und thermischer Eigenschaften auch für die Außenanwendung großflächiger, in der Karosseriegrundfarbe lackierter Karosserieteile empfohlen wird; bisher fast ausschließlich eine Domäne der Preßteile und Laminatete. Auch hier können die durch die Orientierung der Fasern in Fließrichtung Oberflächenprobleme auftreten.³

¹ Siehe auch [242], [243].

² Siehe auch [244].

³ Siehe auch [245].

Das am weitesten verbreitete nach dem RRIM-Verfahren (Reinforced Reaction Injection Moulding) verarbeitete Duromer ist das PUR, am Kraftfahrzeug meist für Polster, Spoiler, Schutzleisten oder flexible Stoßfängerabdeckungen (bzw. Soft-Faces) verwendet. Dieses Duromer liegt in Form von zwei flüssigen Komponenten vor, wobei der einen das Textilglas beigefügt ist. Die Komponenten werden in einem Mischkopf vermengt und in die Form injiziert. Geringe Raumgewichte (ca. 0,05 bis 0,35 kg/dm³) ergeben Schaumstoffe mit sehr variablen Eigenschaften (Polster, Verkleidungen, Energieaufnahmemedien, meist jedoch ohne Faserverstärkung), bei hohen Raumgewichten (ca. 0,7 bis 1,1 kg/dm³) und entsprechend modifizierten Ausgangskomponenten ist die Schaumkonsistenz am aufgeschnittenen Fertigteil (z. B. Karosserieaußenteil, Gehäuse) kaum mehr zu erkennen.

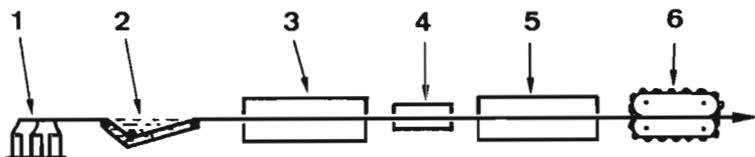
Beim PUR sind die erforderlichen Werkzeuginvestitionen wegen niedrigerer Drücke geringer, die Gefahr von Oberflächenfehlern und Verzug der Teile ist jedoch größer. Für Großserienprodukte wird daher zunehmend der Spritzguß bevorzugt, wobei allerdings aus Preisgründen auch Thermoplaste ohne oder mit anderen Füllstoffen als Glasfasern im Wettbewerb mit dem Polyamid stehen wie z. B. PP oder ABS.

Bei Einsatz von GFK im Karosseriebereich treten Schwierigkeiten auf, wenn Teile ersetzt werden, die zur Energieaufnahme beitragen sollen. Sobald die elastischen Deformationsmöglichkeiten erschöpft sind, splittert das Material und erlaubt somit kein gezieltes Knautschverhalten wie die Metalle. Abhilfe in Form von Blecheinlagen, energieabsorbierenden Schaumfüllungen oder dergleichen sind zwar vorstellbar, erhöhen jedoch wieder Gewicht und Aufwand.

Vielversprechende Anwendungsmöglichkeiten für GFK ergeben sich bei Ausnutzung der guten elastischen Eigenschaften bei der Konstruktion von Federn und Biegeträgern für Stoßfänger. Speziell die Ausführung von Blattfedern ver-

spricht Wirtschaftlichkeit bei geringerem Gewicht, sobald die manuelle Fertigung durch entsprechende neue Technologien abgelöst werden kann. Bild 41 zeigt die automatisierte Herstellung von Blattfedern.

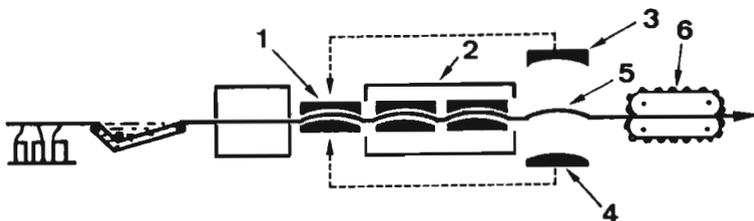
Schematische Darstellung des Strangziehens:



1 Rovings
2 Imprägnierbad
3 Vorreagierofen

4 Härtingsform
5 Härtingsofen
6 Abziehvorrichtung

Schematische Darstellung des Pulforming-Verfahrens:



1 mitlaufende Formen
2 Härtingsofen
3 rücklaufende Form, weiblich

4 dito, männlich
5 fertiges Teil
6 Abziehvorrichtung

Bild 41: Automatisierbare Fertigungsverfahren für GFK-Blattfedern [141].

In Amerika wird bereits ein Sportwagen mit einem Produktionsvolumen von 50 000 Einheiten pro Jahr serienmäßig mit einer im Wickelverfahren maschinell hergestellten Feder (Bild 42) ausgerüstet. Dabei konnte das Gewicht von 20 kg auf 3,4 kg gesenkt werden, die Kosten von 28 \$ auf 20 \$

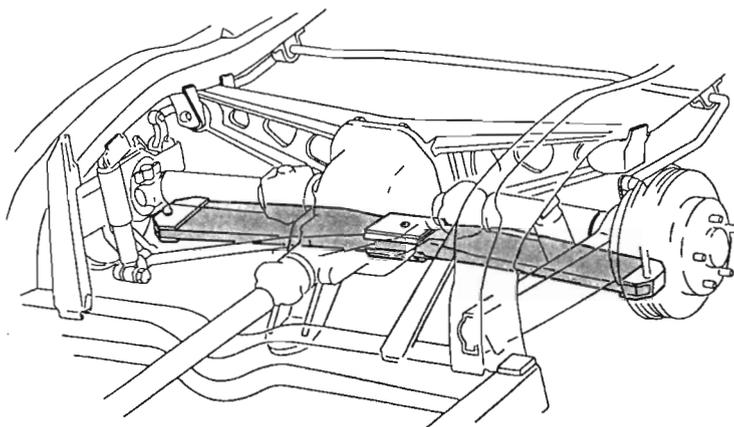


Bild 42: GFK-Blattfeder der GM-Corvette ab 1981 [141].

pro Stück. Um auf europäischen Großserienfahrzeugen verwendet zu werden, ist allerdings die wohl auch mittelfristig schwer durchsetzbare Ablösung der heutigen Fahrwerkskonstruktionen notwendig, da die hier übliche Schraubenfeder nicht mit ebenso positivem Ergebnis durch GFK zu substituieren ist. Das höhere technische Risiko wird die Einführung stärker verzögern als z. B. bei Karosserieteilen. Integrierte Feder-Achs-Kombinationen können aber auch weitere Vorteile wie geringeren Raumbedarf und leichtere Montage bieten, so daß im nächsten Jahrzehnt durchaus mit Neuentwicklungen zu rechnen ist, siehe z. B. die GFK-Hinterachse des Volkswagen-Forschungs-Pkws "Auto 2000". Im Nutzfahrzeuggbereich, der für FVW-Blattfedern schon aus konstruktiven Gründen u. U. schneller zu erschließen ist, werden die Ergebnisse von praxisnahen Dauerfestigkeitsuntersuchungen abgewartet und bei (von den Materiallieferanten ohnehin nicht bezweifelt) positivem Ausgang mittel-

Werkstoff- eigenschaften	Feder- flachstahl	GFK	CFK
Dichte g/cm ³	7,83	ca. 2,0	ca. 1,6
E-Modul kN/mm ² in Faserrichtung	ca. 210	ca. 40	ca. 135
Zugfestigkeit N/mm ²	1400-1600	300-1100	1400-1600
Biegefestigkeit N/mm ²	1500-1900	300-1000	1300-1500
Bruchdehnung in Faserrichtung (%)	7,5	ca. 3,5	ca. 1,2
ca.-Preise Juli 81 in DM/kg	1,20/1,50	Faser 3,50/5,-	Faser 100,-/160,-
		Epoxidharz 10,-/12,-	

Bild 43: Typische Eigenschaften und Preise von GFK, CFK und Federstahl nach [141].

fristig die Markteinführung beobachtet werden können; vorausgesetzt, die derzeit um ca. 50 % höheren Kosten werden zugunsten einer Gewichtersparnis von ca. 70 % in Kauf genommen. 1990 könnte laut einer Umfrage der Federindustrie bei den Fahrzeugproduzenten der Marktanteil der Blattfedern bei 35 % liegen (Mittelwert der Antworten einer Umfrage in [141]). Bild 43 zeigt einen Vergleich der Eigenschaften und Kosten.¹

Für die Anwendung im Pkw problematisch sind die in ihren mechanischen Eigenschaften den Glasfaserwerkstoffen überlegenen Aramid- und Kohlefasern. Sie erreichen zwar relativ hohe Festigkeiten und zumindest bei einigen Ausführungen der C-Fasern auch Elastizitätsmodulwerte in der Stahl-Größenordnung, der hohe Preis läßt sich jedoch

¹ siehe auch [1], [2], [141], [246].

vorerst nicht durch die erzielbaren Gewichtseinsparungen oder andere Vorteile kompensieren. Bei der Aramidfaser ("Kevlar") muß zudem die relativ geringe Druckfestigkeit beachtet werden. Entsprechend belastete Bauteile sind u. U. günstiger aus GFK zu fertigen, sofern dessen Schlagfestigkeit für den speziellen Anwendungsfall ausreicht. Der in Kapitel 2.2 beschriebene Audi Quattro Rallye besitzt eine große Palette von höchstbelasteten aramid-, kohlefaserverstärkten (Mischfaser-) Teilen. Extrem schlagbeanspruchte Komponenten wie z. B. der Ölwan- nenschutz bestehen aus AFK und die schwingungs- und tem- peraturbelasteten Ansaugrohre aus CFK. Die Anisotropie der meisten FVW wird bei derartigen Bauteilen zum Vorteil, da der Gewichtseinsatz der Fasern gezielt erfolgen kann.¹

Die sehr hohe Temperaturbeständigkeit der Kohlefasern er- öffnet den Kunststoffen bisher verschlossene Anwendungs- gebiete. So lassen sich auch Metalle mit ihnen verstärken. Weitere positive Eigenschaften der Kohlefasern sind:

- geringer Wärmeausdehnungskoeffizient,
- geringer Reibungskoeffizient,
- gute Verschleißeigenschaften,
- elektrische Leitfähigkeit,
- gute Ermüdungseigenschaften,
- gute Kriecheigenschaften.

Die Eignung von CFK für höherbeanspruchte Teile wie An- triebswellen, Pleuel, Ölwanen, Motorblöcke usw. ist an Versuchsteilen durchaus nachgewiesen; in Kleinserien (Japan) laufen auch Metallkomponenten wie Kolbenringzonen mit Kohlefaserverstärkung. Wann die Wirtschaftlichkeits- schwelle über Materialpreissenkungen erreicht werden kann, ist aber nicht abzusehen und wird von der Fahrzeugin- dustrie zumindestens mittelfristig nicht erwartet. Der Kilopreis für die Fasern allein ist dabei ebenso wie bei Glas und Aramid ohnehin nicht ausschlaggebend, wenn die

¹ siehe auch [72], [73], [136], [141].

dazugehörige Technologie nicht den Reifegrad derjenigen der Metallverarbeitung erreicht. Bisher scheint eine automobiltechnische Notwendigkeit für die mit Kohlefasern erreichbaren Qualitäten kaum gegeben. Der Einsatz der FWV ist weniger von den möglichen extremen Festigkeitswerten als vielmehr von den Wirtschaftlichkeitskriterien abhängig.¹ (Siehe auch die Bilder 149 und 150, physikalische Kennwerte von Komponenten von Faserverbundwerkstoffen.)

	Verbundwerkstoff	Stahl	Aluminium
Zylinderblock	13 kg	40 kg	22 kg
Zylinderkopf	10 kg	25 kg	17 kg
Kolben	0,25 kg	-	0,5 kg
Kolbenbolzen	0,05 kg	0,14 kg	-
Pleuelstange	0,4 kg	0,8 kg	0,55 kg
Stößel	0,025 kg	0,075 kg	-
Kipphebel	0,15 kg	0,4 kg	0,3 kg
Einlaßventil	0,02 kg	0,1 kg	-
Ventildeckel	0,22 kg	1,8 kg	0,9 kg
Schwungrad	0,9 kg	3,6 kg	1,8 kg
Wasserpumpengehäuse	0,29 kg	1,33 kg	0,44 kg
Ölwanne	0,4 kg	2,7 kg	1,33 kg

Bild 44: Gewichte verschiedener Motorenteile aus Faserverbundwerkstoff und Metall [190].

¹ Siehe auch [1], [2], [187] bis [190], [247] bis [250].

Bild 44 zeigt einige Beispiele [190] für die mögliche Gewichtersparnis mit Faserverbundwerkstoffen gegenüber Stahl- oder Aluminiumbauteilen, wie sie sich nach den Erfahrungen beim Bau eines Kunststoffmotors darstellen.

Die elektrische Leitfähigkeit der Kohlefasern erfordert bei Verbindungen mit Metallen Vorkehrungen gegen Korrosion. Ein weiteres Problem kann bei der Verschrottung von Fahrzeugen mit CFK-Teilen auftreten, da die Fasern schwierig zu verbrennen sind. Ihre Entzündungstemperatur liegt so hoch, daß u. U. beim Verbrennen der Bindemittel nicht genug Energie zum Entzünden der Fasern frei wird und diese mit dem Abgas entweichen bzw. aufgefangen werden müssen.

Ein weiteres, den FVW schon längst erschlossenes Gebiet sind die Mineralfaserverstärkungen wie die Asbestfasern in Reib- und Bremsbelägen. Wegen der nachgewiesenen Erhöhung des Krebsrisikos werden diese in Zukunft verdrängt werden. Ebenfalls längst eingeführt sind die Textilfaser- und Holzfaserformstoffe. Hier sind Substitutionen eher durch Übergang auf andere Füllstoffe zu erwarten, wie z. B. das holzmehlgefüllte PP zeigt. Auf die Beschreibung anderer Faserwerkstoffe wie der keramischen Fasern, der Whiskers usw. soll hier verzichtet werden, da deren Vielfalt in keinem Verhältnis zu den Einsatzwahrscheinlichkeiten im Großserienfahrzeug steht.

4 ANFORDERUNGEN AN WERKSTOFFE UND VERFAHREN FÜR DEN AUTOMOBILBAU - DISKUSSION UND AUSBLICK UNTER VERSCHIEDENEN GESICHTSPUNKTEN

4.1 ANWENDUNGSBEREICHE DER WERKSTOFFE

4.1.1 Materialkennndaten, Verwendbarkeit

- Kunststoff

Von den zur Diskussion stehenden alternativen Werkstoffen haben insbesondere die Kunststoffe ein derart großes Spektrum von Anwendungsbereichen und unterschiedlich geeigneten Grund- und Verbundwerkstoffen, daß eine praktisch unüberschaubare Vielfalt von Verwendungsbeispielen existiert. Unter den Argumenten, die für eine Substitution konventioneller Werkstoffe sprechen, kristallisieren sich jedoch einige Hauptvorteile deutlich heraus. Hier ist zunächst das günstige Verhältnis von Festigkeit und Dichte zu nennen, das Bauteile mit niedrigem Gewicht und damit Kraftstoffersparnis ermöglicht. Da Kunststoffe nicht korrodieren wie Metalle, wird (trotz verschiedener, nicht immer zufriedenstellend gelöster Problempunkte mancher Kunststoffe wie z. B. Alterung, Temperatur- oder UV-Beständigkeit) die praktisch über die gesamte Fahrzeuglebensdauer gewährleistete Haltbarkeit angeführt. Durch hohe Elastizität sind sie geeignet für Polsterungen, Federn, flexible Verkleidungen usw., durch geringe Wärmeleitung und hohen elektrischen Widerstand für Isolierungen. Preisgünstige Massenproduktion und gezielte Eigenschaftsbilder machen die Kunststoffe den Naturprodukten überlegen.¹

In Bild 45 werden die Anwendungstemperaturbereiche der wichtigsten Werkstoffe gegenübergestellt. Es findet sich

¹ siehe auch [38], [113], [251].

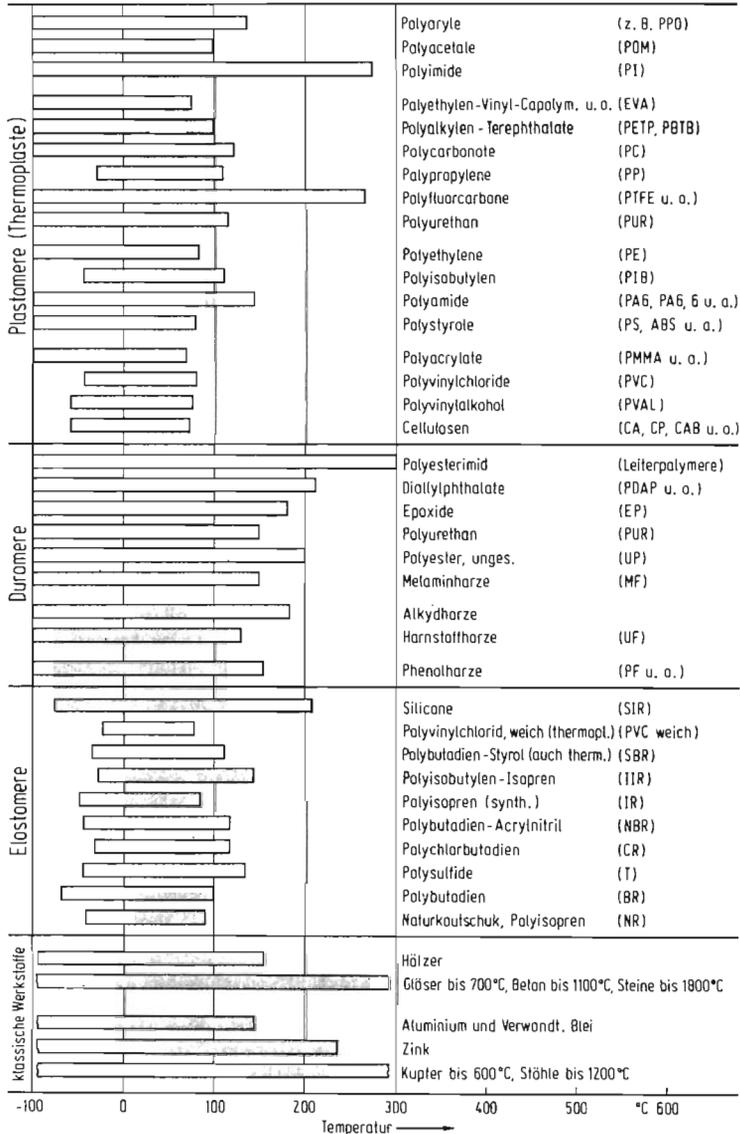


Bild 45: Anwendungstemperaturbereiche der Werkstoffe [108].

eine Reihe von Kunststoffen, deren Obergrenzen z. B. auch über denen von Aluminium oder Zink liegen.

- **Stahl und Eisen**

Funktionsvorteile für Stahl und Eisen ergeben sich hauptsächlich durch hohe Festigkeit, Steifigkeit (E-Modul hundertmal höher als bei gängigen Thermoplasten) und Temperaturbeständigkeit. Dazu kommen die gute Dauerfestigkeit und das Energieabsorptionsvermögen durch die guten plastischen Verformungseigenschaften.¹

- **Aluminium**

Für die Leichtmetalle, üblicherweise Aluminium und Magnesium, spricht im Vergleich zu Stahl das geringere Gewicht. Es ergeben sich auch Vorteile gegenüber den gebräuchlichen Kunststoffen bei Anwendungsmöglichkeiten in größeren Temperaturbereichen. Korrosion äußert sich nicht so wie bei Stahl, ist aber durchaus zu beachten.

- **Andere**

Zink, Blei, Kupfer, Chrom usw. haben spezifische Funktions- bzw. Eigenschaftsvorteile, lassen sich jedoch notfalls durch andere Werkstoffe ersetzen, ohne daß tiefgreifende Bauweisenänderungen erforderlich wären. So ist z. B. bereits heute das Chrom als Auflage diverser Zerteile oder Stoßstangen durch Kunststoffbauteile und Aluminiumleisten ersetzt worden. Kupfer in elektrischen Bauteilen wird sich allerdings kaum verdrängen lassen, ebensowenig als Legierungselement in Gleitlagern und Führungen. Elektrische Leitungen könnten jedoch aus Aluminium gefe-

¹ Siehe auch [2], [114], [147].

tigt werden, was zudem eine Gewichtersparnis bedeutet. Ebenso ersetzbar ist das Blei in den Batterien bei Verwendung von Nickel-Cadmium-Zellen.

Für Werkstoffe wie Kautschuk-Produkte und Silikat-Glas ist die Substitution in bezug auf funktionelle Vorteile alternativer Werkstoffe schwieriger zu begründen. Die Steifigkeit und Kratzfestigkeit von Glasscheiben oder die Eigenschaften von Gummi als Reifenmaterial sind bislang nicht von anderen Stoffen mit vergleichbarer Eignung für den Serieneinsatz erreicht worden.

4.1.2 Gebrauchsqualitäten, Einsatzargumente

Den Fahrzeugkäufer interessieren in der Regel verschiedene Argumente für eine bestimmte Materialwahl nur wenig, wenn das ihm in die Hand gegebene Endprodukt befriedigende Gebrauchsqualitäten hat. Fertigungsaufwand und Materialpreis sind sicherlich nur mittelbar für die Kaufentscheidung maßgebend, indem sie sich im Kaufpreis auswirken; Recyclingfähigkeit oder Ressourcenschonung werden wahrscheinlich eher unter die lobenswerten, aber nicht kaufentscheidenden Faktoren eingestuft werden müssen. Der Fahrzeughersteller hängt aber von derartigen Marketingfaktoren ab, so daß bestimmte, vom Käufer als wichtig erachtete Materialqualitäten bei der Konstruktion berücksichtigt werden müssen, auch wenn diese einer objektiven Bewertung des Fachmanns nicht standhalten würden. Es wird daher kaum zu bestreiten sein, daß z. B. ein die Funktion durchaus voll erfüllender, aus einfachem, durchgefärbtem Kunststoff hergestellter Kotflügel ein Auto heutzutage unverkäuflich macht, wenn die Oberfläche auf der Gegenseite von Verrippungen leichte Einfallstellen zeigt, weniger glänzt und im Hochsommer etwas an Steifigkeit verliert. Die Erfahrung zeigt, daß eher ein nach sechs Jahren durchgerostetes Blechteil akzeptiert wird als ein im Laden nicht ganz so attraktives, aber vom Nutzwert her überlegenes Kunststoffteil. Letztlich wird sich auch der Ingenieur diesem Verhalten (bzw. den Marketingexperten) unterordnen müssen, solange die verbreiteten Anschauungen sich nicht ändern oder der Preis eine Änderung erzwingt. Aber selbst das ist fraglich, wie man an den schlechten Verkaufszahlen verschiedener Ostblockfahrzeuge sieht, die nur halb so viel kosten wie vergleichbare deutsche Pkw.

Ein anderer Weg wäre es, die Kunststoffteile mit höherem Aufwand herzustellen und bewußt deutlich teurer zu machen als Blechteile. Die dadurch herausgestellte Hochwertigkeit überspielt den hohen Preis. Diese Taktik ist zwar bekann-

termaßen mitunter erfolgreich, wird sich aber bei Großserienfahrzeugen nur in Grenzen anwenden lassen. Sobald die Gebrauchsqualitäten ausreichend bzw. wettbewerbsfähig sind, dominieren die Kosten hier bei der Einsatzargumentation.

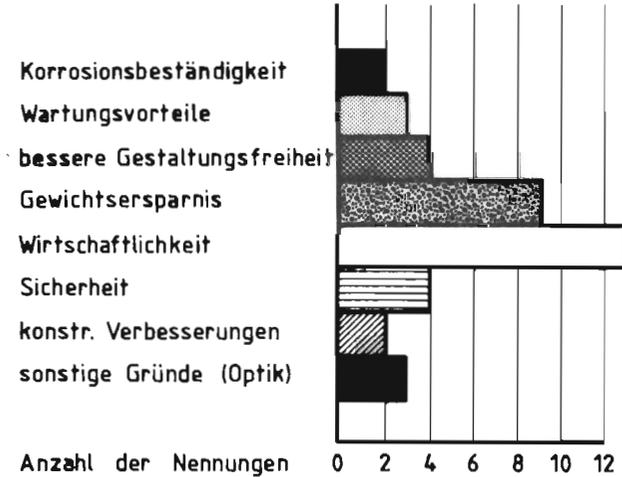


Bild 46: Kriterien für den Einsatz von Kunststoffen in Kraftfahrzeugen [116].

Wie Bild 46 zeigt, rangiert bei den Einsatzkriterien für Kunststoffe die Wirtschaftlichkeit ganz oben. Danach folgt schon die Gewichtersparnis und erst dann folgen mit großem Abstand Gestaltungsfreiheit und Sicherheit. Korrosionsbeständigkeit und konstruktive Verbesserungen bilden das Schlußlicht der Einzelnennungen, während die Optik sogar unter sonstige Gründe eingereiht wurde. Diese Darstellung beruht auf einer Marktstudie eines Stahlherstellers von 1977 und kann in ihrem Ergebnis an einigen Punkten angezweifelt werden, obwohl eigene Fragen an die Industrie durchaus ähnlich beantwortet wurden. Die Spitzenstellung der Wirtschaftlichkeit ist unbestritten. Daß das Aussehen der Teile und konstruktive Verbesserungen so weit hinten rangieren, ist erstaunlich und zumindestens für

Außenteile nicht klar. Daß die Gewichtserparnis und die Sicherheit so weit vorn liegen, ist aber bestimmt auf eine populäre Tönung der Aussagen zurückzuführen. Sicherheit läßt sich bevorzugt dann ohne Schwierigkeiten durchsetzen, wenn sie vom Gesetzgeber verordnet wird, als Verkaufsargument wirksam ist oder ohnehin nichts kostet. Die Gewichtserparnis kann kaum das ausschlaggebende Einsatzargument für den Kunststoff gewesen sein, wenn man die stetige Gewichtszunahme der Fahrzeuge im Laufe der Jahre betrachtet, siehe Bild 31 in Kapitel 3.2.5, und wenn man davon ausgeht, daß tolerierbare Leichtbaumehrkosten zwar von 0,50 DM bis 5,- DM variieren sollen, in Wahrheit aber wohl eher zwischen 0 DM und 1 DM liegen dürften, siehe 4.3.2.¹

Eine Umfrage in der amerikanischen Automobilindustrie ([220], siehe auch 6.4) ergab folgende Verteilungen der Vor- und Nachteile von Kunststoffen:

Unverstärkte Kunststoffe

Vorteile		Nachteile	
Gewicht	33 %	Festigkeit	36 %
Kosten	23 %	Temperaturlimitierungen	12 %
Korrosionsfestigkeit	10 %	Kosten	9 %
Design-Möglichkeiten	9 %	Haltbarkeit	8 %
Andere Vorteile	25 %	Andere Nachteile	35 %

Glasfaserverstärkte Kunststoffe

Vorteile		Nachteile	
Gewicht	36 %	Kosten	33 %
Festigkeit	29 %	Produktionszeit	7 %
Kosten	11 %	Oberflächengüte	7 %
Korrosionsfestigkeit	5 %	Herstellung	7 %
Andere Vorteile	19 %	Andere Nachteile	46 %

Metall/Kunststoff-Laminat

Vorteile		Nachteile	
Gewicht	48 %	Kosten	48 %
Festigkeit	22 %	Verarbeitbarkeit	6 %
Lärmdämmung	6 %	Herstellung	6 %
Korrosionsfestigkeit	5 %	Verbindungen	6 %
Andere Vorteile	19 %	Andere Nachteile	34 %

¹ Siehe auch [114], [200], [220], [252], [253].

4.2 DIMENSIONIERUNG, GEWICHT, STEIFIGKEIT

100 Kilogramm eingespartes Fahrzeuggewicht bedeuten nach einer Faustregel einen Liter Kraftstoffverbrauch weniger auf 100 Kilometer Fahrtstrecke. Demnach lohnt sich selbst ein relativ hoher Aufwand, um Fahrzeuge leichter zu machen. Mit Kunststoffen und Leichtmetallen sind denn auch erhebliche Einsparungen zu erzielen, wobei insbesondere mit Kunststoffen auch erhebliche wirtschaftliche Vorteile hervortreten. Das geringe spezifische Gewicht dieser Werkstoffe gleicht die meist erforderliche größere Dimensionierung bei den meisten Anwendungsfällen mehr als aus. Bild 47 zeigt eine Auswahl von Beispielen für die mit Kunststoffen zu erzielenden Gewichtseinsparungen.

Bauteil	Gewicht Metall	Gewicht Kunststoff
Kühlventilatorgrill Stahl	1,36 kg	0,68 kg
Schalthebelgehäuse Aluminium	1,02 kg	0,51 kg
Lenksäulenschloß Zink	0,96 kg	0,20 kg
Lampenring	0,25 kg	0,08 kg
Lüfterflügel	0,49 kg	0,38 kg
Vordertür	43,7 kg	29,8 kg
Außenspiegel	0,39 kg	0,21 kg
Rückleuchtengehäuse	1,13 kg	0,36 kg
Türgriff außen	0,30 kg	0,19 kg
Motorhaube	17,1 kg	12,1 kg

Bild 47: Typische Gewichtseinsparungen bei Substitution von Metall durch Kunststoff (nach Zahlen aus [197], [213], [254]).

Anders sieht das Bild jedoch aus, wenn die betreffenden Fahrzeugteile Belastungen ausgesetzt sind, bei denen die Eigenschaften von Stahl und Eisen tatsächlich ausgenutzt werden und nicht nur z. B. deren fertigungstechnische Vorteile ausschlaggebend für die Materialwahl waren. Der Elastizitätsmodul von Stahl (und auch der Leichtmetalle) ist um mehrere Größenordnungen höher als der der Kunststoffe. Dadurch wird bei Bauteilen, deren Steifigkeit sehr hoch sein soll, die Gewichtseinsparung längst nicht so spektakulär ausfallen wie in den Beispielen auf der vorigen Seite. Wird eine sehr hohe Dehnsteifigkeit gefordert, kann nur noch mit einigen speziellen Kohlefaserwerkstoffen Gewicht gespart werden; Kunststoffe sind dann unter Umständen sogar weit schwerer. Ist eine hohe Biegesteifigkeit das Kriterium, sieht das Bild für die Kunststoffe wieder günstiger aus, da das größere spezifische Volumen bei angepaßter Materialstärke einer Platte höhere Flächenmomenten mit sich bringt, die den geringeren Elastizitätsmodul überkompensieren.

	E-Modul (N/mm ²)	Gewicht gl. Dehnsteif.	Gewicht gl. Biegesteif.
Stahl	210 000	1	1
CFK UD	190 000	0,24	0,23
Aluminium	71 000	1,0	0,50
GFK UD	38 000	1,3	0,41
AFK (Zug)	27 000	1,4	0,36
SMC	10 000	4,0	0,53
PA 6.6, 30 % Glas	7 500	5,0	0,55
PU-RRIM, 30 % GK	5 000	7,0	0,58
PP-GM 30	4 600	7,0	0,55
PBTB + PC	2 400	13,5	0,68

Bild 48: Relative Gewichte von Bauteilen gleicher Steifigkeit aus verschiedenen Werkstoffen; Berechnungsmodell Platte, Wandstärke t variabel (Siehe auch die ausführlichere Darstellung in Bild 135).

Betrachtet man die verschiedenen Werkstoffe nach den Steifigkeitskriterien unter Voraussetzung angepaßter Dimensionierung, ergeben sich die in Bild 48 (ausführlicher in Bild 135 im Anhang) dargestellten Verhältnisse. Zum Erreichen einer bestimmten Steifigkeit ist bei vorgegebenem E-Modul ein sich daraus ergebender Querschnitt des Bauteils notwendig. Für die Dehnsteifigkeit hängen E-Modul und Querschnitt linear zusammen, d. h. bei zehnfachem E-Modul kann auch das spezifische Gewicht zehnmal größer sein, ohne daß das Bauteil bei gleicher Steifigkeit schwerer wird. Für die Biegesteifigkeit ist die Form mitentscheidend, da die Stärke eines Biegebalkens bzw. Blechs über das Widerstandsmoment mit der dritten Potenz einfließt. Der Einfluß des E-Moduls tritt so gegenüber dem spezifischen Gewicht zurück und leichte Werkstoffe können auch bei erheblich niedrigerem E-Modul bei gleicher Biegesteifigkeit leichtere Bauteile ergeben [166].

Die Tabelle zeigt überschlagsmäßig, daß in bezug auf gleiche Dehnsteifigkeit nur die Kohlefaserwerkstoffe leichter werden als Stahl, in bezug auf die Biegesteifigkeit aber alle Alternativen. CFK ist in beiden Wertungen allen anderen Werkstoffen überlegen. Bei den den Kunststoffen zugrundegelegten Werten muß beachtet werden, daß die Angaben sehr stark streuen und viele Materialvariationen mit unterschiedlichen Qualitäten existieren; die ausgewählten Zahlen liegen dabei im üblichen Rahmen. Bei CFK und GFK bedeutet "UD" unidirektional, d. h. die Fasern liegen orientiert in Richtung der Beanspruchung.

In der Praxis werden derartige Belastungsfälle kaum auftreten; meist sind sowohl Dehnung als auch Biegung zu beachten. Die Schubsteifigkeit, maßgebend für Torsion und Querkraftaufnahme, soll zunächst zurückgestellt werden, da sie bei isotropen Werkstoffen dem E-Modul proportional, bei verstärkten Werkstoffen bzw. Verbundwerkstoffen aber sehr stark abhängig von der Art der Einlagerung der Verstärkungstoffe bzw. Orientierung und Länge von Fasern ist

und sich daher kaum pauschalieren läßt. In den beiden letzten Spalten der Gegenüberstellung in Bild 49 soll die Annahme getroffen werden, daß sowohl Dehnung als auch Biegung auftreten und entsprechende Gewichtsanteile überschlagsmäßig zugeordnet werden können.

	E-Modul (N/mm ²)	Steifigkeit prop. t^2	50 % Dehnung 50 % Biegung
Stahl	210 000	1	1
CFK UD	190 000	0,23	0,23
Aluminium	71 000	0,60	0,76
GFK UD	38 000	0,54	0,84
AFK (Zug)	27 000	0,50	0,88
SMC	10 000	0,80	2,28
PA 6.6, 30 % Glas	7 500	0,95	2,79
PU-RRIM, 30 % GK	5 000	1,08	3,79
PP-GM 30	4 600	1,04	3,79
PBTB + PC	2 400	1,44	7,07

Bild 49: Bewertete relative Gewichte von Bauteilen gleicher Steifigkeit aus verschiedenen Werkstoffen; Wandstärke t variabel, Form entsprechend Lastannahme (Ausführlicher in Bild 136 im Anhang).

Wie das am zweckmäßigsten zu geschehen hat, hängt von der geometrischen Form ab, die bei realen Teilen am Kraftfahrzeug meist sehr komplex und selten auf einfache Grundfiguren zurückzuführen ist, da z. B. auch die Art der Krafteinleitung, statisch nicht einfach zu bestimmende Lagerungen oder die Lastannahmen eine Rolle spielen. Daher sollen verschiedene exemplarische Zuordnungen durchgespielt werden. Der arithmetische Mittelwert (die Frage nach der Zulässigkeit derartiger Ansätze spielt bei der hier notwendigen Vereinfachung wohl keine Rolle) ergibt abgesehen von den stets überlegenen Kohlefasern und dem auch bei reiner Dehnung fast gleichwertigem Aluminium nur

für gerichtete Glasfaserwerkstoffe und für Aramidfaserwerkstoffe Gewichtersparnisse gegenüber Stahl (siehe ausführliche Tabelle im Anhang). Auch wenn man den Anteil der Biegung auf 80 % erhöht oder die Wanddicke nicht mit der dritten Potenz, sondern über einen diese bestimmenden Formexponenten einfließen läßt, ändert sich die Reihenfolge nicht zugunsten anderer Werkstoffe wie der aufgeführten Thermoplaste oder dem Polyurethan, obwohl dies wegen der niedrigeren Material- und Fertigungskosten sicher wünschenswert wäre (siehe dazu auch Bild 136 im Anhang).

Ein derartiger Formfaktor ist in [172] benutzt worden, um die Beulsteifigkeit von Werkstoffen unterschiedlicher Festigkeit abschätzen zu können. Dabei wird davon ausgegangen, daß nach der Plattentheorie die Steifigkeit eine Funktion der Wanddicke in der dritten Potenz ist:

$$S = E \cdot t^3$$

Handelt es sich um eine gekrümmte Form, werden die Verhältnisse einer Membran maßgebend. Der Exponent variiert dabei von sehr schwacher Krümmung bis sehr starker Krümmung maximal zwischen 1 und 3; für reale Fahrzeugteile wird er zwischen 1 und 2 angenommen:

$$S = E \cdot t^N, \quad N = 1 \dots 2$$

Die Exponenten 1 und 3 entsprechen reiner Dehnung und reiner Biegung. In der Tabelle sind daher $N = 2$ und $N = 1,5$ durchgespielt worden. In [138] wird $E^{1/2} \cdot D$ als Bewertungsgröße für die Knickstabilität herangezogen, was dem zuvor Beschriebenen mathematisch entspricht.

Die Bewertung nach t^2 bzw. $E^{1/2}$ ergibt nun auch für SMC und PA 6.6 GF eine Gewichtersparnis gegenüber Stahl. Es zeigt sich weiterhin Gewichtsgleichheit bei PP und ABS sowie nur geringes Mehrgewicht bei RRIM und PC mit seinen Blends. Sehr günstig schneidet Glas ab, wenn es auch wegen der mangelnden Schlagfestigkeit nur für begrenzte Anwendungen in Frage kommt. Beim VW-Forschungsauto trägt die

Glasscheibe allein die Heckklappe; die Kunststoffteile tragen nur die Dichtungen und fungieren als Verkleidung.

Man darf bei dieser Betrachtung natürlich nicht vergessen, daß bei vielen Komponenten des Pkws eine ebenso hohe Steifigkeit, wie mit Stahl erreichbar, gar nicht notwendig ist. Es wird häufig durchaus sinnvoll sein, ein Material, das in der Gegenüberstellung von der Steifigkeit her schlechter abschneidet, für Karosserie- oder auch Funktionsteile zu wählen, wenn im Belastungsfall eine elastische Deformation zwar deutlich größer als mit Metallteilen wäre, es sich aber absolut gesehen doch nur um kleine, tolerierbare Wege handelt. Letztlich zählt allein, ob die Funktion oder das Aussehen nicht beeinträchtigt wird, wozu Lastannahmen getroffen werden müssen, deren Ziel an vielen Stellen eine ausreichende Formbeständigkeit und weniger eine Kraftübertragung ist.

Unter diese weniger belasteten Teile, die meist ohnehin schon aus Kunststoffen gefertigt werden, fallen z. B. praktisch alle nicht mittragenden Ausrüstungsteile der Karosserie wie Kühlergrill, Verkleidungen von Lampen, Spiegelgehäuse, diverse Zierteile und u. U. auch entsprechend gut befestigte Karosserieteile selbst wie Frontschürzen, vordere Kotflügel, oder auch fast alle Teile der Innenverkleidung. Ebenso wird man an Fensterkurbeln, Hebehebelshebels oder Zahnrädern einfacher Mechanismen nicht so hohe Steifigkeitsansprüche stellen müssen, als daß hier unbedingt Metall verwendet werden müßte, wenn die Elastizität nicht nur die Funktion nicht beeinträchtigt, sondern vom Benutzer auch nicht bemerkt wird.

Ein weiterer wichtiger Diskussionspunkt ist die Energieaufnahme. Bei Kunststoffstoßfängern z. B. ist eine große elastische Arbeitsaufnahme durchaus erwünscht, um Beschädigungen zu vermeiden, da die Rückfederung in der Regel keine merklichen Auswirkungen auf Stärke und Folgen eines Rangierstoßes haben wird. Folgt auf die elastische Phase

allerdings übergangslos ein Bruch des Materials, wie dies bei den Glasfaserwerkstoffen häufig der Fall ist, tritt nicht nur eine die Funktion beeinträchtigende Beschädigung auf, sondern meist ein völliger Funktionsverlust. Bei einem Unfall mit höherer Geschwindigkeit besteht bei derartigen Werkstoffen dadurch die Gefahr, daß bei Beanspruchung unterhalb der Belastungsgrenze ein unerwünschtes, die Dauer des Stoßimpulses verlängerndes Rückfedern auftritt, bei Überlastung dagegen ein Zusammenbruch der betroffenen Strukturteile und damit das Unvermögen, weitere Kräfte zum Abbau kinetischer Energie bereitzustellen. Leider zeigen gerade die ansonsten im Vergleich zu Stahl und Aluminium sehr günstig abschneidenden Kohlefaserwerkstoffe hier ein sehr sprödes Verhalten, so daß die potentiell hohe Gewichtersparnis im Pkw vorläufig nicht genutzt werden kann. Für die Zukunft soll aber nicht ausgeschlossen werden, daß ein Verbund mit Aramidfasern, wie im Segelflugzeugbau bekannt, oder die Integration metallischer Knautschelemente bei angepaßten Karosseriekonzepten Verbesserungen bringen könnten.

Die Aramidfaserwerkstoffe haben für Zug und Druck unterschiedliche Eigenschaften. Der E-Modul ist für Druckbelastung ca. 10 % geringer, die Druckfestigkeit jedoch schon um 2 Drittel niedriger, was bei festigkeitskritischen Auslegungen berücksichtigt werden muß.

Sehr günstig schneidet im Steifigkeits-/Gewichtvergleich das Aluminium ab, da damit sehr große Gewichtersparnisse erzielt werden können, ohne daß etwa die Sprödigkeit der Kohlefaserverbundwerkstoffe in Kauf genommen werden müßte. Da Aluminium zudem höheren Arbeitstemperaturen ausgesetzt werden kann als Kunststoffe, wird es (abgesehen von anderen, meist noch teureren Leichtmetallen wie z. B. Magnesium) in den Bereichen der tragenden oder temperaturbelasteten Komponenten die nächste Alternative zum Stahl bleiben.

Bild 50 zeigt noch einmal eine Auswahl der Angaben zur Gewichtersparnis mit Aluminium und Kunststoffen aus verschiedenen Quellen. Das Ergebnis sieht für Stahl recht ungünstig aus, aber wie zuvor gezeigt müssen derartige Aussagen stets relativiert und mit entsprechender Beachtung der Randbedingungen betrachtet werden. Werden die

Quelle	[2]	[102]	[138]	[140]	[142]	[146]	[159]
Stahl	1	1	1	1	1	1	1
Aluminium	0,50	0,54	0,60	0,59	0,48	0,49	0,50
GF-UP (30 %)	0,53	0,68	0,79	0,94	0,85	0,64	0,54
PA6-GV	0,54				0,73	0,55	
POM	0,70					0,75	
PVC	0,72					0,79	
PP	0,65					0,60	
HD-PE	0,72					0,93	
CFK			0,51	0,25			0,28
PUR RRIM		0,46		2,1			

Bild 50: Gewichte von Bauteilen aus verschiedenen Werkstoffen bei gleicher Biegesteifigkeit.

Bauteile anders gestaltet, z. B. statt eines einfachen Blechs eine Platte mit auf der Rückseite angeformten Rippen gewählt, sind diese Formeinflüsse für die Steifigkeit dominierend. Die Materialeigenschaften lassen sich so nicht mehr direkt vergleichen, weil das lediglich fertigungstechnische günstige Blechteil einem auch formoptimalen Kunststoffteil gegenübergestellt wird. Durch diese schlechte Ausnutzung der Werkstoffeigenschaften muß das Blechteil zwangsläufig ein höheres Gewicht haben. Letztlich liegen aber in den besseren Gestaltungsmöglichkeiten die Vorteile der Kunststoffe.

4.3 KOSTEN

4.3.1 Material, Fertigung

Einer der wesentlichsten Gesichtspunkte für den Einsatz neuer Werkstoffe und Verfahren ist zweifellos die Senkung der Kosten. Neue Produkte kommen auch dann zum Einsatz, wenn Forderungen nach Energieeinsparung und Gestaltungsfreiheit nur mit diesen Produkten zu lösen sind. Ein vernünftiges Kosten/Nutzen-Verhältnis ist allerdings immer wesentlich [1].

In Anbetracht der Tatsache, daß rund drei Viertel des Fahrzeuggewichts heutiger Pkw Eisenwerkstoffe sind, ist es naheliegend, zunächst durch Austausch derselben gegen Kunststoffe und Leichtmetalle vorhandene Gewichts- und Rationalisierungsreserven abzuschöpfen, doch gerät man bald an die Grenze der von der Industrie akzeptierten Kostensteigerung [157]. Wenn vor 10 Jahren ein Leichtmetall- oder Kunststoffteil nur dann eine Chance hatte, serienmäßig verwendet zu werden, wenn es billiger war als das ersetzte Stahlteil, so werden heute für Gewichtseinsparungen auch höhere Herstellkosten in Kauf genommen [147]. Als vertretbar werden entsprechend der funktionalen Priorität der einzelnen Fahrzeugbaugruppen z. B. in [146] ca. 2,5 bis 8 DM/kg Mindergewicht angesehen, je nach Fahrzeugauslegung und Zielgruppe mitunter auch erheblich mehr, obwohl nicht immer durch den resultierenden Minderverbrauch des Automobils amortisiert; unter Umständen werden Mehrkosten gar nicht akzeptiert.

Die am Anfang der Entwicklung vorherrschende Meinung, daß gewichtsreduzierte Bauteile bei gleicher oder verbesserter Funktion wegen der verwendeten höherwertigen Werkstoffe stets auch höhere Verkaufspreise erfordern, hat sich nicht bestätigt, da spezifische Mehrkosten häufig durch den verminderten Mengenaufwand ausgeglichen werden konnten [1].

Schwierig ist die Kostendämpfung bei großflächigen Bauteilen aus Aluminium und Kunststoff, deren Einsatz durch die unbefriedigende Wirtschaftlichkeit schon im Vergleich zum konventionellen Blech nach wie vor begrenzt ist, während durch die Entwicklung neuer Stahlsorten deren Wettbewerbsfähigkeit sogar wieder steigt. Unter Zugrundelegung gleicher Steifigkeit kann beispielsweise pro m^2 Außenhaut ein Aluminiumteil doppelt und ein GFK-Teil viermal so teuer wie ein großflächiges Stahlblechteil werden. Diese Verhältnisse hängen jedoch stark vom Einzelfall ab. So kann ein hochintegriertes Formteil aus SMC nur 60 % des Stahlteils kosten oder weniger, ein lackiertes PUR-Teil im Extremfall aber auch zehnfach teurer werden als Stahlblech.¹

Als grober Richtwert für die Ausnutzung fertigungstechnischer Möglichkeiten durch Kunststoffe gilt ein Verhältnis von Lohn zu Material von 20:80 (bzw. 40:60 für gefülltes Material) im Gegensatz zu 60:40 für die Herstellung von Metallteilen [145]. Edelstahl, Aluminium, Magnesium oder gar Titan können wegen der den Eisenwerkstoffen ähnlichen, ausgereiften Fertigungsverfahren, aber erheblich höheren Materialkosten von der Produktionsseite her in absehbarer Zeit nicht wirtschaftlicher werden. Erst bei Einbeziehung von Lebensdauer, Betrieb und Wiederverwertung können sich günstigere Perspektiven ergeben (siehe auch Kapitel 4.7).²

Rechnet man die Investitionskosten mit ein, kann ein bei geringen Stückzahlen teures Bauteil in der Schlußabrechnung dennoch preisgünstiger sein. Für Rohkarosserien werden z. B. Vergleichszahlen genannt für ein Produktionsvolumen von 227000 Einheiten, von denen ab eine Stahlkonstruktion erst preisgünstiger wird als GFK; bei Halbierung der Zykluszeiten wären die GFK-Teile bis zu Stückzahlen

¹ Siehe auch [37], [38], [255], [256].

² Siehe auch [139], [256], [257].

von 450 000 wirtschaftlich, siehe Bild 51. Ungünstig für GFK ist die geringe Kostendegression über der Stückzahl, wodurch ein Trend zur Komponentenvereinheitlichung die Volumenschwelle für eine mögliche Materials substitution außer Reichweite halten würde. Der Nutzen der Substitution bzw. die Funktionsvorteile müßten dann schon die technischen und kommerziellen Risiken überkompensieren.¹

Karosserie-Kosten in \$

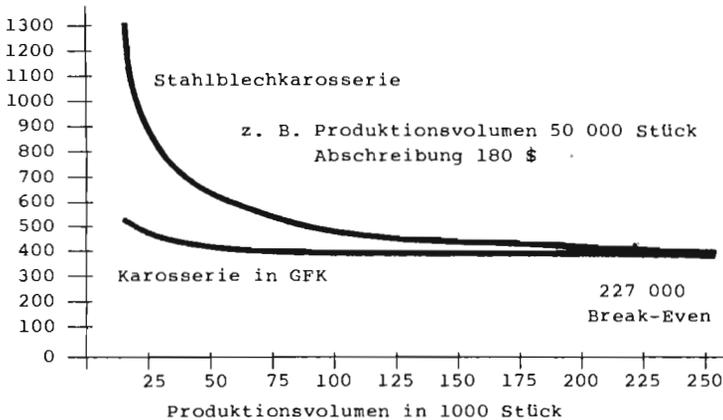
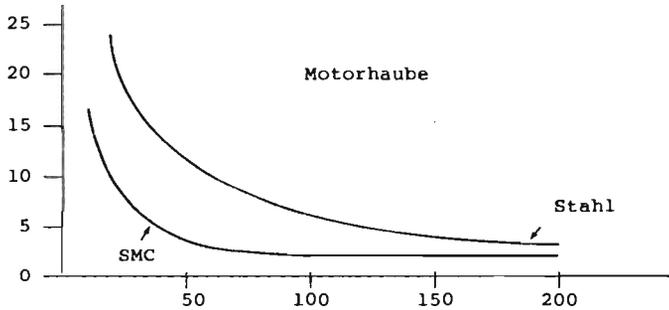
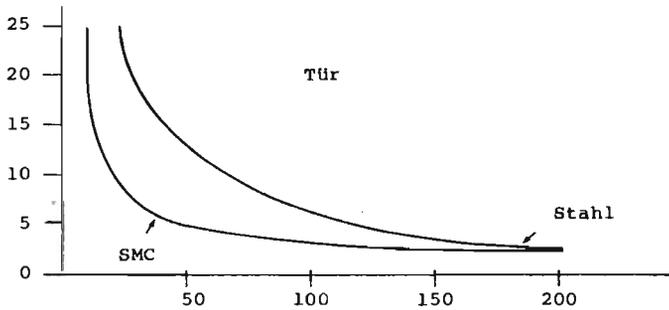
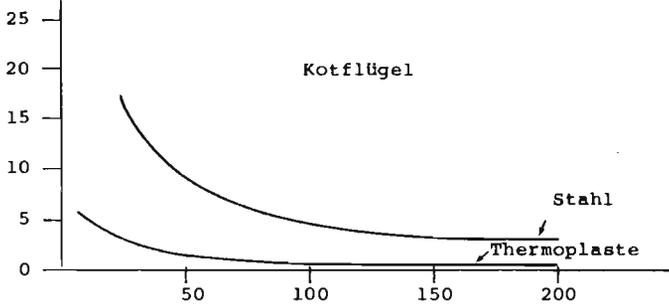


Bild 51: Vergleich der Produktionskosten zwischen Stahl- und GFK-Karosserien [141], [258].

In Bild 52 sind ähnliche Vergleiche [142] für die Werkzeugkosten einzelner Karosseriekomponenten dargestellt. Die Kosten von Stahl und SMC nähern sich bei etwas höheren Stückzahlen, in der Tendenz stimmen diese Aussagen aber gut mit derjenigen der Rohkarosserie überein. Lediglich der Vergleich Stahl zu Reaktions- oder Spritzguß beim Kotflügel fällt deutlich zuungunsten des Stahls auch bei größeren Stückzahlen aus.

¹ Siehe auch [73], [141], [258], [259], [260].

Werkzeugkosten in \$ pro Anlage



Jährliches Produktionsvolumen in 1000 Stück

Bild 52: Werkzeugkosten für Kotflügel, Tür und Haube aus Stahl oder Kunststoff [142].

Der heutige Trend auch zum Strukturleichtbau und zur Substitution höherbelasteter Bauelemente läßt in den nächsten Jahren die zunehmende Verwendung von hochwertigen Verbundwerkstoffen erwarten, die heute für die Großserie noch zu teuer sind. Fast alle tragenden Bauteile lassen sich mit faserverstärkten Kunststoffen erheblich leichter ausführen; mit größeren Produktionsmengen wohl auch mit einem günstigerem Preis/Leistungsverhältnis. Im Vergleich mit Stahl gilt etwa die folgende Kilopreis-Relation [138]:

St : Al : GFK : Aramid-FK : CFK = 1 : 10 : 30 : 150 : 250.

Diese hohen Kosten basieren teilweise noch auf Pilotanlagen-Produktion. Für CFK wird eine mögliche Preissenkung auf 100 DM/kg vorausgesagt; vor 10 Jahren lag der Preis z. B. noch bei 2500 DM. In anderen Quellen (siehe Bild 53) liegen die Preise teilweise erheblich niedriger, was aber auch eine Frage der verglichenen Materialqualitäten sein dürfte.

Quelle	[1]	[109]	[138]	[140]	[141]	[261]
Stahl	1	1	1	1	1	1
Aluminium		4,0	10	5,5		4,1
SMC	3,3	6,4	30	2,1	3,3	3,6
AFK			150			27
CFK			250	75	106	91
PP	2,7	2,1				
PA 6.6	8,0	6,5				
PC	6,7	7,1				
PUR RRIM	4,7			6,3		

Bild 53: Beispiele für relative Materialkosten.

	1982	1987	1992
Motorhaube:	(26 \$)		
Stahl	1	1,01	1,04
SMC	1,85	1,42	0,88
PA-RRIM	2,61	1,88	1,31
Aluminium	1,54	1,54	1,58
Kotflügel:	(6 \$)		
Stahl	1	1,00	0,83
PA-RRIM	1,83	1,50	1,33
IMTP*	1,50	1,33	1,12
PUR-RRIM	1,33	1,17	1,17
Kofferraumdeckel:	(14 \$)		
Stahl	1	1,08	1,00
SMC	2,29	1,07	1,00
PA-RRIM	2,64	1,50	1,14
BMC	1,79	1,07	0,86
Heckklappe:	(16 \$)		
Stahl	1	1,06	1,00
SMC	1,89	1,81	0,88
IMTP	2,00	1,81	0,88
BMC	1,50	0,69	0,62
Tür:	(17 \$)		
Stahl	1	1,12	1,06
SMC	2,12	1,65	0,76
PA-RRIM	2,29	1,71	0,88
IMTP	2,12	1,71	0,82
PUR-RRIM	1,94	1,59	1,47

Bild 54: Geschätzte Abgabepreise (Material und Fertigung) von Karosserieteilen aus verschiedenen Werkstoffen im Verhältnis zu Stahl [142].

* "Injection Moldable Thermoplastics", in [142] vornehmlich PC/PBT, für später auch PA angesprochen.

Neben den Kilopreisen ist natürlich der Gesamtnutzen entscheidend, d. h. die Kompensation der höheren Bauteilkosten durch niedrigeres Gewicht oder günstigere Fertigungsverfahren. Durch angepaßte Herstellungsverfahren, andersartige Gestaltungsprinzipien und Verbindungstechniken muß der im Kilopreis billigere Werkstoff nicht der tatsächlich billigere sein [138]. Bild 54 zeigt dazu die Gesamtkosten einiger Karosserieteile aus verschiedenen Werkstoffen. Bemerkenswert ist, daß die Preise der Stahlteile für 10 Jahre als konstant eingeschätzt werden, während sie sich bei den Kunststoffteilen mit Ausnahme des PUR meist mehr als halbieren. Wohlgermerkt handelt es sich bei dieser Schätzung [142] nicht um eine einfache Hochrechnung auf der Basis der Rohstoffpreise; dort werden weit geringere Unterschiede prognostiziert (siehe auch die Bilder 78 und 152 bis 156).

4.3.2 Gewicht, Betrieb

Zur Abschätzung der Höhe noch sinnvoller Mehrkosten durch gewichtsmindernde Maßnahmen am Pkw können beispielsweise die Leichtbaugrenzkosten LGK ermittelt werden [146]. Sie ergeben sich aus der Kraftstoffeinsparung pro 100 kg Mindergewicht und 100 km Fahrstrecke (z. B. 0,75 l), der zugrundegelegten Amortisationsstrecke (z. B. 45000 km) und dem Kraftstoffpreis (z. B. 1,50 DM). Die Leichtbaugrenzkosten betragen dann:

$$\text{LGK} = \frac{0,75 \text{ l} * 45000 \text{ km} * 1,50 \text{ DM}}{100 \text{ kg} * 100 \text{ km} * 1} = \text{ca. } 5 \text{ DM pro kg.}$$

Dieses Beispiel ist selbstverständlich nicht allgemein gültig. Es soll nun nach als realistisch anzusehenden Annahmen nach oben und unten variiert und überprüft werden.

Annahme 1:

Die Kraftstoffeinsparung pro 100 km beträgt nur 0,5 l für 100 kg. Der Erstkäufer fährt 7 Jahre à 12500 km und erwartet einen Ausgleich der Mehrkosten nach der halben Zeit:

$$\text{LGK} = \frac{0,5 \text{ l} * 43750 \text{ km} * 1,50 \text{ DM}}{100 \text{ kg} * 100 \text{ km} * 1} = \text{ca. } 3,30 \text{ DM pro kg.}$$

Annahme 2:

Die Kraftstoffeinsparung pro 100 km beträgt 1 l für 100 kg. Der Erstkäufer fährt in 5 Jahren 60000 km und möchte bis dahin seine Mehraufwendungen ausgeglichen haben:

$$\text{LGK} = \frac{1 \text{ l} * 60000 \text{ km} * 1,50 \text{ DM}}{100 \text{ kg} * 100 \text{ km} * 1} = 9 \text{ DM pro kg.}$$

Annahme 3:

Die Kraftstoffeinsparung pro 100 km beträgt 1 l für 100 kg. Der Erstkäufer fährt wie in Annahme 2 in 5 Jahren 60000 km und möchte bis dahin seine Mehraufwendungen

ausgeglichen haben. Allerdings steigt der Kraftstoffpreis stetig an und liegt im Mittel bei 2 DM pro Liter:

$$LGK = \frac{1 \text{ l} * 60000 \text{ km} * 2 \text{ DM}}{100 \text{ kg} * 100 \text{ km} * 1} = 12 \text{ DM pro kg .}$$

Der Spielraum von 3 bis 12 DM vertretbarer Mehrkosten pro Kilogramm Gewichtseinsparung erscheint auf den ersten Blick als sehr groß. Nach anderen Quellen werden die vertretbaren Kosten für ein Kilogramm Massenreduktion von -,50 DM für Großserienfahrzeuge bis 5,- DM für Kleinserienfahrzeuge sogar um den Faktor 10 variiert. Dabei wird von einer Amortisationszeit von 2 Jahren und einer Laufstrecke von 30000 km ausgegangen, unter der Voraussetzung, daß die durchschnittliche Besitzdauer deutlich unter der Lebensdauer liegt und die Mehrkosten beim Verkauf des Fahrzeugs oft nicht erlöst werden [140].

Je nach Marktlage und Zielgruppe der Käufer sind die zu verauslagenden Mehrkosten eine Investition, die abhängig vom Fahrzeugpreis für diese mehr oder weniger akzeptabel ist. Für den Käufer eines einfach ausgestatteten Kleinwagens kann es attraktiver sein, einen niedrigen Anschaffungspreis bei höheren Betriebskosten zu haben. Er scheut die hohe Anfangsinvestition und will lieber die zeitlich verteilten Mehrkosten aufbringen, weil die Amortisationsstrecke in einem ihm nicht überschaubaren Bereich liegt. Für einen Vielfahrer, der eine komfortable, große und damit ohnehin teure Limousinen bevorzugt, können die Mehrkosten auch Teil einer Wirtschaftlichkeitsrechnung sein, in der er seinen Kapitaleinsatz den Zinserträgen bei anderweitiger Verwendung gegenüberstellt. Er kommt damit bei hoher Laufleistung zu ganz anderen Schlüssen als der zuvor beschriebene Kleinwagenkäufer (wobei zunächst außer Acht gelassen werden soll, ob und wie Umweltschutz und Ressourcenschonung in solche Rechnungen einfließen sollten). (Siehe auch Bild 153, Kraftstoffkosten und Amortisationszeit bei verschiedenen Kosten für die Gewichtsverminderung [214].)

4.4 SICHERHEIT

4.4.1 Trends der Gesetzgebung

In den letzten Jahren ist ein starkes Ansteigen der Zahl der Vorschriften zu verzeichnen gewesen, die bei der Konstruktion eines Pkw berücksichtigt werden müssen. Die stärksten Impulse dafür sind zweifellos von der amerikanischen Gesetzgebung ausgegangen, die Mitte der siebziger Jahre voll zum Tragen kam. Es ist aber kaum anzunehmen, daß diese Entwicklung ebenso stürmisch weiterverläuft, wie man es den Darstellungen einiger Quellen, z. B. wie in Bild 55 gezeigt, entnehmen könnte. Beschränkt man sich zunächst einmal auf Deutschland, so verläuft die Entwicklung hier erheblich ruhiger. In den letzten 5 Jahren sind nur zwei EEC-Richtlinien in Kraft getreten. Bei den EEC-Richtlinien lag der Höhepunkt ebenfalls anfang der siebziger Jahre; auf den folgenden Seiten befindet sich eine Zusammenstellung.

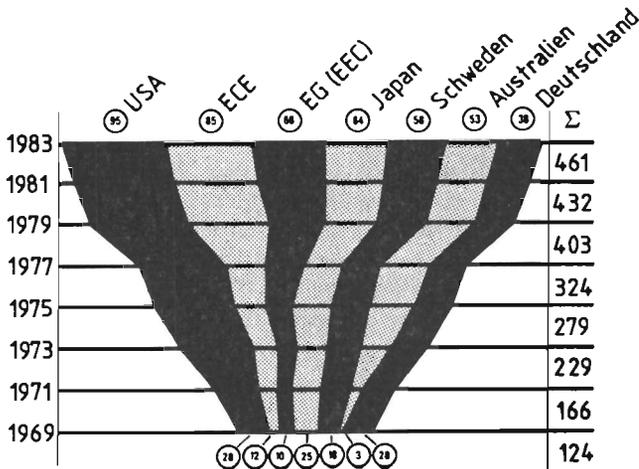


Bild 55: Zunahme der Vorschriften zur Fahrzeugsicherheit (nach [219], [263], [264]).

Inkrafttreten von EEC-Richtlinien in Deutschland

Jahr	Anzahl	EEC-Richtlinie		
1970	8	70/ 156 70/ 221 70/ 388	70/ 157 70/ 222 70/1463	70/ 220 70/ 387
1971	2	71/ 127	71/ 320	
1972	2	72/ 245	72/ 306	
1973	0			
1974	05	74/ 060 74/ 408	74/ 061 74/ 483	74/ 297
1975	1	75/ 443		
1976	10	76/ 114 76/ 757 76/ 760 76/ 767	76/ 115 76/ 758 76/ 761	76/ 756 76/ 759 76/ 762
1977	08	77/ 143 77/ 538 77/ 541	77/ 311 77/ 539 77/ 649	77/ 389 77/ 540
1978	6	78/ 316 78/ 548	78/ 317 78/ 549	78/ 318 78/ 932
1979	0			
1980	2	80/1268	80/1269	
1981	0			
1982	0			
1983	0			

44 EEC-Richtlinien, Stand 1983

Richtlinien der ECE, die bisher nicht in die EG-Richtlinien eingearbeitet sind:

--: 18; ECE-R- 5 ECE-R-11 ECE-R-21 ECE-R-30
ECE-R-31 ECE-R-32 ECE-R-33 ECE-R-34
ECE-R-35 ECE-R-37 ECE-R-42 ECE-R-43
ECE-R-44 ECE-R-45 ECE-R-46 ECE-R-49
ECE-R-55 ECE-R-59

(Nach Angaben aus [265].)

Inkrafttreten von ECE-Richtlinien in Deutschland

Jahr	Anzahl	Richtlinien
1966:	4;	ECE-R- 1 ECE-R- 2 ECE-R- 3 ECE-R- 4
1967:	5;	ECE-R- 5 ECE-R- 6 ECE-R- 7 ECE-R- 8 ECE-R-10
1968:	0;	
1969:	0;	
1970:	1;	ECE-R-11
1971:	0;	
1972:	3;	ECE-R-12 ECE-R-15 ECE-R-20
1973:	9;	ECE-R-14 ECE-R-16 ECE-R-17 ECE-R-18 ECE-R-19 ECE-R-21 ECE-R-23 ECE-R-24 ECE-R-25
1974:	0;	
1975:	2;	ECE-R-26 ECE-R-28
1976:	0;	
1977:	1;	ECE-R-30
1978:	1;	ECE-R-38
1979:	0;	
1980:	1;	ECE-R-13
1981:	1;	ECE-R-43
1982:	0;	
1983:	4;	ECE-R-34 ECE-R-39 ECE-R-42 ECE-R-48

32 Richtlinien in 18 Jahren

Davon bislang ohne entsprechende EEC-Richtlinien:

1967:	1;	ECE R 5
1970:	1;	ECE R 11
1973:	1;	ECE R 21
1977:	1;	ECE R 30
1981:	1;	ECE R 43
1983:	1;	ECE R 34 ECE R 42

Bisher in der Bundesrepublik nicht in Kraft getretene
ECE-Richtlinien:

--:	13;	ECE-R- 9 ECE-R-31 ECE-R-32 ECE-R-33 ECE-R-35 ECE-R-44 ECE-R-45 ECE-R-46 ECE-R-49 ECE-R-50 ECE-R-51 ECE-R-55 ECE-R-59
-----	-----	---

(Nach Angaben aus [265].)

Nimmt man an, daß diejenigen EEC- oder ECE-Vorschriften früher oder später auch in der Bundesrepublik gelten werden, die bislang noch nicht verbindlich sind, sind neue oder zumindestens überarbeitete bzw. angepaßte Regelungen in folgenden Bereichen denkbar:

- Scheinwerfer,
- Auffahrunfall,
- Frontalzusammenstoß,
- Fußbedienteile,
- Rückhaltesysteme für Kinder,
- Scheinwerferreinigungsanlagen,
- Rückspiegel,
- Dieselabgase,
- Verbindungseinrichtungen,
- Austauschschalldämpfer.

Die EEC-Richtlinien bzw. EWG-Richtlinien sind Vereinbarungen der Europäischen Gemeinschaft; die ECE-Richtlinien werden von der Economic Commission for Europe, einer Kommission der Vereinten Nationen, erarbeitet.

Die geplanten Änderungen der Abgasregelungen für Otto-Motoren werden zum Einsatz von Katalysatoren führen, deren Materialzusammensetzung sich aber kaum von den bekannten Exportversionen unterscheiden wird. Partikelfilter für Dieselmotoren sind ebenfalls zu erwarten.

Denkbar sind vielleicht Vorschriften über die Korrosionsbeständigkeit von Fahrzeugen, wie dies in Kanada bereits eingeführt ist [258]. Rostschäden an der Karosserie gehören zu den häufigsten Gründen für die Stilllegung von Pkw, so daß Änderungen hier zur Ressourcenschonung beitragen könnten.

4.4.2 Sicherheitselemente

Tragende Teile werden auch nach der Energieaufnahme im Crash-Fall ausgelegt. Neben dem konventionellen Stahlblech werden zunehmend hochfeste Qualitäten eingesetzt, die sich günstig verhalten sollen. Es können allerdings keine generellen Vorteile erwartet werden. In Versuchen zum sogenannten autogenen Faltbeulen hat sich gezeigt, daß die Energieaufnahme vorrangig von der Wandstärke und der Geometrie der Bauteile und in weitaus geringerem Maße von der Materialfestigkeit abhängig ist [266].

Von den zur Diskussion stehenden alternativen Werkstoffen dürfte Aluminium am ehesten für tragende und damit für Crash-Bedingungen relevante Strukturen in Frage kommen.

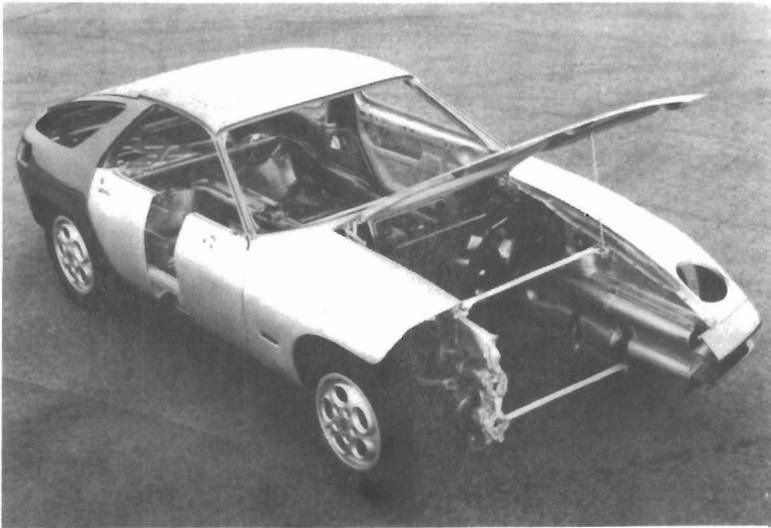


Bild 56: Fahrzeug mit Ganz-Aluminium-Karosserie nach Crash-Test (Porsche 960, [20]).

Verschiedene Untersuchungen ([2], [267] u. a.) haben gezeigt, daß die Energieaufnahme von Aluminiumfrontstrukturen durchaus befriedigend gestaltet werden kann, siehe z. B. Bild 56. Träger gleicher Außenabmessungen bei angepaßter Wandstärke und Schweißpunktauslegung aus Stahl und Aluminium erbrachten im quasistatischen Druckversuch ein gleichgroßes Energieaufnahmevermögen. Der Punktfestigkeit bei Aluminium muß besondere Beachtung geschenkt werden, da sie nur etwa 40 % derjenigen von Stahl beträgt. Kleb-Schweiß-Verbindungen wären hier günstig anzuwenden, bedeuten aber für die Großserie erheblichen Aufwand.

Ein großes Problem bei Kunststoffkarosserien ist die Energieaufnahme. Hier folgt auf die elastische Phase bei der Verformung häufig fast übergangslos ein Bruch des Materials, insbesondere bei den für tragende Teile bevorzugten Glasfaserverbundwerkstoffen. Bei einem Unfall mit höherer Geschwindigkeit besteht dadurch die Gefahr, daß ein Zusammenbruch der betroffenen Strukturteile und damit das Unvermögen, weitere Kräfte zum Abbau kinetischer Energie bereitzustellen, auftritt. Für die Zukunft soll aber nicht ausgeschlossen werden, daß ein Verbund mit stärker plastisch verformbaren Werkstoffen bzw. Fasern, gezielt und abgestuft auseinanderreiße Faserlagen oder die Integration metallischer Knautschelemente bei angepaßten Karosseriekonzepten ein befriedigendes Verhalten beim Crash-Test bringen könnten.

Crash-Tests an der TU Berlin mit vollständig aus glasfaserverstärktem Kunststoff gefertigten Fahrzeugen (Bilder 57 bis 59) haben gezeigt, daß diese zwar deutliche Schwächen aufwiesen, was die Festigkeit an verschiedenen Stellen wie Sitz- und Gurtbefestigungen oder der Fahrerkabinenverankerung am Fahrgestell (es handelte sich um ca. 10 Jahre alte elektrisch angetriebene Lieferwagen aus einem Versuchsprogramm der Firmen Bayer, MBB und verschiedenen Betreibern) betraf, daß die am Schwerpunkt gemessenen Verzögerungen sich aber nicht grundsätzlich von denen konventioneller Fahrzeuge unterschieden. Auch die Rückfede-

rung blieb trotz der hohen elastischen Energieaufnahme von GFK im üblichen Rahmen, da die Sandwich-Bauteile einen energieaufnehmenden Kern aus halbhartem PUR-Schaum besaßen. Die Verbindung der Deckschichten zum Schaumkern, hier nach dem Depot-Verfahren gefertigt, muß ebenfalls verbessert werden, um die aufzunehmenden Kräfte zu erhöhen. Die getesteten Lkw sind jeweils in Höhe des Radhauses gebrochen, wodurch sich die Verformungswege erhöht haben. Gezielt auch auf den Crash-Test ausgelegte Strukturen hätten zweifellos bessere Resultate gezeigt. Daß auch Überrollversuche mit Insassenzellen ohne Metallverstärkungen befriedigend absolviert werden könnten, ist allerdings mit der vorliegenden Bauweise kaum zu erwarten; für entsprechend gestaltete Pkw soll dies aber nicht ausgeschlossen werden.

Eine Reparatur der beschädigten Frontstrukturen wäre nicht möglich gewesen. Vor dem Einsatz in Großserien-Pkw müssen erst geeignete Methoden erarbeitet werden, beschädigte Fahrzeuge wirtschaftlich und sicher instandzusetzen.



Bild 57: Kunststoff-Lkw nach Crash-Test an der TU Berlin.

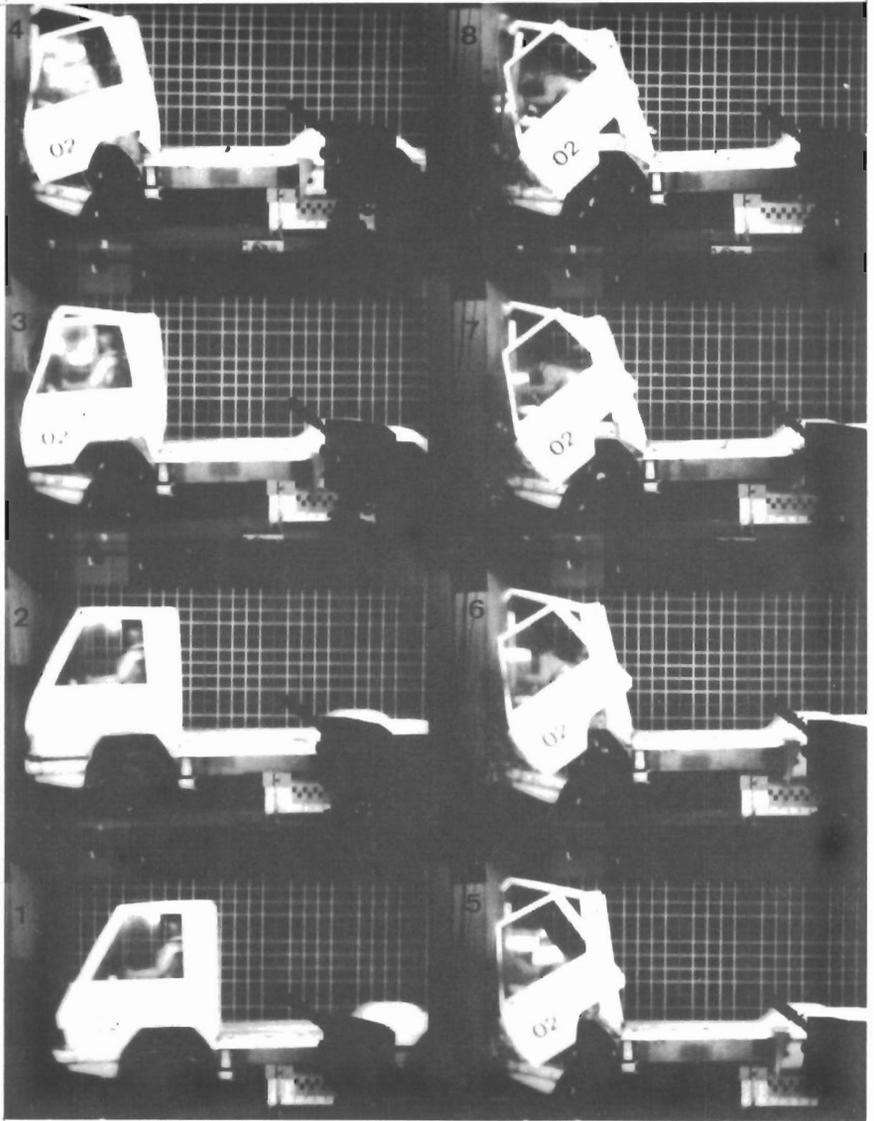


Bild 58: Ablauf eines Crash-Tests mit einem Kunststoff-Lkw.

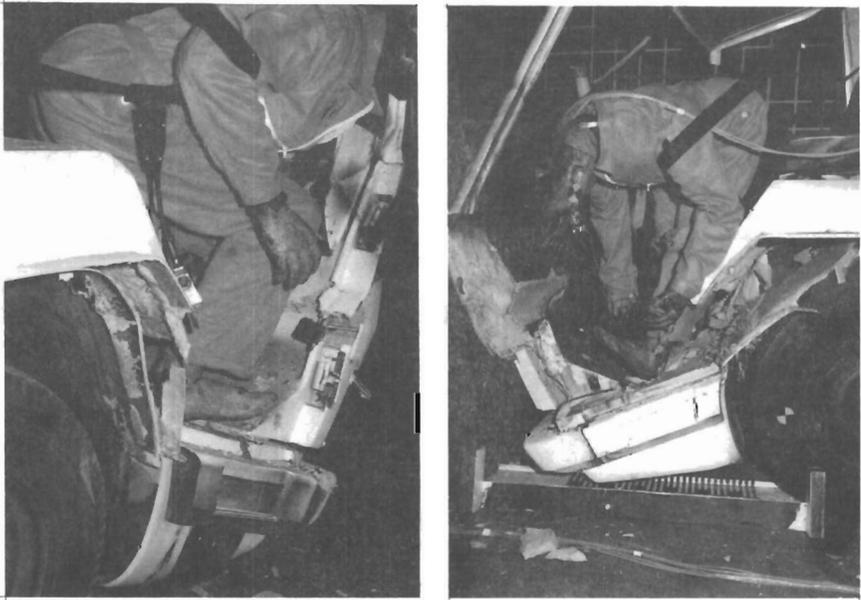


Bild 59: Schwachpunkte des Kunststoffaufbaus beim Crash-Test.

4.5 VERFÜGBARKEIT

Die Verfügbarkeit der Rohstoffe hängt von einer Reihe von Faktoren ab, die über das reine Vorkommen auf der Erde hinausgehen. Nicht zuletzt steckt in dem Begriff Verfügbarkeit die Frage nach einer übersehbaren Kostenentwicklung, nicht allein nur nach der erreichbaren Menge. Neben eventuell aus politischen Gründen eingeschränkten Zugriffsmöglichkeiten sind damit in erster Linie abbaufähige Lagerstätten und wirtschaftliche Aufbereitungsverfahren gemeint. Als Beispiel sei das Aluminium genannt, das mit einem Anteil von 7 - 8 % an der Erdkruste praktisch unerschöpflich erscheint, die abbau- und verarbeitbaren Rohstofflager in Form verschiedener Tonerden (Al_2O_3) und des Bauxits (Mineral aus Al_2O_3 , Fe_2O_3 , H_2O , SiO_2 u. a.) jedoch begrenzt sind auf 500 bis 600 Millionen Tonnen (US-Schätzungen). Die Nutzungsdauern nach verschiedenen Quellen differieren zwischen 50 und 300 Jahren. Andere Schätzungen gehen bis über 7000 Millionen Tonnen, wenn hypothetische Lagerstätten einbezogen werden.

Verschiedene Legierungsmetalle wie Magnesium und Silizium sind in großen Mengen vorhanden und auf lange Zeit verfügbar. Silizium z. B. ist mit 26 -28 % Anteil an der Erdkruste tatsächlich als unerschöpflich zu betrachten (Fe ca. 5 %, Mg ca. 2 %, Ti ca. 0,6 %, [131]). Im Gegensatz dazu ist z. B. Zinn nur zu 0,008 % in der Erdkruste vertreten und nach pessimistischer Schätzung nur noch 18 Jahre verfügbar ([2]; eine ausführliche Betrachtung der Verfügbarkeit der Rohstoffe findet sich in der Studie zum Langzeitauto [114]).

Die Knappheit verschiedener Legierungsmetalle wird zusätzlich dadurch problematisch, daß sie nicht oder nur mit sehr großem Aufwand aus Produktionsabfällen oder Schrott wiedergewonnen werden können, während bei Stahl ohnehin und in zunehmenden Maße auch bei Aluminium die Verwendung großer Anteile von Pre- und Recyclingmaterial üblich ist.

Hier stellen die zur Zeit in Gebrauch befindlichen Mengen eine beträchtliche Rohstoffreserve dar [2].

Daß diesen Verfügbarkeitsschätzungen gegenüber höchste Vorsicht angebracht ist, zeigen die allen Prognosen zum Trotz in den letzten Jahren eher gestiegenen Erdölreserven. Auch für Kupfer z. B. ist gesagt worden, daß die Berechnungen des "Club of Rome", vor dem 1. Weltkrieg aufgestellt, ergeben hätten, daß Ende der dreißiger Jahre kein Kupfer mehr vorhanden sein würde - zur Zeit herrscht ein großes Überangebot. Die zunehmenden wirtschaftlichen Schwierigkeiten der meisten Entwicklungsländer, die häufig über die in den Industriestaaten benötigten Rohstoffe verfügen, werden deren Exportzwang weiter verstärken und die Preise und das Angebot entsprechend beeinflussen [1].

Bei den Rohstoffen zur Gewinnung von Kunststoffen muß beachtet werden, daß die bislang wichtigsten Ressourcen Erdöl und Kohle als fossile Brennstoffe bedeutende Träger der Energieversorgung sind und die Rohstoffverfügbarkeit zu akzeptablen Kosten nicht allein von der Kunststoffnachfrage abhängt. Hier muß bei langfristig kritischer werdender Verfügbarkeit des Rohöls abgewogen werden, ob es nicht sinnvoll wäre, auf andere Energiequellen mehr Gewicht zu legen und/oder die Erforschung weiterer geeigneter Naturprodukte als Basis für Kunststoffe zu forcieren. So sind pflanzliche Ausgangsstoffe bzw. daraus gewinnbare Stoffe und entsprechende Verfahren verfügbar, also Rohstoffe, die nachwachsen können [268]. Bei ausreichender und preiswerter Energieversorgung können Kunststoffe allerdings nicht absolut knapp werden, da die wichtigsten Grundelemente wie Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff oder auch Silizium praktisch unbegrenzt vorhanden und damit bei entsprechender Technologie auch ebenso langfristig verfügbar sind [1].

Wegen der großen Unsicherheit aller Verfügbarkeitschätzungen und der Aussagen dazu in der Literatur soll hier auf eine genauere Betrachtung des Themas verzichtet werden.

4.6 WIEDERVERWERTBARKEIT

4.6.1 Recycling

- Stahl

Die Aufbereitung von Altfahrzeugen konventioneller Bauart und die Wiederverwendung des Eisenschrotts sind weitgehend ausgereift und üblich. Steigende Anteile anderer Werkstoffe können jedoch zu Problemen führen, da die Trennung in den Shredderanlagen schwieriger wird und weniger hochwertiger Schrott entsteht. Schon geringe Mengen verschiedener NE-Metalle im Schrott, z. B. Kupfer oder Zinn, bewirken schwerwiegende Qualitätseinbußen des Stahls. Blei, Kunststoffe und Gummi können die Öfen schädigen; verschiedene Legierungselemente schaden zwar kaum, gehen aber verloren. Nichtmagnetische und wertvolle rostfreie Stähle sind nicht shreddergerecht und erfordern Mehraufwand bei der Separation. Verzinkte Stähle lassen sich problemlos aufbereiten, das Zink (auch aus Messing oder anderen Legierungen) durch spezielle Filteranlagen auffangen.¹

Im Sinne hoher Lebensdauer und Gebrauchstüchtigkeit, Ressourcenschonung und Recyclingfähigkeit dürfte niedriglegierter, verzinkter Stahl zur Zeit die günstigsten Voraussetzungen bieten. Die Oberflächenveredelungen, d. h. der Lack und sonstige Beschichtungen, gehen jedoch (wie in der Regel ebenso bei den alternativen Werkstoffen) verloren.

- Aluminium

Aluminium läßt sich zwar auch wiedergewinnen, ist aber sehr legierungsempfindlich und eignet sich als Sekundärmaterial weder für Karosseriebleche noch für Strangpreß-

¹ Siehe auch [114], [119], [269].

profile oder andere entsprechend anspruchsvolle Anwendungen. Unsortierter Aluminiumschrott wird daher meist zu Umschmelzlegierungen verarbeitet. Hohe Anteile von Magnesium, Kupfer, Zink und Eisen sind auch in Gußlegierungen problematisch; Blei, Zinn oder Titan dürfen nur in verschwindend geringen Anteilen vorhanden sein. Die Verunreinigung von Aluminumschrott durch Kupfer aus Altfahrzeugen ist allerdings ein geringeres Problem als bei Stahl, da der übliche Cu-Anteil in Umschmelzlegierungen höher liegt als das je Kreislauf in das Aluminium gelangende Fremdkupfer.

Höherer Aufwand ist auch bei der Separierung des Aluminumschrotts aus Altfahrzeugen notwendig, da Tieftemperaturverfahren, Magnetabscheider oder Windsichter noch keine befriedigenden Ergebnisse liefern und weitere nachgeschaltete Trennverfahren erforderlich sind. Der hohe, in das Aluminium investierte Energieaufwand läßt diese Verfahren allerdings gerechtfertigt erscheinen. Die Regenerationsenergie beträgt nur etwa 25 % der Primärherstellenergie.

Zur Lösung dieser Probleme wird man in Zukunft trennfreundlichere Konstruktionen, verbesserte Verwertungstechnologie und gezielte Demontage von Altfahrzeugen anstreben müssen. Ob allein der Vorschlag zur Anlage von Trennabriken den gewünschten Erfolg bringen würde, muß in Frage gestellt werden, da z. B. die Aluminiumtür des Porsche 928 (Bild 60) tatsächlich nur zu einem Drittel aus Aluminium besteht. Die Demontage der Altteile müßte also sehr detailliert durchgeführt werden, was die Wirtschaftlichkeit beeinträchtigt. Ein bereits jetzt leicht durchzuführender Schritt könnte die Kennzeichnung von Bauteilen nach dem verwendeten Material sein, um z. B. durch Vorsortierung in Autoverwertungsbetrieben höherwertigen Schrott zu erhalten.¹

¹ Siehe auch [2], [114], [130], [262], [270], [271].

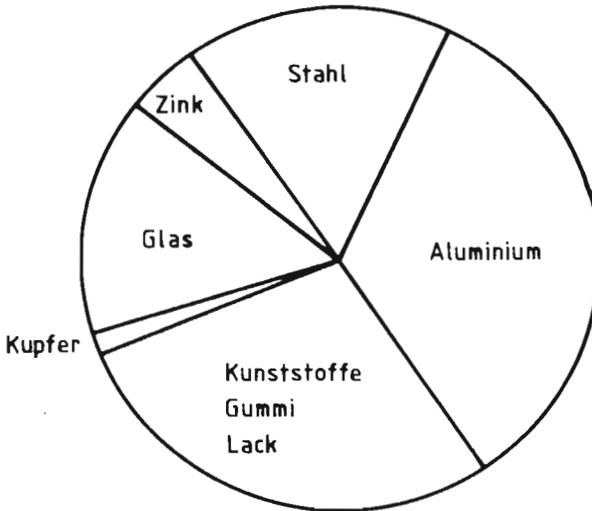


Bild 60: Tatsächliche Materialzusammensetzung einer mit Aluminiumblechen gefertigten Pkw-Tür [262].

- Kupfer

Da Kupfer sowohl im Aluminium- als auch im Stahlkreislauf schon bei Überschreiten geringer Mengen stört, andererseits der Kupferspiegel aber mit jedem Durchlaufen des Kreises steigt und nur mit hohem Aufwand aus Legierungen wieder entfernt werden kann, sollte es als Legierungsbestandteil nur zurückhaltend verwendet werden. Da das u. U. für eine Substitution in Frage kommende Aluminium wegen der geringeren Leitfähigkeit größere Kabelquerschnitte benötigt, damit einen erhöhten Raumbedarf hat und sich auch nicht so gut ziehen läßt, wird sich das Kupfer nicht allein auf die elektronischen Bauteile beschränken lassen und damit weiterhin seinen Anteil im Pkw und damit im Schrott behaupten. Das Kupfer selbst läßt sich mit hoher

Reinheit wieder aufbereiten, der dazu erforderliche Energieaufwand kann aber höher sein als bei der Gewinnung von Primärmaterial.¹

- Zusammenfassung Metalle

Bei den Metallen ist die Erzeugung hochwertiger Produkte ohne bleibende Qualitätseinbußen durch Sortier-, Umschmelz- und Reinigungsverfahren möglich. Nachteilig ist der hohe Energiebedarf für den Aufschluß, die Sortierung und Erschmelzung, weshalb durch eine direktere Weiterverwertung die derzeitigen Energie- und Materialverluste verringert werden könnten. Aufkonzentrierungen an Kupfer und Zinn im Roheisen müssen verhindert werden, ferner die Verluste an Buntmetallen und Beimischungen von Metallen. Der Trend zur vermehrten Verwendung von Leichtmetallen wird die Anwendung spezieller Separiertechniken noch dringlicher machen [119].

- Kunststoffe

Kunststoffe und andere nichtmetallische Komponenten eignen sich zur Zeit am wenigsten für die Wiederverwendung. Abgesehen von ihrem Heizwert gehen sie zum größten Teil verloren. Unter der Voraussetzung, daß sie separat sortiert werden, lassen sie sich teilweise als Füllstoffe einsetzen. Die daraus hergestellten Bauteile sind jedoch nicht immer in der Qualität den im Pkw-Bau verwendeten hochwertigen Werkstoffen vergleichbar. Die Reextrusion führt zu Qualitätsverschlechterungen; die Vermischung mit anderen Kunststoffen und fehlende Trennverfahren führen (ausgenommen bei der Handsortierung bzw. Aussortierung bekannter Stoffe) zur Produktion von Artikeln für geringere Anforderungen.²

¹ Siehe auch [2], [130], [270].

² Siehe auch [119], [146].

Bei der Verwertung von Kunststoffabfällen sind hauptsächlich folgende Gruppen zu unterscheiden [119]:

Duromere,
 Thermoplaste,
 sortenreine, definierte Abfälle mit und ohne Verschmutzungen,
 Kunststoffgemische mit und ohne Verschmutzungen.

Duromere können gemahlen als Füllstoff wiedereingesetzt werden. Thermoplaste lassen sich im Extruder replastifizieren und je nach Abfallqualität zu einem mehr oder weniger hochwertigem Produkt verarbeiten, wobei sich geringe Anteile an Schmutzanhaftungen nach der Plastifizierung durch Wechselsiebe ausscheiden lassen. Farbgemische werden durch Zuschläge von Schwärzungsmitteln zu dunklen Partien verarbeitet. Infolge eines unvermeidlichen Kettenabbaues durch mechanische und thermische Einflüsse in der Zerkleinerungseinrichtung und im Extruder besitzt das Regrenulat oder das direkt erzeugte Spritzgußteil oft geringere Qualitäten in der Festigkeit oder der Temperaturbeständigkeit. Produktionsabfälle von Thermoplasten lassen sich im Gegensatz zu Altmaterial oder Kunststoffgemischen gut wiederverarbeiten, siehe nächstes Kapitel.

Verfahren zur Aufbereitung von Kunststoffabfällen wie die (allerdings selbst noch viel Energie verbrauchende) Pyrolyse (Bild 61) und die Hydrolyse sind in der Entwicklung und können das Recycling in Zukunft wirtschaftlicher machen. Wegen der Schädlichkeit in Konverteranlagen sollte auf die Verwendung von PVC verzichtet werden. Das große Angebot an Kunststoffen schränkt die Wirtschaftlichkeit des Recyclingmaterials allerdings deutlich ein. Es gehen allerdings die Meinungen darüber weit auseinander, wie die Situation beim Kunststoff-Recycling zu werten ist. Aus der Sicht der Rohstoffhersteller dürfte das Recycling nicht unbedingt ein primäres Anliegen sein.¹

¹ Siehe auch [1], [119], [272].

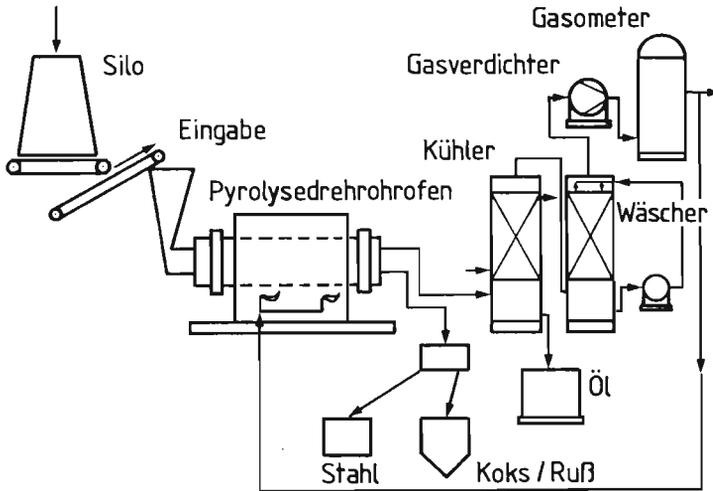


Bild 61: Schema eines Pyrolyseverfahrens zur Verwertung von Altreifen [273].

- Altreifen

Bei den Verwertungsverfahren für Altreifen ist die in Bild 61 gezeigte Pyrolyse von besonderer Bedeutung. Hierbei wird unter weitgehendem Luftabschluß der Altstoff (ebenso Kunststoffe, Gummi, Holz, Papier und anderes Material mit nennenswertem Heizwert) thermisch zersetzt und Pyrolyseöl und/oder -gas gewonnen, welches vor allem für Heizzwecke oder als Schmieröl verwendbar ist. Es ist mit einer Ausbeute von 25 bis 35 % zu rechnen, der Rest wird zur Aufrechterhaltung des Prozesses benötigt. Die Reifenpyrolyse steht dabei an der Grenze zum kostendeckenden Betrieb.¹

¹ siehe auch [119], [273], [274], [275].

4.6.2 Precycling

Ein weiterer bedeutsamer Aspekt ist die auch Precycling genannte Wiederverwendung von getrennt gesammelten Produktionsabfällen. In einer Karosserie sind nach der Fertigung z. B. nur noch ca. 80 % des dafür eingesetzten Gewichts an Blechen vorhanden, bei Guß- und Schmiedeteilen 85 bis 90 %. Durch Aufbereitung von diesen Abfällen wird es möglich, auch Aluminium-Knetlegierungen aus Sekundärmaterial herzustellen. Auf dem Kunststoffsektor ist die direkte Wiederhinzugabe von Produktionsabfall oder Ausschußteilen aus vielen Thermoplasten zum Rohmaterial beim Verarbeiter meist problemlos. Bei anderen Werkstoffen ist die Erzeugung eines Regenerats unter Beachtung verschiedener Richtlinien möglich, bei gefüllten Werkstoffen jedoch schwierig. Bei Duromeren ist die direkte Wiederverarbeitung von Produktionsabfällen nur als Füllstoff möglich.

Steigende Rohstoff- oder Produktionskosten könnten die Regeneration abgenutzter Bauteile ("Intercycling", [130]) fördern, wie dies bei Reifen oder Motorblöcken seit langem praktiziert wird und auch für viele weitere Fahrzeugkomponenten denkbar wäre. Der Erhalt von funktionsfähigen Bauteilen oder Baugruppen ist dem Zerschlagen, Separieren und Wiederaufbereiten sicherlich überlegen. Eine Verallgemeinerung dieses Gedankens ist jedoch nicht statthaft, da es angesichts der schon heute leistungsfähigen Altstoff-Recyclingverfahren zweckmäßiger sein kann, an der Weiterentwicklung dieser Aufbereitungstechnologien zu arbeiten. Sichere Untersuchungsmethoden müssen Langzeitschädigungen von Werkstoffen und Konstruktionsteilen ausschließen. Andererseits besteht durch den hohen Automatisierungsgrad bei der Neufertigung mitunter ein Kostenniveau, das bei den derzeitigen Aufarbeitungstechnologien von Altteilen trotz der Material- und Energieersparnisse nicht entscheidend unterboten werden kann.¹

¹ Siehe auch [262], [276].

4.7 ENERGIEAUFWAND

4.7.1 Energiebilanz

Im Zuge der Energieverteuerung, des zunehmenden Umweltbewußtseins und der Ressourcenschonung gewinnt die Frage an Bedeutung, wieviel Energie für die Rohstoffgewinnung, Verarbeitung, den Gebrauch und die Wiederverwertung eines Fahrzeugbauteiles benötigt wird. Ein direkter Vergleich definierter Massen- oder Volumeneinheiten ist allein nicht aussagekräftig, da für Teile aus unterschiedlichen Werkstoffen nicht nur durch angepaßte Dimensionierung unterschiedliche Mengen benötigt werden, sondern materialspezifisch andere Bauweisen und Änderungen weiterer einflußter Baugruppen zu bedenken sind (siehe auch Bild 158).

In einer Studie für ein Langzeitauto [114] ist im Jahre 1976 der Energiebedarf für Rohstoffgewinnung und Produktion eines Fahrzeugs bei Bevorzugung von Eisenwerkstoffen oder von Aluminium verglichen worden. Es zeigte sich, daß bei maximalem Einsatz von Eisenwerkstoffen nur wenig mehr Energie als bei einem konventionellen Durchschnittsserienfahrzeug benötigt wird, bei maximaler Aluminiumanwendung dagegen eineinhalbmals soviel. Bezieht man jedoch auch den Betrieb einschließlich der Reparaturvorgänge und Verschrottung ein, so ist der Energiebedarf eines Fahrzeugs mit möglichst hohem Aluminiumanteil über eine Lebensdauer von 300 000 km um 14 % geringer und um 15 % geringer als bei zwei konventionellen Fahrzeugen mit einer Lebensdauer von 150 000 km.

Für ein Fahrzeug mit maximalem Einsatz von Kunststoffen ist der obige Vergleich der Energiebilanz nicht vorgenommen worden, da die Eignung für tragende Teile an einem Langzeitauto in Serienproduktion als nicht wahrscheinlich angesehen wurde. Setzt man jedoch grob an, daß ein derartiges Fahrzeug im ungünstigsten Falle die gleiche

Herstellenergie benötigt wie ein konventionelles, jedoch in etwa die gleiche Gewichts- und damit Kraftstoffersparnis wie das Aluminiumfahrzeug erbringt, ergibt sich eine Gesamtenergieeinsparung von 14 % gegenüber der konventionellen Bauweise und von 6 % gegenüber dem Aluminiumfahrzeug im günstigsten Falle. Dabei wurde die Annahme von 20 % sparsameren Motoren als in der Langzeitstudie getroffen sowie eine Lebensdauer von 150 000 km von je 2 Fahrzeugen angesetzt.

Da für die Aluminiumherstellung allerdings sehr viel elektrische Energie verwendet wird, hängt der tatsächliche Energieaufwand auch vom Wirkungsgrad der Stromerzeugung ab, so daß die Energieeinsparung auf 8 - 10 % schrumpfen kann und bei kürzer angesetzter Lebensdauer sogar in einen Mehrverbrauch umschlagen kann. Man kann auch sagen, je sparsamer die Motoren werden, desto ungünstiger schneidet Aluminium im Vergleich ab, da der Mehraufwand an Energie für die Erzeugung dieses Werkstoffes in proportional geringerem Maße während des Betriebs des Fahrzeugs eingespart wird.

Da für Gußlegierungen das energiebedarfgünstigere Sekundär- bzw. Recyclingmaterial verwendet werden kann, sollte diese Möglichkeit auch genutzt werden, um die Energiebilanz des Aluminiums zu verbessern. Bild 62 zeigt die Energieeinsparung über der Laufstrecke bei Verwendung von Aluminium anstelle von Stahl, jeweils unterschieden nach Stadt- und Überlandverkehr sowie mit oder ohne Berücksichtigung der im Werkstoff potentiell enthaltenen Herstellungs- und Verarbeitungsenergie beim Recycling. Im günstigsten Fall kann die bei der Herstellung zunächst negative Energiebilanz bei Einberechnung des wiedergewinnbaren Potentials schon nach ca. 30 000 km positiv werden, ohne Recycling dagegen erst nach ca. 70 000 km. Im ungünstigsten Falle liegt die Schwelle aber bei über 130 000 km Laufleistung und wird heute zumindest mit kleinen Pkws häufig nicht erreicht, d. h. die Bilanz bleibt negativ.

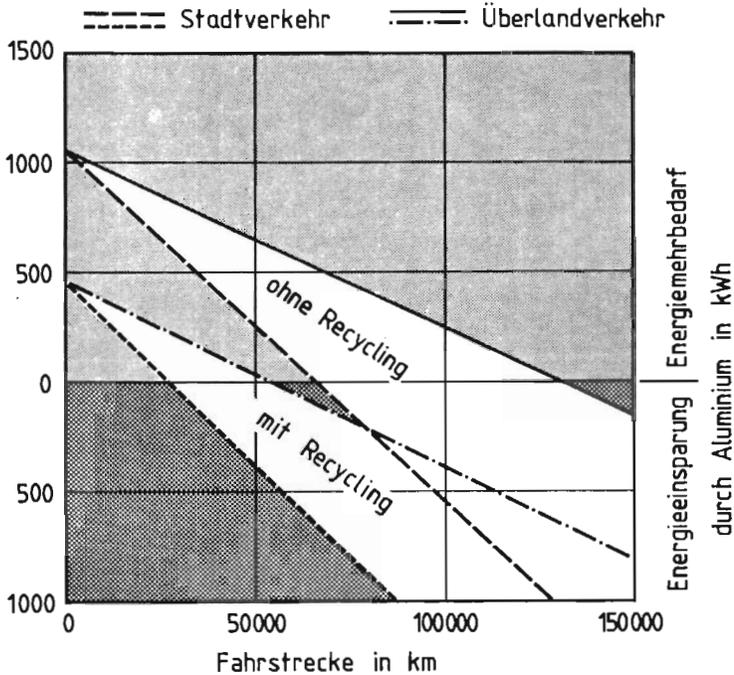


Bild 62: Energieeinsparung durch Leichtbauwerkstoffe über der Laufstrecke [181], [262].

Für den Endverbraucher äußert sich die Energieeinsparung über der Fahrstrecke durch das verminderte Gewicht bei einer Aluminiumkarosserie direkt als geringer Kraftstoffverbrauch und damit als verringerte Betriebskosten. Den Energiemehrverbrauch bei der Herstellung spürt er dagegen nur mittelbar über den höheren Anschaffungspreis, ohne daß er ein anschauliches Merkmal dafür am Fahrzeug erkennen könnte. Es bleibt also abzuwarten, ob dem durchschnittlichen Käufer der höhere Preis und die spätere Amortisation plausibel gemacht werden kann, obwohl sich das Fahrzeug weder äußerlich noch durch aufwendige Technik unter der Motorhaube von anderen unterscheidet.

4.7.2 Energiebedarf der Werkstoffe

Die häufig zu findenden Vergleiche des Energieaufwandes bezogen auf ein bestimmtes Volumen scheinen zunächst auf eine deutliche Überlegenheit der Kunststoffe über den Stahl sowie ein extrem schlechtes Abschneiden der Leichtmetalle hinzuweisen (siehe z. B. Bild 157). Vergleicht man aber gleiche Gewichte, steht nun z. B. Stahl sehr günstig da. Um tatsächlich Energie einzusparen, müssen mit Kunststoffen Gewichtsreduzierungen mindestens auf die Hälfte des Stahlteils zu erzielen sein. Dies ist in der Regel

Bauteil	Herstellung	Herst. und Betrieb
Kühlventilatorgrill Stahl	30 %	46 %
Schalthebelgehäuse Aluminium	58 %	52 %
Lenksäulenschloß Zink	43 %	75 %

Bild 63: Energieeinsparung bei Teilen aus Kunststoff statt Metall (Zahlen nach [213]).

aber nur möglich, wenn ein Stahlteil nicht so günstig gestaltet werden kann wie ein Kunststoffteil und seine Überlegenheit in den mechanischen Eigenschaften nicht genutzt wird. Bild 63 zeigt die Energieeinsparung bei einigen Bauteilen, Bild 64 den Energieaufwand bezogen auf Gewicht und Volumen (ausführlicher in Bild 131 im Anhang). Vergleicht man wie in Bild 65 Bauteile gleicher Steifigkeit (ausführlicher in Bild 138 im Anhang), schneiden Glas und faserverstärkte Werkstoffe günstiger als Stahl ab, nicht aber die gängigen Kunststoffe, von denen einige sogar in die Größenordnung der Leichtmetalle vorstoßen. In Bild 65 bedeutet Steifigkeit proportional $E^{1/3}$ bezogen auf gleiche Biegesteifigkeit, $E^{1/2}$ bezogen auf einen geschätzten Ansatzwert für die Beul- oder Knicksteifigkeit (siehe dazu das Berechnungsverfahren in Kapitel 4.2).

	Spez. Gew. (kg/dm ³)	Energieauf. (kWh/kg)	Energieauf. im Vergl. zu Stahl
Stahl	7,8	9,6	1
Aluminium	2,7	58,0	6,0
Glas	2,4	12,0	1,3
SMC	1,5	20,0	2,1
PA 6.6, 30 % Glas	1,4	47,0	4,9
PP-GM 30	1,2	30,0	3,1
ABS	1,1	25,0	2,6
PMMA	1,2	22,0	2,3
PC	1,2	41,0	4,3

	Spez. Vol. (dm ³ /kg)	Energieauf. (kWh/cm ³)	Energieauf. im Vergl. zu Stahl
Stahl	0,13	0,75	1
Aluminium	0,37	1,57	2,1
Glas	0,42	0,29	0,4
SMC	0,67	0,30	0,4
PA 6.6, 30 % Glas	0,71	0,66	0,9
PP-GM 30	0,83	0,36	0,5
ABS	0,91	0,28	0,4
PMMA	0,83	0,26	0,4
PC	0,83	0,49	0,7

Bild 64: Energieaufwand bei verschiedenen Werkstoffen; oben Vergleichsbasis Gewicht, unten Vergleichsbasis Volumen (nach Zahlen aus den in dem ausführlicheren Bild 131 angegebenen Quellen).

	Energieaufw. Stfgt. prop. E-Modul ¹	Energieaufw. Stfgt. prop. E ^{1/2}	Energieaufw. Stfgt. prop. E ^{1/3}
Stahl	1	1	1
Gußeisen	1,82	1,38	1,26
Zink	3,94	2,64	2,31
Aluminium	6,19	3,60	3,00
Glas	1,18	0,68	0,57
Magnesium	12,21	5,66	4,38
SMC	8,41	1,84	1,11
PA 6.6 30 % Glas	24,60	4,65	2,67
PP 40 % Gl.	15,30	2,48	1,35
ABS	19,28	2,66	1,38
PVC	21,42	2,64	1,32
PMMA	24,47	2,93	1,44
PC	55,19	6,02	2,88
PBTB + PC	37,86	4,05	1,92

Bild 65: Relativer Energieaufwand der Werkstoffe bei unterschiedlicher Wichtung der Steifigkeit (nach Zahlen aus den in dem ausführlicheren Bild 138 angegebenen Quellen).

Eine wesentliche Energieeinsparung durch Kunststoffe ist erst bei Einbeziehung des geringeren Fahrzeuggewichts im Betrieb in die Bilanz zu erreichen und bei Vergleich typischer, jeweils optimal den Werkstoffeigenschaften angepaßter Bauteile. Bei Einbeziehung des Recyclings kommen auch die in der Rohstoffherstellung zunächst sehr ungünstigen Leichtmetalle zu befriedigenden Ergebnissen.

Bild 66 zeigt die Prozeßkette eines Aluminiumbauteils vom Abbau des Bauxits bis zur Wiederverwendung gebrauchter Teile. Man sieht, daß das Aluminium beim Recycling die energetisch besonders ungünstigen Schritte nicht wieder durchlaufen muß, bis es in die Schmelze kommt. Leider lassen sich dann nach dem heutigen Stand der Technik daraus keine hochwertigen Knetlegierungen mehr erzeugen.

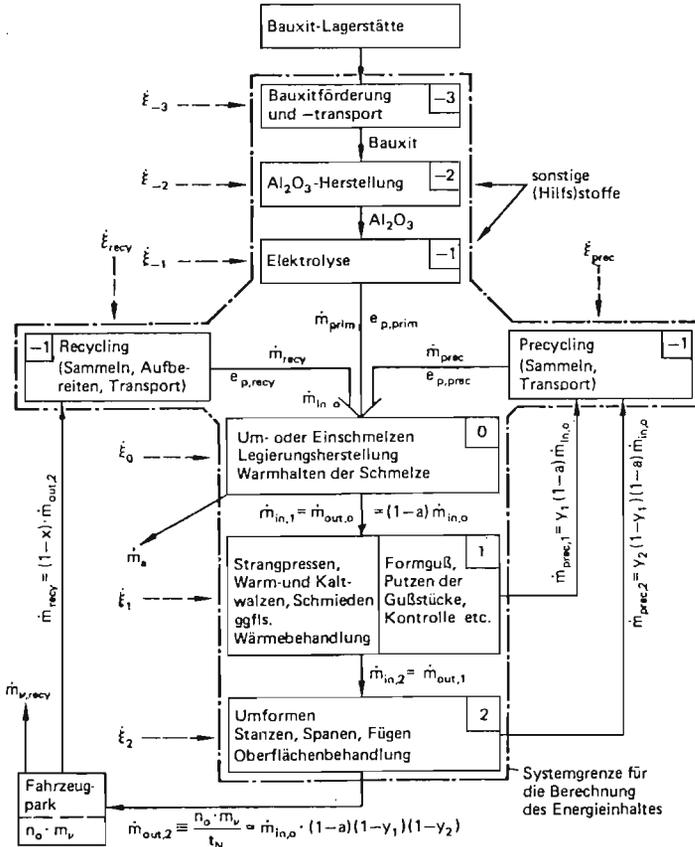


Bild 66: Prozeßkette eines Aluminiumbauteils [153].

Bei Recherchen nach dem Energiebedarf für die Erzeugung verschiedener Werkstoffe darf nicht außer Acht gelassen werden, daß viele Angaben letztlich auf wenige Quellen zurückgehen (wobei z. B. häufig auf Zahlen aus den Häusern DuPont oder Bayer zurückgegriffen wird). Ein weiteres Problem liegt in der oft mangelhaften Vergleichbarkeit der Daten, wobei weniger die teils massen-, teils volumenbezogenen Angaben, als vielmehr ein nicht erläuterter Umfang der Energieabschätzung die Schwierigkeit darstellt. So wird z. B. bei Kunststoffen mitunter zwar die in den fossilen Rohstoffen enthaltene Energie miteinberechnet, der Energieaufwand für die im Werkstoff verwendeten Füll- und Verstärkungsstoffe dagegen nicht weiter erläutert. Bei Aluminium muß beachtet werden, daß Gußlegierungen einen geringeren Energiebedarf als Knetlegierungen haben, wenn Sekundärmaterial, wie in Bild 66 gezeigt, verwendet werden kann.

4.8 UMWELTBELASTUNG

Die durch den Pkw verursachten Umweltbelastungen beginnen schon bei der Gewinnung und Aufbereitung der Rohstoffe, nicht erst bei Produktion und Betrieb der Fahrzeuge, und enden bei der Beseitigung von Produktionsabfällen und stillgelegten Altfahrzeugen oder deren Wiederverwertung.

Bei der Betrachtung der Rohstofflager werden schon bemerkenswerte Unterschiede in der Umweltbeeinträchtigung deutlich. Ein erschöpftes Öl- oder Erdgasvorkommen unter der Erde ist nach Abbau der Fördergeräte relativ problemlos und hinterläßt kaum Spuren, während vergleichsweise die Abraumhalden des Bauxits für die Aluminiumgewinnung umfangreiche und damit teure Rekultivierungsmaßnahmen erfordern, ebenso der Kohletagebau. Magnesium dagegen läßt sich aus ökologischer Sicht problemlos auch aus dem Meerwasser gewinnen (allerdings mit relativ hohem Energieaufwand) [2].

Die Aufbereitung der Metalle bedingt Umweltbelastungen u. a. durch Luftverschmutzung und Abwärme in den Stahlwerken, bei Aluminium mittelbar auch über die notwendigen hohen Kraftwerkskapazitäten. Schwefeldioxid und Stickoxide entstehen bei Verbrennungsprozessen für die Energiegewinnung; Aluminiumhütten z. B. können fluorhaltige Substanzen abgeben. Die Reinigung der Rauchgase von Säurebildnern und Schwermetallen ist ein aktuelles Problem.¹

Die Erzeugung der Kunststoffe läßt sich bei entsprechenden Vorkehrungen umweltschonender durchführen, die notwendige Energie muß aber ebenfalls erst erzeugt, und die teilweise hochgiftigen, krebserregenden oder anderweitig gefährlichen Abfallstoffe und Nebenprodukte der chemischen Industrie müssen beseitigt werden. Die Belastung der Umwelt mit Schadstoffen aus diesem Industriezweig ist mengenmäßig

¹ Siehe auch [277], [278].

deutlich geringer als z. B. durch die Montanindustrie und schwer zuzuordnen. Einige Kohlenwasserstoffe sind aber teilweise erheblich schwieriger zu handhaben und zu beseitigen, wie das aktuelle Beispiel der Dioxine zeigt. Dazu kommt das Problem der mitunter unsachgemäßen Beseitigung im Hausmüll sowie der bei unvollständigen Verbrennungsprozessen gebildeten Schadstoffe. Über alles gesehen kann man wohl sagen, daß bei der Kunststoffherzeugung zwar relativ geringe Umweltbelastungen auftreten, bei der Kunststoffbeseitigung u. U. aber mehr bzw. gefährliche Abfallstoffe produziert werden können.¹

Einige der giftigen Chemikalien werden ohnehin kaum in der kunststoffherzeugenden Industrie benötigt, sondern z. B. in der Elektrotechnik wie das Kühlmittel PCB. Das Schwermetall Cadmium wird zwar zu 18 % bei der Kunststoffherzeugung (PVC) verwendet, 40 % fallen aber durch Galvanik, Legierungen und NC-Batterien sowie 30 % in der Farbenherstellung an. Das Problem ist dabei die Anreicherung in Klärschlämmen, die sicher deponiert werden müssen.¹

Hier stellt sich die Frage, ob es in Zukunft nicht sinnvoller sein kann, einen höheren, aus umweltfreundlicheren Wasser- oder Solarkraftwerken zu deckenden Energieverbrauch für die Erzeugung von Stoffen mit hohem Energiebedarf in Kauf zu nehmen, als stetig wachsende Lager aus mit Vorsicht zu handhabenden Abfällen der Produktion verschiedener Werkstoffe mit günstiger Energiebilanz anzulegen. Der Energiebedarf allein sollte kein übergeordneter Indikator für die Umweltbelastung durch verschiedene Werkstoffe sein.

Produktionsabfälle und stillgelegte Altfahrzeuge werden ebenfalls zu einer Umweltbelastung, wenn sie sich nicht zur Wiederverwertung eignen. Selbst wenn es gelingen würde, die Bauteile durch biologischen oder chemischen

¹ Siehe auch [278].

Abbau in eine unschädliche Form zurückzuverwandeln und geeignet zu lagern, dürfte dieses Vorgehen nicht immer sinnvoll sein, da für die laufende Produktion desto mehr neue Rohstoffe benötigt werden und wiederverwertbare Altteile nicht nur der Ressourcenschonung dienen, sondern auch eine erhebliche Umweltentlastung bedeuten.

Der ideale Rohstoff würde sich ohne Landschaftsschäden abbauen oder aus dem Meer gewinnen lassen, wenig Energie zur Aufbereitung benötigen und sich mehrfach ohne Qualitätseinbuße wiederverwenden lassen. Diesen Wünschen am nächsten kommen zur Zeit die Eisenwerkstoffe; wenn auch nicht optimal, so doch heute schon mit befriedigender Wirtschaftlichkeit. Entwicklungsziel auch bei den anderen Werkstoffen muß es daher sein, die Recyclingmöglichkeiten zu verbessern, um auf diesem Wege die Umweltbelastungen durch Rohstoffherzeugung und Abfallbeseitigung zu vermindern.

Produktion und Betrieb der Fahrzeuge führen zu nicht unerheblichen Umweltbeeinträchtigungen. Während die Produktion eher Probleme verursacht, die mit heutigen Mitteln in den Griff zu kriegen sein sollten (Abwasserreinigung, Auffangen von Lösungsmitteln und Dämpfen, Abscheideanlagen, Lärmschutz), verursacht der Betrieb der Fahrzeuge über das bekannte Abgasproblem hinaus Geräuschemissionen, Kraft- und auch Schmierstoffverluste mit entsprechenden Grundwasserverschmutzungen, Abrieb von Reifen und Brems- und Kupplungsbelägen (Asbest zur Zeit in der Diskussion), die Beseitigung von Waschmitteln, Frostschutzzusätzen, abgenutzten Verschleißteilen usw., im weiteren Sinn auch die durch den Straßenbau verursachten Einflüsse.

Während sich einige der genannten Punkte mit entsprechendem Mehraufwand zum Teil verbessern lassen, bleibt die Frage der Verbrennungsprodukte heutiger Motoren prinzipiell ungelöst. Lediglich schrittweise Verbesserungen finden statt in Form einer Minderung der Abgasmengen durch

Wirkungsgradverbesserung, Verbrauchssenkung über geringeres Fahrzeuggewicht oder weiterer anteiliger Schadstoffreduktion z. B. mit Abgaskatalysatoren. Mittelfristig ist die allgemeine Einführung alternativer Antriebe wie z. B. Elektro- oder Wasserstoffmotoren jedoch nicht zu erwarten, da eine zufriedenstellende Lösung der bestehenden technischen Probleme, insbesondere der Reichweite bei vertretbarer Größe und Gewicht des Energiespeichers, kaum vorhersehbar ist. Ein großer Teil der heute gebauten Fahrzeuge wird im Jahre 2000 durchaus noch in Gebrauch und auf die konventionelle Infrastruktur angewiesen sein.

5. AUTOMATISIERUNG UND ARBEITSPLATZSITUATION

5.1 INDUSTRIEROBOTER

Der Produktionsprozeß zur Herstellung von Fahrzeugen hat sich aus der Einzelanfertigung zu hochgradiger, arbeitsintensiver Massenproduktion entwickelt. Bis in die siebziger Jahre hinein wurde bei der Produktion eine Einzweckmechanisierung betrieben. Das bedeutet, daß alle für den automatischen Fertigungsprozeß eines bestimmten Fahrzeugtyps erforderlichen Produktionsmittel wie Maschinen, Werkzeuge und Vorrichtungen, individuell auf dieses eine Produkt abgestimmt waren. Hohe Stückzahlen setzten keine überhöhten Anforderungen an Flexibilität und Umrüstzeiten; die Priorität galt allgemein der Automation zur Erfüllung des Produktionsziels. Die Situation änderte sich im Laufe der Zeit, in dem der Markt eine beschleunigte Anpassung an seine Bedürfnisse verlangte. Unter der Zielsetzung der gewandelten Fertigungsphilosophie galt es, universelle Betriebsmittel und Mechanisierungseinheiten zu entwickeln. Der Industrieroboter wurde mit seiner speicherprogrammierbaren Steuerung als Mittel für die Erstellung flexibler Systeme der automatischen Fertigung erkannt [111].

- Einsatzbereiche für Roboter

Die Wesensmerkmale des Industrieroboters und seine Auswirkungen auf die Fertigungseinrichtungen sind [111]:

- freie Programmierbarkeit,
- flexible Produktionseinrichtung,
- hohe Wiederverwendbarkeit,
- fertigungstechnische Änderungen kurzfristig möglich,
- Produktänderungen von geringem Einfluß.

Als Einsatzbereiche bzw. technische Ziele zeichnen sich für den Industrieroboter bevorzugte Aufgabengebiete ab, wie

- Werkstückhandhabung,
- Werkzeughandhabung,
- Schweißen,
- Beschichten,
- Montage.

Dem Gedanken der Humanisierung der Arbeitsplätze wird beim Einsatz von Robotern einerseits durch Entlastung des Personals von Umgebungseinflüssen, wie

- Taktbindung,
- Temperatur,
- Gase, Dämpfe,
- Lärm, Erschütterung,
- Strahlung, Funkenflug,

und andererseits durch Entlastung von körperlichen Anforderungen, wie

- Muskelbeanspruchung,
- ungünstiger Körperhaltung,
- Schutzbekleidung,
- Unfallgefahr und
- Berufskrankheiten,

Rechnung getragen [111].

Heute zum Einsatz kommende Industrieroboter sind programmgesteuerte, nach dem "Teach-in"-Verfahren programmierte Geräte. Dies bedeutet, daß der Mensch schrittweise den geforderten Bewegungsablauf durch langsames Abfahren der Bewegungen in die Robotersteuerung eingibt. Aufgrund seiner Freiheitsgrade, typisch sind sechs Achsen, trägt der Roboter zu Problemlösungen bei, die mit herkömmlichen Mechanisierungselementen unter wirtschaftlichen Gesichts-

punkten nicht möglich waren. Bei der Realisierung des Roboterereinsatzes zeigt sich jedoch häufig, daß der Mensch im Gegensatz zum Roboter in der Lage ist, sich an ständig sich ändernde Einsatzbedingungen in relativ großen Grenzen anzupassen. Dazu gehören Lagetoleranzen der zu handhabenden bzw. zu bearbeitenden Teile, unterschiedliche Taktzeiten, Arbeitsgeschwindigkeiten und das Problem des Stillsetzens und des Wiederanfahrens einer Anlage im Rahmen einer Störung. Der Roboter kann nur programmspeicherte Arbeitsabläufe beliebig oft wiederholen.¹

Derzeit werden die Roboter zu fast 90 % zum Punktschweißen und Lackieren eingesetzt. Bild 132 im Anhang zeigt dazu die für die Zukunft erwarteten Einsatzbereiche für Roboter nach einer Expertenumfrage im Rahmen des M.I.T.-Projekts "Zukunft des Automobils". In dieser Expertenumfrage [212] sind die folgenden Punkte für erwartete neue Maschinentechnologien für 1990 und 2000 genannt worden:

Für 1990:

- Übergang von NC- auf CNC- und DNC-Steuerung²,
- Einsatz von NC-Maschinen,
- Zunahme von Kunststoffverarbeitungsmaschinen,
- fortschreitende Automatisierung,
- integrierte Qualitätskontrollen mit Datenspeicherung und Nacharbeit,
- CAD-Verkettung von F & E mit der Produktion,
- automatisches Messen in der Maschine,
- Standzeiterhöhungen der Werkzeuge,
- Einsatz von Maschinen mit höherer Produktivität,
- Einsatz von Maschinen mit geringerem Energieverbrauch.

¹ Siehe auch [279], [280].

² NC: Numerical Control; CNC: Computerized Numerical Control; DNC: Direct Numerical Control; siehe [135].

Für 2000:

- selbstkorrigierende Maschinen,
- Möglichkeit zur variantenreichen Produktion,
- Zunahme von Kunststoffverarbeitungsmaschinen,
- Laser als Werkzeug,
- Messen in der Maschine,
- vorwiegend DNC-Steuerungen,
- Bearbeitungsverfahren für neue Werkstoffe.

Im einzelnen kann für die verschiedenen Bereiche des Roboter-einsatzes gefolgert werden:

- **Punktschweißarbeiten:**

Diese Überwiegend im Karosserierohbau anfallende Arbeit wird bereits häufig von Robotern durchgeführt. Die bis zum Jahr 2000 erkennbare Tendenz, einen sehr hohen Anteil der Aufgaben in diesem Bereich von Handhabungsgeräten durchführen zu lassen, läßt unter Einbeziehung der Anmerkungen die Vermutung zu, daß verstärkt Arbeitskräfte auf Wartungs- und Reparaturarbeiten umgeschult werden.

- **Lichtbogenschweißen:**

Durch die Lösung des Bahnsteuerproblems bei Schutzgas-schweißverfahren unter Einsatz von Robotern wird erwartet, daß die Beherrschung des Erkennens und Korrigieren von Preßteil- und Baugruppentoleranzen sowie die Optimierung des Schweißvorganges keine wesentlichen Probleme für den schon bis 1990 erwarteten deutlichen Anstieg der Robotisierung in diesem Bereich darstellen. Bis zum Jahr 2000 erscheint eine Ausrüstung mit Handhabungsgeräten für bis zu 3/4 aller Aufgaben denkbar.

- **Beschichten:**

Schon heute gehören neben den Schweißarbeiten Beschichtungsaufgaben wie das Auftragen von Lackaufbau und Unterbodenschutz zu den klassischen Einsatzgebieten von Industrierobotern. Der erwartete Verlauf der weiteren Entwicklung der Einsatzmöglichkeiten spezieller Beschichtungsroboter führt zu einem ganz ähnlichen Mechanisierungsniveau mit flexibler Charakteristik wie bei den Schweißarbeiten.

- **Werkstückhandhabung:**

Umfangreiche Investitionen im Bereich der Werkstückhandhabung zum Beschicken von Maschinen durch Roboter werden für möglich gehalten. Mehr als jede zweite heute von menschlicher Hand durchgeführte Tätigkeit muß in dieser Kategorie als potentiell im Jahr 2000 durch Mechanisierung ersetzte Bewegung angesehen werden.

- **Montage:**

Werkstückerkennung, Positionierung und Prozeßsteuerung verlangen beim Einsatz von Industrierobotern für Montageaufgaben die Verwendung von optischen oder anderen geeigneten Sensoren. Für die im Automobilbereich komplexen Aufgaben befinden sich diese derzeit noch in der Entwicklung, so daß in diesem Sektor die Robotisierung bis zu einem für möglich gehaltenen Grad von ca. 50 % im Jahr 2000 etwas langsamer verläuft.

- **Prüfaufgaben:**

Ebenso wie der sensorabhängige Montagebereich verhelfen die in Aussicht gestellten Entwicklungen auf dem Gebiet der optoelektronischen Meßsysteme der Einführung von Robotern zu einer ähnlich aussehenden Kurve bis zum Jahr 2000.

5.2 ARBEITSPLATZSITUATION

In der M.I.T.-Expertenumfrage [212] sind die folgenden Punkte für erwartete Änderungen der Arbeitsplatzsituation für 1990 und 2000 genannt worden:

Für 1990:

- Entlohnung gemäß der Qualität und nicht nach Quantität,
- höheres Ausbildungsniveau,
- reduzierte Arbeitszeit,
- weniger Arbeitsplätze mit unakzeptablen Arbeitsbedingungen (Luft, Lärm, Licht),
- politische und gewerkschaftliche Einflüsse,
- höhere Verantwortung am Arbeitsplatz,
- weniger Inspektions- und Kontrollarbeiten,
- ergonomische Arbeitsplatzgestaltung,
- gesteigerte und verbesserte Arbeitsplatzplanung,
- Weiterbildung der Mitarbeiter.

Für 2000:

- niedriges Ausbildungsniveau möglich,
- nur eine Tagesschicht,
- Hauptaufgaben sind Reparatur und Qualitätskontrollen,
- Überwachung von Robotern,
- Zunehmen der Rotation als Mittel gegen Eintönigkeit.

Die Erwartungen an eine umfassende Umstrukturierung und Qualitätsveränderung der Arbeitsplätze in der Automobilindustrie führt nach Expertenmeinung [281] dazu, daß das Ausbildungsniveau, aber auch die qualitativen Erwartungen gegenüber dem Arbeitsplatz sowohl aus Arbeitnehmer- wie auch aus Arbeitgebersicht wachsen könnten. Als eine Konsequenz aus den erwarteten Entwicklungen auf dem Gebiet der

Fahrzeugherstellung, die durch eine umfassende Robotisierung der Produktion in weiten Bereichen zu beschreiben ist, können Umstrukturierungen der Fahrzeugindustrie sowie bevorstehende umfangreiche Investitionen innerhalb der Produktionsstätten gesehen werden. Da nicht davon ausgegangen werden kann, daß bei dem für möglich gehaltenen Robotisierungsgrad von über 50 % in den wesentlichen Bereichen der Automobilproduktion die dort heute beschäftigten Arbeiter auch in Zukunft in der Automobilindustrie Beschäftigung finden werden, wird dieser Industriezweig bezüglich der heute oft zitierten Bedeutung als Arbeitsplatzpotential trotz weiter steigender Produktivität an Bedeutung verlieren. Ob mit einer behutsamen und ausgewogenen Implementierung von Handhabungsgeräten zur Fertigung von Automobilen ein großer Anteil der heute diskutierten Konsequenzen sozialer Art aufgefangen werden kann, ist angesichts der derzeitigen internationalen Konkurrenzsituation fragwürdig.

Diese M.I.T.-Umfrage richtete sich zu einem großen Teil an Experten aus höheren Ebenen der Fahrzeugindustrie, d.h. eher an die Unternehmerseite. Ob Rationalisierungsmaßnahmen positive oder negative Folgen für die Arbeitsplatzsituation haben, ist eher eine Sache des Standpunktes als objektiver Kriterien, die zudem schwerlich zu definieren sind. Ein Arbeiter, dessen manuelle Tätigkeit demnächst von einem Roboter erledigt wird, kann als Betroffener angesichts der drohenden Arbeitslosigkeit den Vorgang zunächst nur negativ sehen. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist das häufig verwendete Gegenargument, daß bei ausbleibender Rationalisierung wegen verminderter Wettbewerbsfähigkeit weitere Arbeitsplätze gefährdet sind, von dieser Seite her aber auch folgerichtig. Da die Mechanisierung in einer Industriegesellschaft früher oder später alle Branchen erfaßt, lassen sich die freigewordenen Arbeitskräfte dann nicht mehr umsetzen. Das führt langfristig bei gleicher Arbeitsleistung des einzelnen zur

Bildung von Gruppen aus höherqualifizierten, die Roboter betreuenden Arbeitern und zu mangels Bedarf aus dem Arbeitsprozeß verdrängten Gruppen. Der Dienstleistungssektor kann diese Kräfte schon heute nicht aufnehmen, so daß ein Ausgleich geschaffen werden muß. Eine gerechte Verteilung der für den Menschen verbliebenen Arbeit (bzw. der Arbeitsplätze, -zeiten, -aufgaben, -inhalte) ergibt sich so als die Aufgabe für die Zukunft.

Die häufig als positiver Effekt des Robotereinsatzes angeführte Humanisierung des Arbeitsplatzes ist zweifellos zu begrüßen, aber sie ist wohl kaum ein Haupteinsatzargument. Bei gesundheitsgefährlichen oder stupiden Arbeiten wäre sie bei konventionellen Fertigungsmitteln ebenso notwendig und mit entsprechendem Aufwand auch möglich. Der Einsatz der Roboter wird sich hier aber schneller amortisieren, da neben den normalen Arbeitsplatzkosten auch die höheren Aufwendungen für den Arbeitsschutz durch den Einsatz des Roboters eingespart werden.¹

¹ Siehe auch [282].

5.3 PHYSIOLOGIE

Der Einsatz neuer Werkstoffe muß stets auch unter dem Aspekt der Beeinträchtigung der Gesundheit der mit der Verarbeitung betrauten Menschen betrachtet werden. Eventuell notwendige Schutzmaßnahmen können zu beträchtlichen Kostenfaktoren heranwachsen und ein ansonsten technisch günstiges Verfahren unwirtschaftlich werden lassen. Der Einsatz von Robotern kann hier zwar Arbeitsplätze mit latenter Gefährdung der Arbeiter z. B. durch Lösungsmitteldämpfe, Farbnebel, Schweißstaub, Lärm usw. entfallen lassen, nicht immer befinden diese sich aber in geschlossenen Kabinen und erfordern nicht häufigen Zutritt. Verschiedene Klebesysteme eignen sich beispielsweise nicht für den Serieneinsatz, weil unerträgliche Gerüche entstehen und Absauganlagen nicht einsetzbar sind, weil die Freisetzung der betreffenden Stoffe nicht ausreichend örtlich und zeitlich eingegrenzt werden kann.

Auch ansonsten in diesem Sinne wenig aufwendige Verfahren wie das Punktschweißen können Probleme aufwerfen, sobald z. B. verzinkte oder anderweitig oberflächenveredelte Bleche verwendet werden. Die notwendigen wirkungsvolleren Absauganlagen verteuern den Fertigungsprozeß und müssen bei der Materialauswahl berücksichtigt werden. Bei Kunststoffen muß sichergestellt werden, daß eventuell freiwerdende Weichmacheranteile, Lösungsmittelreste oder Spaltprodukte unbedenklich sind. Selbstverständlich muß dies auch langfristig im Hinblick auf den Fahrzeugkäufer gelten. Daß es durchaus nicht immer selbstverständlich ist, haben z. B. die Fälle Holzschutzmittel oder Ortsschaum (Vor Ort erzeugter Schaumstoff auf der Basis von Harnstoff-Formaldehydharz) Ende der 70er Jahre gezeigt. Die Weichmacherreste aus Armaturenbrettern setzen sich mitunter als störender Belag sichtbar auf den Scheiben ab; ob hier die Grenzen zu langfristigen Gesundheitsschäden nicht vielleicht auch schon überschritten werden, wird kaum diskutiert.

Neben den verschiedenen Gesundheitsgefährdungen durch Immissionen kommen in Zukunft verstärkt Unfallgefahren durch Maschinen mit größerem Bewegungsspielraum hinzu bzw. diese lösen andere bekannte Gefahrenquellen ab. Es wird z. B. notwendig sein, verschiedene Roboter nicht nur mit Absperrgittern zu umgeben, sondern auch mit Sensoren, die Verletzungen der Schutzzone um den Arbeitsbereich melden.¹

¹ Siehe auch [283] bis [290].

6. TRENDS

6.1 PROBLEMATIK VON TRENDABSCHÄTZUNGEN

6.1.1 Bedeutung von Neuerungen an Serienwagen

Vergleicht man die Forschungsautos mit ihren Serienpendants, wird die Kluft zwischen den technischen Möglichkeiten und den in Großserie produzierten Komponenten deutlich. Neben den für neuartige Komponenten häufig zunächst höheren Herstellungskosten spielen hier auch Faktoren eine Rolle, die über die Eignung am Fahrzeug hinausgehen. So sind große Investitionen in konventionellen Fertigungsstraßen erst zu amortisieren, Lieferkapazitäten von Rohstoffherstellern nicht ausreichend oder Neuerungen dem aktuellen Käufergeschmack nicht entsprechend. Häufig schließt sich der Kreis von mangelnden Liefermöglichkeiten aufgrund geringer Nachfrage, geringer Nachfrage wegen hoher Materialkosten, hoher Kosten wegen geringer Produktionsmengen und geringer Mengen wegen mangelnder Absatzchancen. Zulieferanten sind oft nicht in der Lage, in ein neues Produkt und die dazugehörige Technologie große Summen zu investieren, da sie mit einem noch nicht voll wettbewerbsfähigen Produkt auch kein Geld verdienen und für die Weiterentwicklung verwenden können. So ist verständlich, daß an Serienwagen fast nur Neuerungen eingeführt werden, die sich mittelfristig in einem überschaubaren Zeitraum amortisieren; man spricht hier beispielsweise von zwei bis drei Jahren bei Kunststoffteilen. Wichtige Entwicklungsziele müssen häufig gegenüber Modifikationen an bereits bestehenden Produkten zurücktreten. Die Kunststoffhersteller z. B. sind gezwungen, den größten Teil ihrer Produktforschung dahingehend auszurichten, die Markttauglichkeit und Vielseitigkeit eingeführter Produkte auszuweiten, wodurch die Entwicklung auch aussichtreicher Alternativen verzögert und jede Voraussage Spekulation wird. Der Vorsprung der Stahlblechtechnologie ist daher

nur sehr schwer aufzuholen, wenn nicht (neben durchschlagenden technischen Vorteilen) äußere Anstöße wie eine Energiekrise oder administrative Maßnahmen ein Umdenken erforderlich machen. Aus rein technologischer Sicht werden Trendabschätzungen so zwar zu plausiblen Ergebnissen führen können, ob die neuen Produkte aber zur Marktreife fertigentwickelt und auch eingeführt werden, läßt sich nicht voraussagen.¹

¹ Siehe auch [1], [3], [4], [145], [186].

6.1.2 Plausibilität der Publikationen

Beim Sichten einer Vielzahl von Veröffentlichungen fallen gelegentlich bestimmte Zahlenangaben oder Darstellungen auf, die wiederholt von verschiedenen Autoren verwendet bzw. zitiert werden. Dieses Vorgehen ist im Grunde nicht zu beanstanden, führt aber unter Umständen zu völlig falschen Vorstellungen über die Zuverlässigkeit der der Literatur entnommenen Daten. Dies ist z. B. der Fall, wenn der gemeinsame Ursprung verschieden aufbereiteter Informationen nicht erkannt und allein aus der Häufung bestimmter Werte auf die Richtigkeit bzw. eine hohe Aussagekraft geschlossen wird.

Mitunter ist eine auffällig häufige Zitierung einiger weniger Quellen ein Hinweis auf Informationsmängel und geringen Kenntnisstand auf einem Gebiet. Ist es schwierig, Daten zu einer bestimmten Frage zu bekommen, werden alle erreichbaren Quellen gern zu Hilfe genommen, auch wenn diese Veröffentlichungen schon relativ alt oder deutlich firmengeprägt sind. Bei der nächsten Zitierung verwischen sich u. U. die einschränkenden Hinweise, die der Basispublikation vielleicht beigefügt sind, und die Daten bekommen so eine andere Qualität.

Wer nicht eigene Untersuchungen durchführt, kann sich nur schwer vor derartigen unsicheren Informationsquellen schützen, da ja auch bei sorgfältiger Recherche Differenzen verschiedener Angaben auf ganz andere Ursachen zurückzuführen sein können wie z. B. nicht vergleichbare Randbedingungen.

Die Bilder 67 bis 70 zeigen exemplarisch (und ohne negative Kritik an den betreffenden Autoren üben zu wollen) einige Beispiele für wiederholt weiterverarbeitete Darstellungen, die Daten gleichen Ursprungs (Aluminium Association, USA 1975/77) haben. Nachfragen bezüglich neuerer Zahlen blieben leider unbeantwortet.

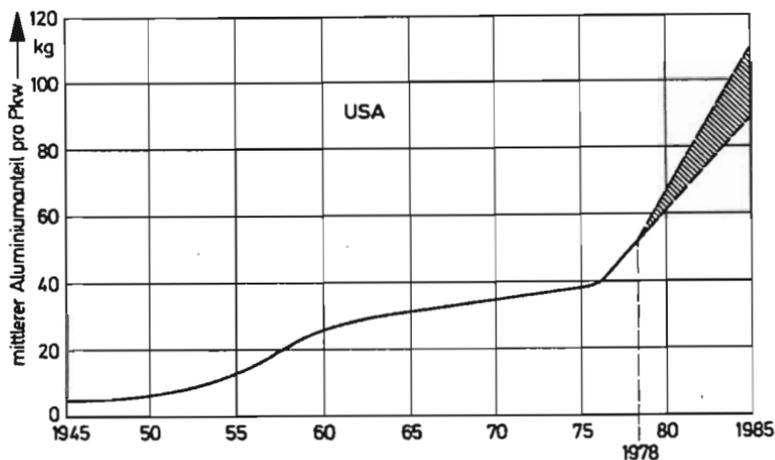


Bild 67: Entwicklung des durchschnittlichen Aluminiumanteils im amerikanischen Pkw ([148], [291], 1979; schraffiert: Schätzung für die Zukunft).

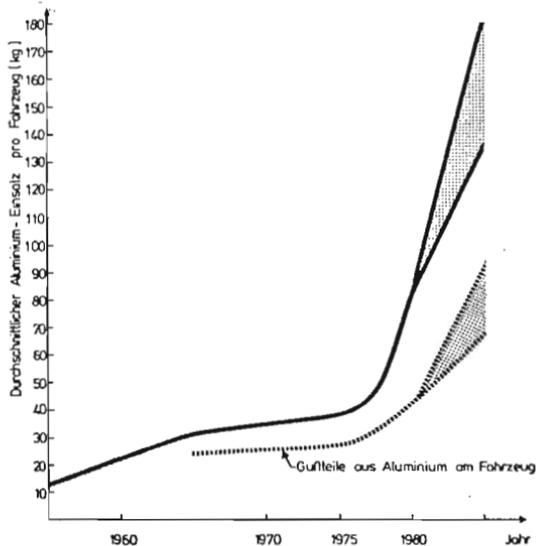


Bild 68: Derzeitiger und erwarteter Aluminium-einsatz in Fahrzeugen ([2], 1979).

6.2 ABSCHÄTZUNG ZUKÜNFTIGER ENTWICKLUNGEN

6.2.1 Umfeld, allgemeine Entwicklungen

Der Vergleich verschiedenartiger Prognosen und Trend-schätzungen läßt, wie kaum anders zu erwarten, je nach Interessenlage mehr oder weniger starke Zuwachsraten von Kunststoffen oder Aluminium erkennen, zeigt Sättigungsgrenzen des Kraftfahrzeugsbestandes in unmittelbarer Nähe oder erst viel später, zeigt allerdings meist Übereinstimmung in der Erwartung zunehmender Energie- und Rohstoffprobleme, aber dennoch ausreichenden Angebots. Die im Jahre 2000 produzierten Fahrzeuge müssen mit der heute zur Verfügung stehenden Technologie konstruiert werden, so daß revolutionäre Veränderungen in Bauweise und Material für diesen Zeitpunkt schon eingeleitet sein müßten.

Einen bedeutsamen Einfluß auch auf die Konstruktion der Fahrzeuge haben wirtschaftliche Lage und Gesellschaftsstruktur zweifellos. Die Aussagekraft von Prognosen zu diesen Punkten sinkt allerdings rapide mit dem Vorhersagezeitraum. Selbst nur ein Jahr ist schon eine Größenordnung, die kaum zu übersehen ist, wie die Fehlprognosen der Wirtschaftsgutachter der Bundesregierung beispielsweise des öfteren zeigten. Auch die bisherigen Prognosen zum Pkw-Bestand in der Bundesrepublik haben stets zu niedrig gelegen. Die renommierte Shell-Prognose zur Entwicklung des Pkw-Bestandes hat als weiteres Beispiel 1981 für 1982 einen konjunkturellen Aufschwung der inländischen Nachfrage erwartet; eingetreten ist dann jedoch in der Mitte des Jahres ein tiefer Einbruch. Als positive Faktoren werden die Bevölkerungsentwicklung bei den geburtenstarken Jahrgängen der 60er Jahre, das vorhandene private Geldvermögen und die Vertrauensbasis der Bevölkerung angeführt; negativ sollen sich Arbeitslosigkeit, Realeinkommen und Zinsentwicklung auswirken. Auf die Konstruktion der Fahrzeuge dürften eher Faktoren wie der Anteil der für den Neufahr-

zeugkauf relevanten Bevölkerungsgruppe der 30 bis 45 Jahre alten Personen Einfluß haben, deren größter Anteil ca. 1994 erwartet wird, wie Bild 71 zeigt. Eine starke Gruppe relativ einkommensstarker potentieller Käufer fördert die Konzeption technisch hochwertiger und damit teurerer Fahrzeuge, was der Einführung anspruchsvollerer Technologien und alternativer Werkstoffe zugute kommt; dieselbe Bevölkerungsgruppe wird ab 1984 erst nur den Gebrauchtwagenmarkt beleben (siehe auch Bild 159 und 160).¹

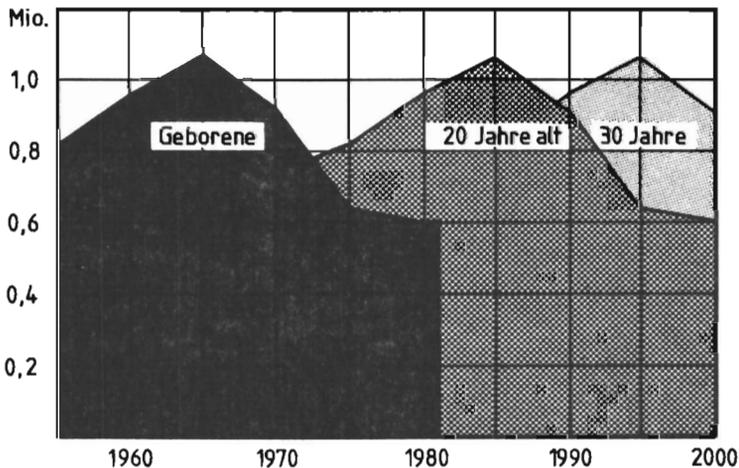


Bild 71: Entwicklung der Bevölkerungsstruktur in der Prognose bis zum Jahr 2000 [303].

Als wesentliche Aussage der internationalen Expertenbefragung [212] bzw. [281] im Rahmen des M.I.T.-Projekts "Zukunft des Automobils" ist festzustellen, daß der in der Vergangenheit beobachtete Trend zu einer internationalen Nivellierung und Angleichung der Fahrzeuggewichte, Antriebsag-

¹ Siehe auch [2], [213], [293] bis [304].

gregateauslegung, Diversifikation auf dem Energiesektor, Einsatz von Werkstoffen und Qualitätssteigerung anhalten könnte. Dabei wird unabhängig von nationalen Einflüssen eine kontinuierliche Entwicklung ohne wirklich einschneidende oder revolutionäre Entwicklung erwartet. So werden zum Beispiel keine völlig neuen Antriebsenergien bis zum Jahr 2000 erwartet, und auch bezüglich der Antriebsaggregate sehen die Experten keine wesentlichen Neuerungen, die in zahlenmäßig bedeutsamen Umfang auf den Markt drängen könnten. Optimierung bekannter und als beherrschbar eingestufte Lösungen, Effizienzsteigerung und allmähliche Weiterentwicklung werden die Fahrzeuggenerationen bis zum Ende dieses Jahrtausends bestimmen.

Übereinstimmend wird von den Experten in der Fahrzeugklasse mit einem Leergewicht von 600 - 800 kg zunehmend mehr Nachfrage erwartet, so daß die Hersteller hier auf eine gesteigerte Konkurrenzsituation stoßen werden. Vorteile könnten dabei Hersteller mit einem traditionell auf Kleinfahrzeuge ausgerichteten Schwerpunkt in der Produktion besitzen. Produzenten der derzeit gehobenen Fahrzeugklassen könnten ihre Produktpalette zu etwas kleineren und leichteren Fahrzeugen verschieben, um ihre Marktposition zu verteidigen. Ob und in welchem Umfang die Marktsegmente für kleine und große Fahrzeuge von den Großherstellern mit auf Massenproduktion ausgerichteter Firmenstruktur bedient werden können oder ob Spezialanbieter die Chance wahrnehmen, um in diesem Markt Fuß zu fassen, bleibt abzuwarten.

6.2.2 Werkstoffanteile

Wie die Diskussion der Werkstoffe in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt hat, ist der Durchbruch eines neuen Materials bzw. die weitgehende Verdrängung des Stahls im Fahrzeugbau im Fahrzeugbau nicht zu erwarten. Fahrzeuge in Voll-Kunststoff-Bauweise werden kaum noch diskutiert und sind mittelfristig, wahrscheinlich auch langfristig nicht zu erwarten. Zu erwarten sind eher bessere Mischkonstruktionen, bei denen jedes Material auch materialgerechter angewendet wird, was auch in Zukunft den sinnvollen Gebrauch von Stahl erwarten läßt.

Kunststoffe sind überall da im Vorteil, wo sie bei geforderter Qualität Einsparungen bei Gewicht und Fertigungsaufwand versprechen. Ihr Anteil wird sich zwar noch deutlich erhöhen, sie werden aber voraussichtlich nicht selbst die Führungsrolle erlangen. Durch ihr weites Anwendungsspektrum werden sie eine Reihe weiterer Werkstoffe ersetzen und den Verbrauch an Stahl stärker, weniger aber den gewichtsmäßigen Anteil des Stahls am Pkw wesentlich mindern können.¹

Die nicht überzeugende Energie- und insbesondere Kostenbilanz des Aluminiums oder anderer Leichtmetalle macht eine Verdrängung des Stahls von dieser Seite her unwahrscheinlich. Es gibt Untersuchungen, nach denen der Anteil des Aluminiums am Pkw heute kaum größer ist als vor 20 Jahren oder bei einzelnen Modellen sogar sinkt [1]. Wenn es der Stahlindustrie gelingt, ihre Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet des verstärkten Einsatzes höherfester Stähle im Automobilbau erfolgreich zu gestalten und der Automobilindustrie auch im Hinblick auf die Auflagen zur Gewichtsreduzierung und Treibstoffeinsparung bestimmte entsprechende Problemlösungen, auch konstruktiver Art, anzubieten, wird zwar Aluminium für besondere Fälle ein

¹ Siehe auch [213].

ernster Konkurrenzwerkstoff bleiben, jedoch nicht viel mehr an Bedeutung gewinnen [155].

Eisengußwerkstoffe sind bereits heute großem Druck unterworfen, z. B. durch Aluminium-Guß-Legierungen, werden sich aber für spezielle Anwendungen behaupten können.

Bild 73 auf der nächsten Seite zeigt die Materialanteile bei Verfolgung verschiedener Grundrichtungen in der Materialauswahl bei der Konstruktion entsprechender Fahrzeuge und eine als wahrscheinlich angenommene Zusammensetzung nach [2] (ein Pendant aus den USA siehe [156]). Diese Schätzung aus der Automobilindustrie zeigt einen relativ starken Rückgang des Stahl- und Eisenanteils zugunsten von Kunststoff und Aluminium. Andere, u. a. auch von der chemischen Industrie [213] verbreitete Schätzungen nach Zahlen aus den USA [305] sind da verhaltener:

	1980	1985	1990
Stahl	54 %	55 %	56 %
Eisen	16 %	12 %	10 %
Kunststoff	6 %	8 %	12 %
Aluminium	4 %	5 %	8 %
Gummi	3 %	3 %	2 %
andere	17 %	17 %	12 %

Bild 72: Schätzung der Werkstoffanteile ([213], [305]).

Die Anteile von Kunststoff und Aluminium verdoppeln sich in Bild 72 hauptsächlich auf Kosten des Eisens und der anderen, diversen Werkstoffe, während der Stahlanteil steigt (gleiche Zahlen in unterschiedlicher Darstellung und/oder Interpretation finden sich z. B. in [37], [214], [218], [222]).

(Zu Angaben über erwartete Materialanteile und Verbrauchsentwicklungen siehe z. B. [2], [37], [113], [115], [119], [124], [130], [141], [142], [155], [156], [198], [201], [212], [213], [214], [218] bis [223], [228], [272], [274], [305] bis [310].)

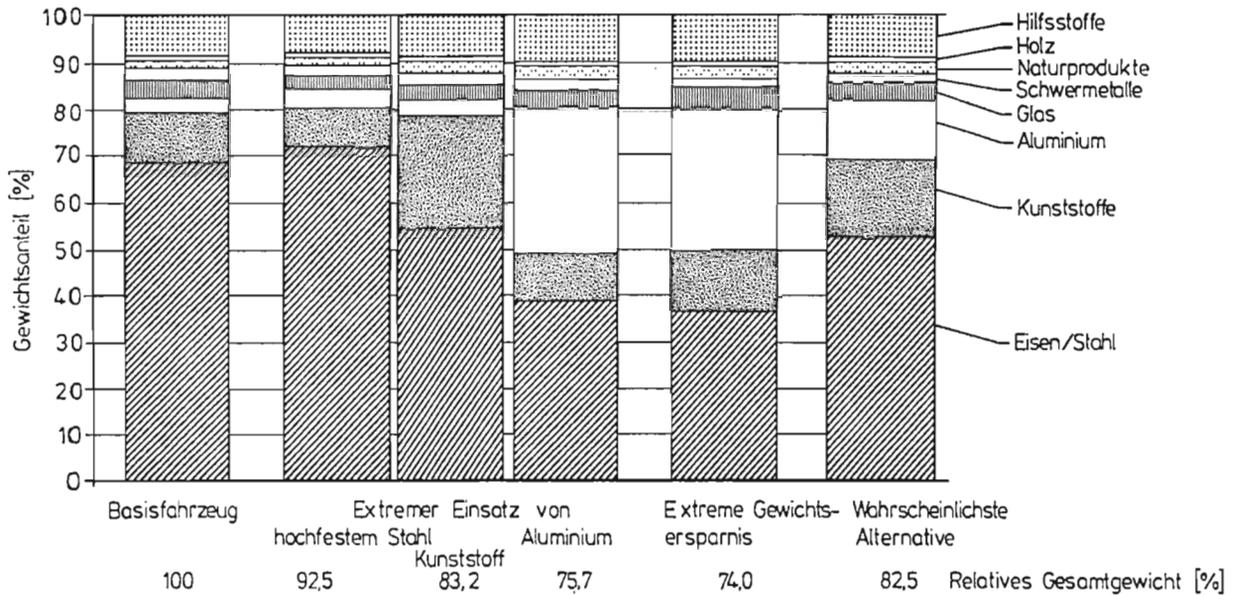


Bild 73: Materialanteile bei fünf verschiedenen Konzepten im Vergleich zu einem Basisfahrzeug (nach [2]; siehe auch [13], [214], [311]).

Die Expertenfrage [281] erbrachte folgendes Bild:

Knapper werdende Rohstoffvorräte und steigende Preise für Werkstoffe und deren Aufbereitung für die Massenproduktion wirken sich auf die Materialzusammensetzung zukünftiger Fahrzeuge aus. Ein sukzessiver Rückgang um ca. 10 % des im Automobilbau eingesetzten Stahles wird für den Zeitraum bis zum Jahr 2000 für möglich gehalten. Ob extremer Leichtbau durch Einsatz von Aluminium und/oder Kunststoffen die konventionellen Fahrzeugkonzeptionen vom Markt verdrängen kann, muß ernsthaft bezweifelt werden. Ihre auf die Basis von 1980 bezogenen Wachstumsraten sind beachtenswert, der resultierende, für das Jahr 2000 erwartete Anteil am Gesamtgewicht eines durchschnittlichen Fahrzeugs ist jedoch nicht in der Deutlichkeit gewachsen, daß von einer Ablösung der Stahlbautechnologie ausgegangen werden kann.

Werkstoffe	Jahr	Japan	USA	Deutschl.
Stahl und Eisen	1980	70.6 %	73.0 %	74.1 %
	1990	64.5 %	69.0 %	67.6 %
	2000	57.8 %	64.0 %	60.4 %
Aluminium	1980	3.0 %	5.0 %	3.6 %
	1990	5.1 %	9.0 %	6.1 %
	2000	6.5 %	11.0 %	9.1 %
Kunststoff	1980	5.2 %	6.0 %	9.1 %
	1990	9.8 %	13.0 %	14.2 %
	2000	14.7 %	17.0 %	19.4 %
Glas	1980	3.5 %	3.0 %	4.1 %
	1990	3.6 %	2.0 %	4.1 %
	2000	3.7 %	2.0 %	3.7 %
Gummi	1980	4.8 %	4.0 %	5.4 %
	1990	5.0 %	2.0 %	5.1 %
	2000	5.0 %	3.0 %	4.8 %
Andere	1980	12.9 %	9.0 %	3.6 %
	1990	12.0 %	5.0 %	3.0 %
	2000	12.3 %	3.0 %	3.0 %

Bild 74: Entwicklung der Materialzusammensetzung zukünftiger Personenkraftwagen nach Expertenfrage (Prozentangaben bezogen auf die Masse; [212]).

Die befragten Experten sagten für die nächsten 20 Jahre für alle Länder im Schnitt eine Verdoppelung des Aluminiumanteils und eine Verdreifachung des Kunststoffanteils voraus, siehe Bild 74. Dies geht jeweils zulasten von Stahl und Eisen. In Japan werden geringere Kunststoff- und Aluminiumanteile als in den USA und der Bundesrepublik erwartet, dafür ist allerdings der Anteil der anderen, nicht differenzierten Werkstoffe größer.

Die deutlichsten Signale für Veränderungen der zum Fahrzeugbau angewandten Werkstoffe sind nach [212] bzw. [281] für Pkws schwedischer Produktion festzuhalten (siehe ausführlichere Tabelle in Bild 133 im Anhang). Die dort für möglich gehaltene deutliche Marktsegmentverringerung der Fahrzeuge mit einem Leergewicht von 1100 - 1500 kg sowie der insgesamt auf das Leergewicht der Fahrzeugflotte drückende Trend (siehe Bild 134 im Anhang) kann mit der Materialwahl, aber auch mit der Fahrzeuggröße in Verbindung gebracht werden. Auffallend ist der vergleichsweise große Anteil von Eisenwerkstoffen bei Fahrzeugen schwedischer Produktion heute und in Zukunft. Mehr als in den anderen Ländern erwarten die schwedischen Experten einen Trend zu Aluminium und Kunststoffen mit tragenden Funktionen. Aber auch in Japan und der Bundesrepublik erhalten Kunststoffe und Aluminium in Zukunft mehr Bedeutung. Bezüglich Glas, Gummi und anderen Werkstoffen werden keine bedeutenden Verschiebungen erwartet.

Die häufig vorhergesagte Verdreifachung des Kunststoffanteils im angegebenen Zeitraum ist allerdings anzuzweifeln. Das weitere Einsatzpotential von Kunststoffen an konventionellen Pkw-Karosserien läßt sich z. B. folgendermaßen abschätzen:

Kotflügel, Motorhaube, Kofferraumdeckel, Dach und Türblätter haben etwa eine Fläche von rund 10 m^2 . Diese zu substituierenden Teile wiegen aus Stahl 70 - 90 kg. Ersetzt man nun den Stahl durch 50 - 70 kg Kunststoff, erhöht sich der durchschnittliche Kunststoffanteil auf 12 - 15 %. Dies ist nicht einmal das Doppelte des heutigen

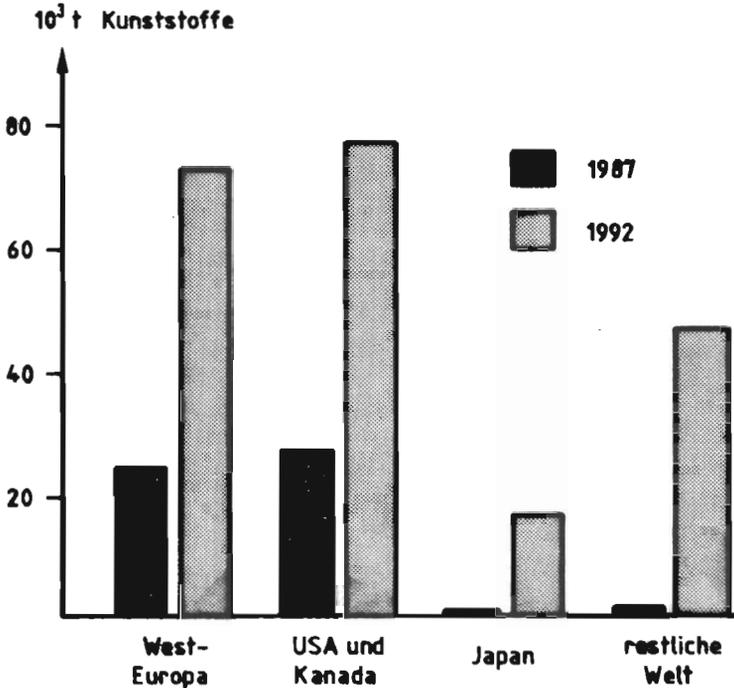


Bild 75: Geschätzter Kunststoffverbrauch für Karosserieaußenteile 1987 und 1992 (nach [142]).

Standes. Auch bei Einbeziehung der Bodenbleche, der Türrahmen und diverser Kleinteile wird sich die Verdreifachung bei dem in Deutschland schon erreichten Niveau nur noch schwer erreichen lassen. Dazu kommt, daß bei großen Gewichtersparnissen der Kunststoffanteil rechnerisch sogar sinkt gegenüber weniger effektiven Leichtbauwerkstoffen. Der Ersatz von 100 kg Stahl durch 80 kg GFK erhöht zwar den Anteil viel stärker als z. B. bei Verwendung von 40 kg CFK, die Funktion bleibt aber die gleiche. Dennoch sagen verschiedene Prognosen einen erheblichen Anstieg des Kunststoffverbrauchs voraus, siehe Bild 75, der in dieser Intensität wohl angezweifelt werden muß.

6.2.3 Bauweisen

In der Bauweise sind Änderungen am ehesten dort absehbar, wo nichttragende Teile der Karosserie durch Multifunktionsteile aus Kunststoff ersetzt werden, wie dies an einigen neuen Serienwagen zum Beispiel im Bereich Lampen/Kühlergrill/Stoßfänger bereits heute sichtbar wird. Falls weitere Außenteile der Karosserie ersetzt werden, dürften zunächst Motorhauben, Kofferraumdeckel und Türblätter an die Reihe kommen; ob Qualität und Kostenniveau eine Durchsetzung dieses Trends erlauben, ist nicht abzusehen. Behält man das bisherige Konzept der volltragenden Karosserie bei, ist der Einsatz von Kunststoffen, wie Faserverbundwerkstoffen und Sandwichelementen, insbesondere in den flächigen Bauelementen von Dach und Boden sinnvoll, bei denen hohe spezifische Biegesteifigkeit und großes spezifisches Volumen wichtig sind, aber geringere Anforderungen an das Energieaufnahmevermögen gestellt werden. Die im Vergleich zu den Seitenwänden aus geometrischen Gründen sehr hohe Schubsteifigkeit von Dach und Boden [166] legt Maßnahmen zur Gewichtseinsparung mittels Kunststoffen hier nahe, ohne daß die Torsionssteifigkeit wegen des geringeren E-Moduls wesentlich beeinträchtigt würde. Mit SMC z. B. sind theoretisch Gewichtseinsparungen von 20 % ohne Verringerung der Torsions- und Biegesteifigkeit erreichbar; aus Gründen der Überrollicherheit wird auf eine Rahmenkonstruktion aus Blech jedoch nicht verzichtet werden können. In Bild 80 wird skizziert, wie z. B. eine Großraumlimousine gemäß dem in letzter Zeit zu beobachtenden Trend aufgebaut sein könnte.

Die Außenhautteile des Vorderwagens wie Kotflügel oder Motorhaube, die auch Craschanforderungen genügen sollen, lassen sich am günstigsten durch Aluminium substituieren. Für die Rahmenstrukturen bietet sich ebenso Aluminium an, wobei hier aber nach wie vor Stahl, darunter hochfeste Legierungen für die stärker belasteten Bereiche, seine Chancen hat. Die bei Verwendung von Aluminium notwendigen

größeren Volumina der Profile [151] lassen sich bei Raum-mangel nicht immer durch größere Wandstärken ausgleichen, ohne daß die Steifigkeit der Bauteile darunter leidet. Da z. B. die Schweller allein mit 20 % zur Torsionssteifigkeit der Zelle beitragen, ist es aber möglich, die bei Verwendung von Werkstoffen geringeren Elastizitätsmoduls am Karosserieaufbau in Kauf zu nehmenden geringeren Beiträge zur Gesamtsteifigkeit weitgehend zu kompensieren.

Die Sandwichbauweise kann bei Verwendung in den Türen zur Versteifung der Seitenstruktur beitragen. Sollten sich hier Lösungen der heute bestehenden Probleme ergeben, ist eine Bauweise mit teilweise verzinktem und teilweise hochfestem Stahlskelett und Anbauteilen ("Hang On") aus Kunststoff am wahrscheinlichsten, wie sie z. B. der FIAT VSS (Bild 76) oder der Audi Forschungs-Pkw zeigen. Damit wird der Weg bereitet für sinnvollere Mischkonstruktionen und rationellere Fertigungsorganisationen. Die Verwendung der gleichen Struktur für verschiedene Fahrzeugtypen ist prinzipiell Stand der Technik und erlaubt hohe Stückzahlen bei Stahlteilen mit großem Investitionsaufwand und kleinere Stückzahlen bei diversen Kunststoffteilen mit geringeren Investitionen. Die Montage der gleichen Bodengruppen in Fahrzeuge verschiedener Konzernteile ist bekannt und wird sich ohne größere Schwierigkeiten ausweiten lassen auf die Pfosten der Insassenzelle, Spritzwand oder andere Innenbleche.

Ein solches Karosseriekonzept erfordert dann aber auch die Weiterentwicklung neuer Fügetechnologien wie dem Kleben und großserienggeeignete und wirtschaftliche Herstellverfahren für Teile aus faserverstärkten Werkstoffen. Der Trend zum noch leichteren Fahrzeug wird allerdings langsamer als bisher ablaufen, da der Aufwand zum Erreichen von Gewichtseinsparungen in dem Maße größer wird, in dem die vorhandenen Potentiale dafür kleiner werden.¹

¹ Siehe auch [312].

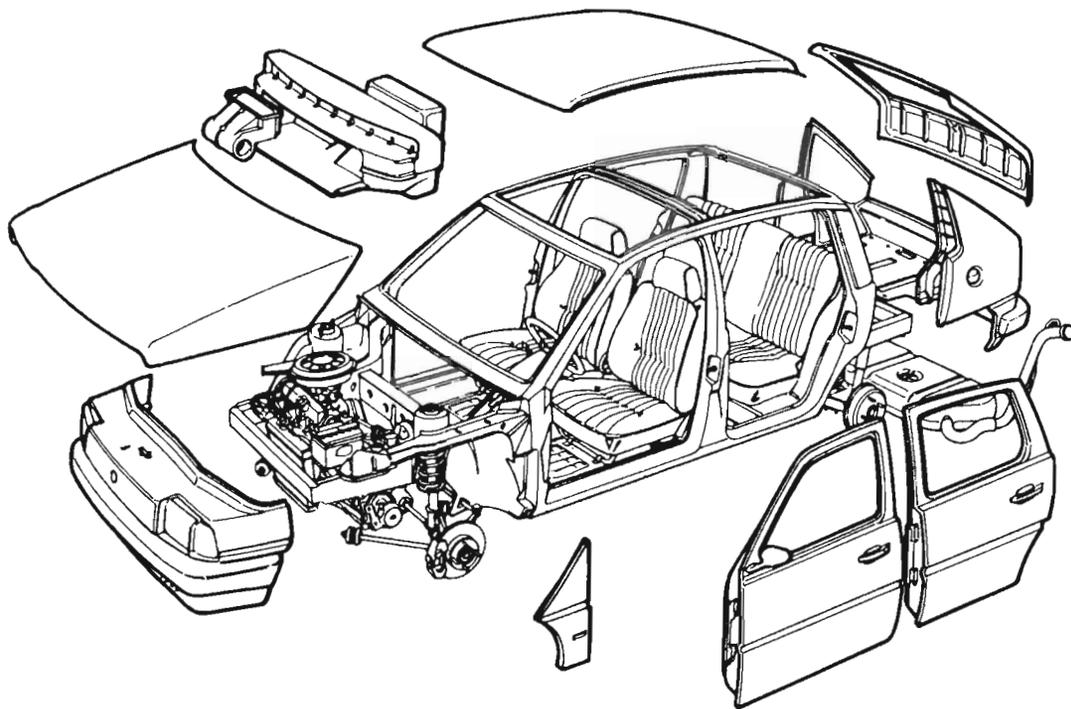


Bild 76: Rahmen- oder "Bird-Cage"-Bauweise der Pkw-Karosserie am Beispiel des Fiat VSS [53].

In der Expertenumfrage [212] sind die folgenden Punkte für erwartete Änderungen in Bauweise bzw. Produktionsorganisation und Methoden für 1990 und 2000 genannt worden:

Produktionsorganisation ab 1990

- Hierarchisch aufgebaute Computersteuerungs- und Überwachungssysteme,
 - schnellere Entscheidungen im Management,
 - Abnehmen der Fließbandproduktion,
 - Dezentralisierung in Hinblick auf ein World-Car Konzept,
 - Kommunikationssysteme,
 - direkte Verknüpfung von Produktion und Vertrieb,
 - Abbau der Lagerkapazitäten,
 - bessere Koordinierung mit den Zulieferfirmen,
 - Zwischenkontrolle von Teilen und direkte Nacharbeit,
 - Layoutmethoden für Hallenbelegung und Materialfluß,
 - kleinere Organisationseinheiten,
 - Gruppenarbeit,
 - Abbau monotoner Arbeitsvorgänge,
 - veränderte Montagezyklen,
 - einfache Recyclingstrukturen.
-
- Elektronenstrahlschweißen,
 - Elektronenstrahlhärten,
 - Kleben statt Schrauben,
 - CAD / CAM / CAE¹,
 - modulare Produktion,
 - elektronische Qualitätsprüfung,
 - Reduzierung der für die Produktion eingesetzten Energie (ca. 12 000 kW pro Fahrzeug),
 - Herstellungsprozesse mit weniger Blechschneidarbeiten,
 - Einsatz von Kunststoffen mit kürzeren Zykluszeiten,
 - Einsatz von wasserlöslichen Oberflächenbeschichtungen,
 - Fügen durch Steckverbindungen,
 - Verwendung von Gleichteilen.

¹ CAD: Computer Aided Design; CAM: Computer Aided Manufacturing; CAE: Computer Aided Engineering

Produktionsorganisation ab 2000

- stärkere Vormontage von Baugruppen in ausgelagerten Montagebetrieben,
- stärkere Modulisierung der Fahrzeuge,
- Ausnutzung von Standortvorteilen,
- Anwachsen des notwendigen Kapitals,
- Anwachsen der Qualitätskontrollen,
- Logistik,
- Produktumstellung,
- Fehler- und Schwachstellenbeseitigung,
- Know-how der Mitarbeiter steigern.

Methoden ab 2000

- Qualitätskontrollen durch Laser und Holographie,
- Laserschweißen und -blechschneiden,
- Greifersysteme zur Maschinenbestückung,
- optimierte Methoden zum Kunststoffrecycling,
- neue Zusammenbaumethoden (Hybrid-Bau),
- Einsatz von Kunststoffkarosserieteilen (hang-on).

6.2.4 Rohstoff- und Materialkosten

Die Entwicklung der Rohstoffkosten ist zwar für die Materialwahl häufig von entscheidender Bedeutung, die Preise hängen jedoch von einer Vielzahl von Einflußfaktoren ab, die z. B. politischer Natur oder aus ähnlichen Gründen nicht abzuschätzen sind. Nachfrage und Angebot sind nicht immer die allein maßgebenden Faktoren. Relativ gering wird die Auswirkung eines verstärkten Einsatzes eines Materials auf den Rohstoffpreis auch bleiben, wenn nicht ausschließlich für die Kraftfahrzeugindustrie große Mengen benötigt werden. Für Stahl, Aluminium und Kunststoffe aus Erdöl ist die Abhängigkeit von der weltwirtschaftlichen Lage eher erfaßbar, da die Quellen bekannt und deren Sicherheit bzw. Unsicherheit und Umfang eher erfaßbar sind.

Rohstoffe	1982	1987	1992
Stahl, USA	1,40	1,60	1,60
Stahl, Japan	1,10	1,30	1,30
Stahl, Europa	1,20	1,40	1,60
Aluminiumblech	6,40	6,80	7,30
SMC	3,50	3,50	3,60
BMC	3,20	3,00	3,10
GF-PA	8,50	6,60	6,40
PUR-RRIM	5,50	5,00	5,20
Glasfaser-Rovings	3,80	4,30	4,30
Glasf. gemahlen	5,10	4,10	4,30
Unges. Polyester	2,60	3,00	3,20

Bild 77: Preisentwicklung ausgewählter Rohstoffe (nach [142], USA, Marktpreise in DM/kg, 1 US-\$ = 2,50 DM).

In Bild 77 sind die erwarteten Preisentwicklungen der wichtigsten Roh- bzw. Ausgangsstoffe nach [142] zusammengestellt worden; in Bild 78 die Gesamtpreise für fertige Karosserieteile unter Berücksichtigung auch der Fertigungskostenänderungen. Auch für 1992 wird ein höherer Gesamtpreis von verstärktem Polyamid erwartet als für Stahl, während SMC günstiger wird. Beachtlich sind die für 1982 festgestellten hohen Mehrkosten der Kunststoffe. Die Bilder 154 und 155 im Anhang zeigen einige Kostenentwicklungen in der Bundesrepublik Deutschland.

	1982	1987	1992
<u>Stahl</u>			
Materialpreis	42,50 DM	46,80 DM	48,30 DM
Gewicht	16,33 kg	15,57 kg	15,57 kg
Gesamtpreis pro m ²	34,- DM	36,60 DM	35,60 DM
<u>SMC</u>			
Materialpreis	62,30 DM	51,30 DM	37,90 DM
Gewicht	13,83 kg	12,05 kg	9,68 kg
Gesamtpreis pro m ²	62,- DM	48,20 DM	30,30 DM
<u>Nylon R-RIM</u>			
Materialpreis	116,30 DM	79,70 DM	61,20 DM
Gewicht	11,89 kg	10,71 kg	9,14 kg
Gesamtpreis pro m ²	88,80 DM	63,60 DM	44,80 DM

Bild 78: Schätzung von Gewicht und Kosten verschiedener Motorhaubenkonzepte (nach [142], 1 \$ = 2,50 DM).

(Zu Angaben über Preisentwicklungen bei Rohstoffen siehe z. B. auch [142], [217], [228], [248], [307], [313].)

6.2.5 Energiekosten

Die Entwicklung der Energiekosten hat für die Materialverwendung entscheidenden Einfluß. Die großen Energieaufwendungen für die Erzeugung von Aluminium sind z. B. das bedeutsamste Handicap für diesen Werkstoff, da sich die dadurch hohen Kosten nicht in ausreichendem Maße über die Fertigungskosten oder Betriebsvorteile kompensieren lassen. Hohe Erdölpreise belasten ebenso fast alle Kunststoffe, obwohl zu deren Erzeugung weniger Energie verbraucht wird, da hier Rohstoff und Energieträger verwandt sind. Die Energiepreise sind in den letzten Jahren ständig nach oben gegangen, wobei der Anstieg jedoch häufig sehr unregelmäßig und teilweise auch den meisten Prognosen entgegengesetzt verlief. Das gegenwärtige Überangebot an Erdöl hat hier den Preisanstieg gestoppt; ebenso wird Atomstrom bislang nicht so günstig angeboten wie früher oft vorhergesagt, da die Anlagenkosten überproportional gestiegen sind. Allgemein werden jedoch weitere hohe Kostensteigerungen erwartet, siehe Bild 79.

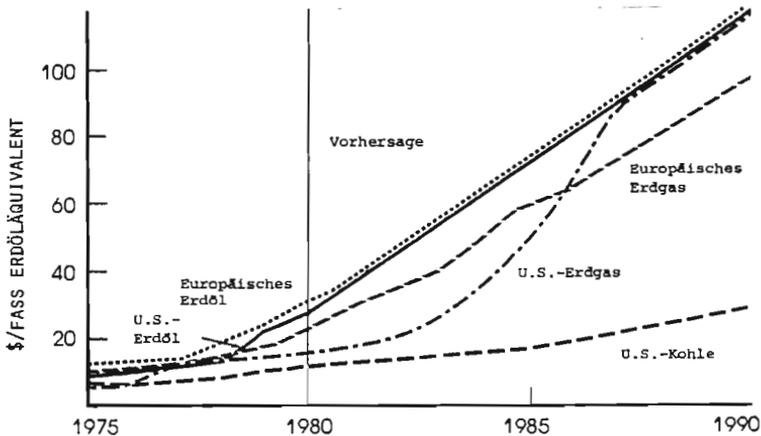


Bild 79: Entwicklung der Energiepreise [1], [213].

6.3 FOLGEWIRKUNGEN

Da für einen überschaubaren Zeitraum keine revolutionären Änderungen im Pkw-Bau und -betrieb abzusehen sind, dürften Folgewirkungen vorwiegend von Rationalisierungsmaßnahmen ausgehen. Der zunehmende Einsatz von Robotern ersetzt Arbeitsplätze, überwiegend solche für weniger qualifizierte oder mit gesundheitlichen Risiken verbundene Tätigkeiten in den Fahrzeugfabriken. Wo hier die Grenzen zu nicht mehr zu amortisierenden Investitionen in zu hochwertige Maschinen sind, muß sich zeigen. Mittelständige Zulieferfirmen werden zunehmend unter Druck geraten, das Risiko für Großfirmen mit hohem Investitionsaufwand wird jedoch ebenfalls steigen. Die Umstrukturierung des Arbeitsmarktes und die damit verbundenen Probleme werden sich verstärken, unabhängig von den angewandten Bauweisen und Werkstoffen.

Eine Anpassung der Produktionsstrukturen in der Zulieferindustrie führt auch bei den zum großen Teil von den großen Automobilfirmen abhängigen Betrieben zu einer an der Flexibilität zu orientierenden Mechanisierung. Ob die Erwartungen an eine Robotisierung von über 60 % im Jahr 2000 von der Zulieferindustrie in die Realität umgesetzt werden kann, hängt von ihren Investitionsmöglichkeiten ab.¹

Neben relativ geringen werkstofftechnischen Veränderungen könnten deutliche Umstrukturierungen in der Industrie und Innovationen dazu beitragen, Fahrzeuge von hoher Qualität herzustellen. Elektronische Hilfen zur Steuerung und Überwachung der Produktion, aber auch integrierte Konzepte vom Planungs- bis zum Produktionsprozeß der zukünftigen Fahrzeuge bestimmen zunehmend die Vorstellung von zeitgemäßen Produktionsmaschinen. Dabei werden neue Werkstoffe die Nachfrage nach entsprechenden Fertigungsmaschinen hervorrufen.¹

¹ Siehe auch [27], [281].

6.4 ERGEBNISSE VORLIEGENDER STUDIEN UND PROGNOSEN

Um Aufschluß über zukünftige Trends und Technologien von Personenkraftwagen zu erhalten, wurden in jüngster Zeit verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Hier sind z. B. zu nennen:

- U.S. Automotive Industry in the 1980s [305],
- Delphi-Forschung "Kraftfahrtechnik 2000" [315],
- Technological Trends in the 1980s for the Automotive Industry [316],
- Product and Process Technology of Future Automobiles [212], [317].

Gemeinsam ist diesen Untersuchungen, daß sie auf der Befragung von Experten beruhen und daß sie auch die Rahmenbedingungen ansprechen. Dazu gehören z. B. politische und gesellschaftliche Veränderungen, das Benutzerverhalten, die Energie und Rohstoffsituation, die Gesetzgebung, die Industriestruktur, die Einkommensentwicklung, die Siedlungsstruktur oder das Entwicklungspotential peripherer Innovationsbereiche. Bei der Einschätzung technologischer Entwicklungslinien werden einige Probleme gesehen [318]:

- Unsicherheit über die Entwicklung der Rahmenbedingungen,
- Definition von Ausgangspunkten, Bereitstellung von Basismaterial,
- Anzahl und Art der Experten; nur Fachexperten oder auch Experten auf verschiedenen Gebieten,
- Zurückhaltung der Experten bei der Beantwortung aus Wettbewerbsgründen,
- Begrenzung des Umfangs der Fragen, andererseits Forderung nach breiten und tiefen Informationen,
- Qualität der Fragen,
- Zusammenführung von Befragungen auf internationaler Ebene,
- Zeithorizont.

- U.S. Automotive Industry in the 1980s

Die Studie [305] berichtet über die Erwartung eines sehr geringen Anwachsens des Pkw-Marktes, auf dem sich die Nachfrage zu kleineren Fahrzeugen verschiebt. Importe auf den nordamerikanischen Markt werden sich nicht weiter ausweiten, jedoch wird mit zunehmender Produktion ausländischer Hersteller im Inland gerechnet. Zulieferfirmen werden mit größerem Anteil bei der Wertschöpfung gesehen und zunehmend mehr integriert. Die Beschäftigungszahlen in der Automobilindustrie gehen drastisch zurück. Kleinere, leichtere Fahrzeuge mit leistungsschwächeren Antriebsaggregaten, leichtere Materialien sowie elektronische Komponenten für die Optimierung des Antriebsstranges werden zu einer spürbaren Verbrauchssenkung führen. Neue Produktions- und Managementmethoden sowie intensive Investitionen sollen die US-Autoindustrie aus ihrer derzeitigen Lage herausbringen.

Als Grund für den Erfolg der Automobilindustrie in Japan und Europa gegenüber den USA wird vor allem die Kooperation von Arbeitgebern, Arbeitnehmern und Regierung gesehen. Die Schwächung der Wettbewerbslage der US-Automobilindustrie durch gesetzliche Auflagen wird von den Industrieexperten hauptsächlich auf die scharfen Standards der Abgasemissionen zurückgeführt [318].

- Delphi-Forschung "Kraftfahrtechnik 2000"

Als Ergebnis dieser Studie [315] sind keine spektakulären Ereignisse im Bereich der Entwicklung von Automobilen zu erwarten.

Gemäß evolutionären Prozessen sind folgende Tendenzen abzusehen:

- Substitution von Werkstoffen
- Steigerung der Umweltverträglichkeit der Fahrzeuge
- Firmenkonzentration
- Harmonisierung gesetzlicher Vorschriften
- Einsparung von Energie.

Als alternative Energien treten Kernkraft, Kohle und Sonnenenergie hinzu. Weltweit tritt eine Konzentration von derzeit ca. 20 auf 6 bis 8 Automobilhersteller ein. Weitere Kostensenkungen in der Automobilindustrie sind nötig, z.B. über standardisierte Bauteile, über Rationalisierung und Automatisierung. Verschärften Vorschriften bei Abgas- und Geräuschemissionen werden die stärkste Beeinträchtigung der Ertragslage bringen.

- **Technological Trends in the 1980s for the Automotive Industry**

Diese Studie [316] benennt als treibende Größen bei der Entwicklung zukünftiger Personenkraftwagen:

- Kraftstoffverbrauch
- Abgasemissionen
- Fahrzeugkosten
- Sicherheit
- Geräusch
- Leistungsfähigkeit und Transportleistung.

Diese Anforderungen fördern in besondere Weise Entwicklungen im Bereich der elektronischen Steuereinrichtungen des Antriebs, elektronischen Komponenten zur Steigerung von Sicherheit, Komfort und Information und leichteren Materialien [318].

- **Product and Process Technology of Future Automobiles**

Dieser trilateraler Vergleich [212] ist an der Technischen Universität Berlin im Rahmen des M.I.T.-Kooperationspro-

jekts "Die Zukunft des Automobils", auf dem auch die hier vorliegende Arbeit teilweise beruht, erstellt worden und soll daher ausführlicher behandelt werden.

In der globalen Aussage wird festgestellt, daß der in der Vergangenheit beobachtete Trend zu einer internationalen Nivellierung und Angleichung der Fahrzeuggewichte und der Antriebsaggregatsauslegung anhalten wird, daß der Energiesektor eine Diversifikation erfahren wird und daß neue Materialien als Beitrag zur Qualitätssteigerung verstärkt eingesetzt werden. Dabei wird unabhängig von nationalen Einflüssen eine kontinuierliche Entwicklung ohne einschneidende oder revolutionäre Ereignisse erwartet. So werden zum Beispiel keine völlig neuen Antriebsenergien bis zum Jahr 2000 gesehen, und auch bezüglich der Antriebsaggregate rechnen die Experten nicht mit wesentlichen Neuerungen, die in zahlenmäßig bedeutsamen Umfang auf den Markt drängen könnten. Optimierung bekannter und als beherrschbar eingestufte Lösungen, Effizienzsteigerung und sukzessive Weiterentwicklung werden die Fahrzeuggenerationen bis zum Ende dieses Jahrtausends bestimmen. Zahlreiche elektronische Bauelemente übernehmen dabei in den Fahrzeugen Steuerungs- und Überwachungsfunktionen.¹

Die hier eingesetzte Art der Auswahl der Experten und deren unterschiedliche Bereitschaft zur Kooperation tragen Unsicherheitsfaktoren mit sich. Auffällig ist bei der statistischen Auswertung der Antworten, daß die eingeschätzten Werte zu der aktuellen Fahrzeugpopulation und zu den sie beschreibenden Kennwerte eine größere Streuung aufweisen als die bis zum Jahr 2000 erwarteten Entwicklungen.

Klassifiziert nach der Deutlichkeit der Ergebnisse aus den Befragungen ergibt sich eine Rangfolge im Hinblick auf die als sicher und als wahrscheinlich erachteten Entwicklungen.

¹ siehe auch [212], [281], [317], [318].

Als sicher eingeschätzte Erwartungen im Bereich Bauweisen und Werkstoffe können z. B. gelten:

- verhaltenes weiteres Ansteigen der Sicherheitsnormen,
- verbesserter Schutz für Fußgänger und Fahrradfahrer,
- die durchschnittlichen Fahrzeugleergewichte werden in Japan und Europa um ca. 10 %, in den USA um ca. 20 % gesenkt,
- die Gewichtsreduzierung ist auf die Verwendung anderer Materialien und auf konstruktiv veränderte Karosseriestrukturen zurückzuführen,
- stärkere Verwendung von hochfestem Stahl,
- der Anteil von Aluminium im Fahrzeug wird sich mindestens verdoppeln, der von Kunststoffen etwa verdreifachen,
- der Luftwiderstand wird sinken,
- die Steigerung der Fahrzeuglebensdauer beträgt 10-25 %,
- neuartige elektronische Anzeigen.

Als wahrscheinlich können folgende Trends gelten:

- der Markt für Neufahrzeuge wird sich in Japan und Europa zu 60 - 75 % in der Klasse zwischen 800 und 1100 kg Leergewicht konzentrieren, auf dem US-Markt zwischen 1100 - 1500 kg,
- in der Massenproduktion keine Aluminium- oder Kunststoffkarosserie (Ausnahme Japan).

Zusammengefaßt ist auch nach den Expertenbefragungen zu erwarten, daß sich die Fahrzeuge für den individuellen Personentransport bis zum Ende dieses Jahrtausends nicht entscheidend ändern werden. Fahrzeuge, die sich zur Zeit in der Phase der Vorentwicklung befinden, werden zum Teil auch noch in der Produktion sein. Die genannten Untersuchungen erwarten alle recht ähnliche, zum Teil identische Entwicklungen. Politische und gesellschaftliche Veränderungen, vor allem im internationalen Zusammenhang, können die heute aktuellen Akzente und Rahmenbedingungen natürlich verschieben und verändern.

7 **EXEMPLARISCHES KONZEPT FÜR BAUWEISEN UND
WERKSTOFFE EINES ZUKÜNFTIGEN PERSONENWAGENS**

Nachdem der derzeitige Stand der Technik diskutiert und ein Ausblick mittels der zuvor gewonnenen Erkenntnisse gegeben wurde, soll nun als anschauliches Ergebnis ein exemplarisches Lastenheft eines Fahrzeugs mit den Mitteln der mittelfristig zu erwartenden Technologie und den entsprechenden Werkstoffen gezeigt werden. Das Lastenheft wurde in Form einer tabellarischen Übersicht, nach Fahrzeugkomponenten gegliedert, mit entsprechenden Erläuterungen erstellt. Die Gliederung ist identisch mit derjenigen der Beschreibung der in Kapitel 2 untersuchten Forschungsautos, den Vergleich zu erleichtern.

Die Obergruppen der Gliederung sind:

- 7.00 Fahrzeugauslegung allgemein
- 7.10 Fahrzeugantrieb
- 7.20 Kraftübertragung
- 7.30 Fahrwerk
- 7.40 Fahrzeugaufbau
- 7.50 Innenraum
- 7.60 Elektrik, Klimatisierung
- 7.70 Zubehör, Zier-, Befestigungsteile
- 7.90 Lackierung

Die einzelnen Komponenten sind in der Tabelle ab Seite 233 jeweils nach Bauart, Werkstoff, Auswahlgrund und denkbaren Alternativen beschrieben worden. Die Angabe "konventionell" bezieht sich dabei auf den heutigen Stand der Großserientechnik. Konstruktive bzw. funktionelle Details sind nur angeführt worden, soweit sie unmittelbare wechselseitige Auswirkungen auf die Werkstoffwahl haben und zum Verständnis notwendig sind.

7.00 Fahrzeugauslegung allgemein

Das beschriebene Fahrzeug soll der unteren Mittelklasse zuzuordnen sein, etwa in der Größenordnung von Opel Ascona, Ford Sierra oder BMW 316. Der Grundgedanke war die Annahme, daß sich auch in Zukunft die Mehrzahl der Käufer keinen Zweitwagen leisten kann, die wirtschaftliche Situation sich also nicht stark bessert. Die Wahrscheinlichkeit der Durchsetzung von sehr kleinen Stadtwagen und zusätzlichen Reiselimousinen kann so als gering angesehen werden. Als Alternative wird eine Wagenklasse angegeben, die etwas darunter liegt, wobei sich dieses aber eher auf die Außenlänge als auf das Preis- und Ausstattungsniveau bezieht. Beide Fahrzeugkategorien stellen einen annehmbaren Kompromiß zwischen Handlichkeit in der Stadt und Raumangebot auf Reisen dar, wobei die heute auf dem Markt befindlichen Modelle meist in unterschiedlichen Karosserievarianten angeboten werden als Schrägheck-, Stufenheck- oder Kombi- bzw. Großraumlimousine. Die Bauweise und die Werkstoffe werden kaum unterschiedlich ausfallen, so wie sich diese Modelle auch heute technisch kaum unterscheiden. Im Lastenheft soll daher auch keine Unterscheidung gemacht werden. Ein ausgesprochenes Langzeitauto mit entsprechenden Auswirkungen auf die Materialauswahl ist kaum zu erwarten, da mit relativ geringen Verbesserungen die heutigen Modelle auf Lebensdauern von 15 Jahren, in Schweden z. B. auch noch mehr, kommen dürften. Die beim Langzeitauto angestrebten 20 Jahre sind karosserieseitig bei weitergehender Verwendung von verzinktem Stahl und Kunststoffteilen ebenfalls im Bereich des Möglichen, bei den Aggregaten und Verschleißteilen wohl weniger, auch wenn z. B. bereits Lebensdauerbremsen für heutige Verhältnisse entwickelt werden. Es bleibt dabei die Frage offen, ob derart hohe Zeiträume überhaupt wünschenswert sind und die fortschreitende technische Entwicklung und der Zeitgeschmack einer weiteren Nutzung nicht vorzeitig widersprechen.

7.10 - 7.30 Fahrzeugantrieb, Fahrwerk

Der Fahrzeugantrieb wird als konventionell angenommen, da alle Prognosen der letzten Zeit eine Ablösung des Hubkolbenmotors als unwahrscheinlich bezeichnen. Dabei werden wohl weiterhin Metalle dominieren bei den Motoren; die Nebenaggregate, Gehäuse, Leitungen und Mechanismen werden aber diverse Elemente aus Kunststoff erhalten. Die Substitutionsbestrebungen werden sich auch auf Leichtmetallbauteile erstrecken, da diese vergleichsweise teuer sind. Besonders hochwertige Faserverbundwerkstoffe sind mittelfristig kaum zu erwarten, falls nicht ein deutlicher, zur Zeit kaum abzusehender Preisrutsch sowie neue, automatisierbare Verarbeitungsverfahren auftreten. Auch bei Elementen der Kraftübertragung oder Radaufhängung sind Kunststoffe und Faserverbundwerkstoffe zwar seit langem im Gespräch, wegen der noch damit verbundenen Probleme und Kosten aber vorerst kaum zu erwarten. Eine Ausnahme könnten Federn aus GFK sein, die bereits in Kleinserien laufen. Die Hinterachse kann alternativ auch als integriertes Bauteil, d. h. Achse, Lenker, Stabilisator und eventuell auch Feder aus einem Stück gedacht werden, wodurch sonst höhere Material- und Fertigungskosten vergleichbarer Einzelteile unterboten werden könnten.

7.40, 7.50 Fahrzeugaufbau

Die tragenden Strukturen der Karosserie werden weiterhin aus Stahl gefertigt werden, aber auf von außen nicht sichtbare Partien beschränkt werden. Hochfeste und verzinkte Sorten werden zunehmen. Die Außenhaut wird überwiegend aus Kunststoffen bestehen, wobei hier glasfaserverstärkte Thermoplaste an Boden gewinnen werden gegenüber SMC oder unverstärkten Kunststoffen. Aluminiumbleche werden nur dort Chancen haben, wo bei Zwang zum Leichtbau eine ausreichende Oberfläche mit Kunststoffen nicht zu

erreichen ist oder plastische Verformbarkeit bei einem Unfall gefordert wird. Im Lastenheft wird aber auch hier zunächst kunststoffverkleidetem Stahl der Vorzug gegeben und Aluminium nur als Alternative vorgesehen. Die Scheiben dürften, jedenfalls soweit sie beweglich sind oder im primären Sichtbereich liegen, aus Glas bestehen. Im Innenraum werden keine neuen Werkstoffe eingesetzt werden, da hier ohnehin Kunststoffe schon heute dominieren.

7.60 Elektrik, Klimatisierung

Die Fahrzeugelektrik wird von der Werkstoffseite her keine weiteren Veränderungen erfahren, abgesehen von Ausführungsformen der Schalter oder von neuartigen Anzeigen. Denkbar sind u. U. energiesparende Adsorptionsklimaanlagen.

7.70 Ausrüstteile

Die Ausrüstteile für Motor, Fahrgestell oder Karosserie werden weitgehend konventionell bleiben, wobei berücksichtigt werden muß, daß bereits heute Kunststoffe einen hohen Anteil haben und dieser sich auch noch vergrößern wird.

7.90 Elektrik, Ausrüstteile, Lackierung

Die Lackierung wird auf energiesparende und lösungsmittelarme Systeme, die sich auf Kunststoff und Metall aufbringen lassen, umgestellt werden.

Bild 80 zeigt eine Skizze einer Großraum- oder Familienlimousine, wie sie in letzter Zeit zunehmend auf den Markt kommen, in Rahmenbauweise mit Leichtbauaußenhautteilen. Das in diesem exemplarischen Lastenheft beschriebene Automobil könnte beispielsweise in der Version mit 5 Türen so oder so ähnlich aussehen.

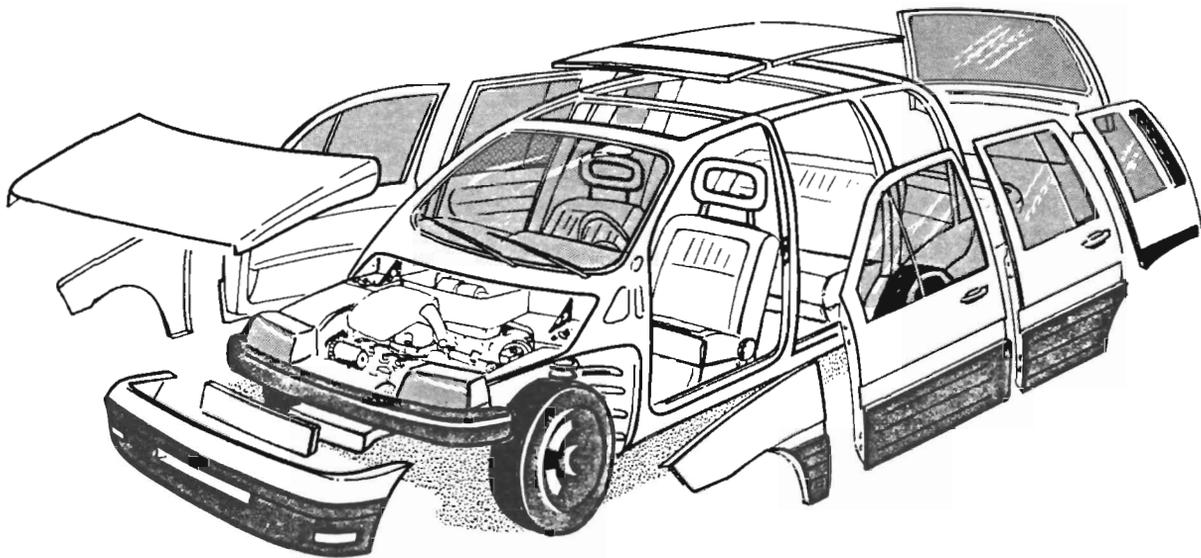


Bild 80: Entwurf einer Großraumlimousine in Rahmenbauweise mit "Hang-On"-Außenteilen.

Fahrzeugteil, Baugruppe	Bauart	Material	Auswahlgrund	Alternative
01 Fahrzeugauslegung allgemein	Untere Mittelklasse, 4 Türen, 5 Türen oder Kombi-Version vorgesehen	-	Für Stadt und Reise geeignet, Mehrzahl der Käufer wird sich nicht zwei Pkw leisten können	kleiner, Golf- oder Kadett-Klasse,
02 Maße, Gewichte, Fahrleistungen	ca. 4,4 m lang, 1,6 - 1,7 m breit, 1,4 m hoch, Gewicht ca. 900 kg, Motor ca. 60 kW, v_{max} ca. 190 km/h, 0-100 km/h ca. 12 s,	-	Kompromiß zwischen Handlichkeit in der Stadt und Raumangebot für Reisen	Variable Karosserie, Stufenkofferraum austauschbar gegen Schrägheck
03 Kostenrahmen, Lebensdauer	Anschaffungskosten und Ausstattungsniveau wie heutige untere Mittelklasse (Opel Ascona, Ford Sierra, VW Passat, BMW 316), Lebensdauer 15 Jahre	-	bei Langzeitauto unsicher ob technische Entwicklung und Zeitgeschmack gegen Ende der Lebensdauer nicht weiterer Benutzung widerspricht	Kosten durch Rationalisierung und schärferen Wettbewerb niedriger
11 Motor, Antriebsaggregate	konventionell, Ottomotor	Leichtmetallmotorblock und Zylinderkopf, alle gegossenen Gehäuse- teile Al, Kappen und Deckel GF-BMC	Alternativen wie FW für Block und Kopf zu teuer	Dieselmotor, Magnesium anstelle Aluminium
12 Steuerung und Regelung, Stellglieder	konventionell	konventionell	Verwendung von Leichtmetall und Kunststoff weitgehend Stand der Technik	-
13 Kraftstoffaufbereitung, Vergaser, Filter, Ansaugrohre	konventionell, elektronische Einspritzanlage	Ansaugrohre Aluminium, Filter Kunststoff	Gewicht, Kosten	elektronisch gesteuerter Vergaser, Magnesium-Gehäuse, Ansaugrohre FW
16 Kraftstoffbehälter, -leitungen	konventionell	Tank HD-PE Leitungen konventionell	Gewicht, Raumaussnutzung, Stand der Technik	konventionell

Fahrzeugteil, Baugruppe	Bauart	Material	Auswahlgrund	Alternative
17 Einrichtungen zur Minderung von Umweltbelastungen	Motorferne Schallkappeel, Abgas siehe 19	SMC, PUR-Schaum	Gewicht, Kosten, Stand der Technik	ZMC-Schalen
18 Kühlsystem	konventionell	Wärmetauscher Aluminium, Wasserküsten Kunststoff	Stand der Technik	-
19 Abgasanlage	konventionell, Abgaskatalysator	Gehäuse Edelstahl, Einsatz Keramikgrundkörper Krümmer Al mit Keramikauskleidung	Stand der Technik, Gewicht	- konventionell, gewichtsoptimiert
23 Getriebe	konventionell	Aluminiumgehäuse	Stand der Technik, FW-Anwendung nicht bekannt, Kosten	Magnesiumgehäuse
26 Wellen, Gelenke	konventionell	konventionell	Stand der Technik, Kosten, (keine Kardanselle durch Frontantrieb)	Wellen Kohlefaserverbundwerkstoff mit Stahlgelenken
31 Vorderachse	konventionell, Federbeine Antrieb vorn	Lenker Aluminium	Gewicht	Stahl, optimierte Konstruktion
32 Lenkung	konventionell	Stahl	Stand der Technik, Sicherheit	-
33 Hinterachse	Verbundlenkerachse	Stahl	Kosten, Sicherheit, Stabilisator entfällt	GFK-Konstruktion mit integrierten Federn und Lenkern
34 Bremsen	vorn Scheiben, innenbellüftet, hinten Trommel konventionell	vorn Aluminium beschichtet, hinten konventionell	Gewicht; rotierende und ungefederte Massen	konventionell

Fahrzeugteil, Baugruppe	Bauart	Material	Auswahlgrund	Alternative
35 Servoelemente, Energiespeicher	konventionell	Unterdruckspeicher Kunststoff	Gewicht, Fertigung	Al
36 Räder und Bereifung	pannsichere Reifen/Felgenkombination	Reifen konventionell, Räder Leichtmetall	Fahreigenschaften von Kunststoffreifen unbefriedigend; LM-Räder kaum schwerer als Kunststoff, aber ohne Temperaturprobleme	Räder GFK
37 Federung, Dämpfung	vorn Schraubenfedern, konventionell, hinten Blattfedern	hinten GFK-Blattfeder bzw. integrierte Feder-Lenker-Einheit, Dämpfer Al	Gewicht,	hinten Luftfeder mit Niveausgleich
41 Karosserie, Struktur Sicherheitselemente	konventionell	Stahl, weitgehend HSLA	Gewicht, Kosten, Energieaufnahme, Steifigkeit	Reserverachmulde, Bodenbleche, Dach GFK, Rahmen und Träger HSLA
42 Karosserie, Außenhaut, feste Teile	Nachgiebiges Frontend vor fester Stahlstruktur, anhängbare Teile Kunststoff	in Stoßfängerhöhe PUR-Haut mit halbharter Schaumfüllung, Oberteil ABS Kotflügel PA 6.6 Sandwich-Dach mit Stahl-Überrollbügel	Gewicht, Fertigung, Korrosionsbeständigkeit	Al
43 Karosserie, Klappen, Hauben, Türen	Türen aus Sicherheitsgründen Stahlstruktur,	Motorhaube ZMC, Heckklappe SMC Türen Stahl, Außenhaut PA-RRIM	nichttragende Teile nutzen Steifigkeit der Metalle nicht aus,	vermeehrt Aluminium, insbesondere Türen
44 Karosserie, Stoßfänger	Außenteile verformbar, Träger in Struktur integriert reversibel bis 6 km/h	siehe 42	Funktion, Stoßfänger in Außenhaut integriert reversibel	reversibel bis 10 km/h
45 Scheiben	konventionell, geklebt bzw. oberflächenbündig geführt	Glas, außer hintere feste Seitenscheiben PMMA	Kosten, Lebensdauer, Steifigkeit	

Fahrzeugteil, Baugruppe	Bauart	Material	Auswahlgrund	Alternative
51 Innenraumgestaltung, Ausstattung,	konventionell	weitgehend konventionell (Holzfaserformstoffe, gefülltes PP, PUR, ABS usw.; kein PVC)	diverse Kunststoffe Stand der Technik; Vermeidung von PVC aus ökologischen und physiologischen Gründen, Recycling problematisch (HCl)	-
52 Sitze	Gestell Stahl mit Kunststoffschalen und Polster	Schalen PA 6 GF, Polster PUR	Gewicht, Kosten, Sicherheit	konventionell
53 Bedienelemente	konventionell	konventionell	Stand der Technik	-
54 Rückhaltesysteme	konventionell	konventionell	Stand der Technik	-
55 Innenraum, Sicherheitselemente	konventionell	konventionell	Stand der Technik	-
61 Allgemeine Elektrik	Mischbauweise konventionell und Multiplex	konventionell, Leiter Kupfer	Aluminium höherer Raumbedarf	-
62 Instrumente	vollelektronisch	LCD auf Kunststoffträger	keine bewegten Teile, Kosten	-
63 Leuchten, Signalgebung	konventionell	konventionell	Kunststoff Stand der Technik	-
64 Belüftung, Heiz- und Klimaanlage	konventionell	konventionell Wärmetauscher Al, Gehäuse und Luftführungen Kunststoff	Stand der Technik	-

Fahrzeugteil, Baugruppe	Bauart	Material	Auswahlgrund	Alternative
71 Ausrüstung Motor und Fahrgestell, Befestigungsteile, Lager	konventionell, Lager teilweise hydraulisch bedämpft	konventionell	Stand der Technik	-
72 Ausrüstung Karosserie, Mechanik, Schlösser, Zierteile	konventionell	Ramschutzleisten PUR-RRIM Schlösser Stahl	Stand der Technik, Sicherheit	-
91 Farbgebung, Lack	gleicher Decklack auf Stahl- und Kunststoff	High Solid Lack	Langzeitverhalten Fertigung Umweltschutz	
92 Korrosionsschutz	Bodengruppe verzinkt, Unterbodenschutz gespritzt	konventionell	Stand der Technik	Kunststoffbeschichtung

Aufbauend auf einem kurzen Rückblick wird zunächst anhand verschiedener Baugruppen der derzeitige Stand der Technik beschrieben und ein Ausblick mittels der zuvor gewonnenen Erkenntnisse gegeben. Dazu werden auch einzelne Aspekte wie Gewichts- und Kostenfragen und auch übergeordnete Gebiete wie Fragen der Umweltbelastung oder der Ressourcen angesprochen. Die Überlegungen basieren zum großen Teil auf der Auswertung der Erkenntnisse aus Experten- und Firmenbefragungen sowie der Literatur. Die Einschätzungen werden ergänzt durch eigene Erfahrungen bei der Arbeit am Forschungs-Pkw "UNI-CAR", mit dessen Konzeption und aus zahlreichen Versuchen. Als anschauliches Ergebnis wird ein exemplarisches Lastenheft eines Fahrzeugs mit den Mitteln der mittelfristig zu erwartenden Technologie gezeigt.

Die Diskussion der verschiedenen Werkstoffe und Bauweisen zeigt, daß Stahl bis auf weiteres in wesentlichen Bereichen des Pkws der preiswerteste Werkstoff bleiben wird. Bei den steifigkeitskritisch auszulegenden Komponenten wie den tragenden Karosseriestrukturen bietet er funktionelle Vorteile bei vergleichsweise geringem Gewicht auch gegenüber den sogenannten Leichtbauwerkstoffen. Wo Energieaufnahme und Verformungsmöglichkeiten bei hoher Steifigkeit im Normalbetrieb gefordert sind, steht er derzeit nur mit Aluminium im potentiellen Wettbewerb. Es werden zunehmend HSLA-Stähle eingesetzt und diese zumindest im Bereich der Bodengruppe verzinkt. Stehen Festigkeit und Steifigkeit bei geringem Gewicht im Vordergrund, ist zukünftig der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen denkbar, von denen insbesondere die Kohle- und Aramidfasern sehr gute Werte erreichen, vorerst aber zu sehr hohen Kosten. Die tragenden, inneren Strukturen der Pkws werden daher weiterhin aus Stahl gefertigt werden.

Alle festigkeitskritisch ausgelegten Bauteile sind leichter zu substituieren. Leichtmetalle und Faserverbundwerkstoffe bieten sich hier an. Temperatur- oder dauerfestigkeitskritische Komponenten dürften günstiger aus metallischen Werkstoffen zu realisieren sein, weniger belastete mechanische Elemente aus Kunststoff. Bauteile, die durch ihre Gestaltung verschiedene Funktionen in wenigen Einzelteilen vereinen, werden zunehmend aus glasfaserverstärkten Kunststoffen gefertigt.

Alle Fahrzeugteile, die eher formbildendes Element sind, als Verkleidung, Gehäuse oder Deckel dienen sowie Polster und andere, elastische Eigenschaften aufweisende Bauteile lassen sich am vorteilhaftesten aus Kunststoff herstellen. Die Zahl der Anbauteile der Karosserie aus Kunststoff wird sich vergrößern und auch auf großflächige Teile erweitert werden, die bislang fast ausschließlich aus Stahl gefertigt werden. Kotflügel, Hauben und Deckel sind hier zu nennen. Die Substitutionsbestrebungen werden dabei aber nicht nur auf Stahl, sondern verstärkt auch auf die im Fahrzeuginneren noch verwendeten Naturprodukte und auch auf schon länger eingeführte Kunststoffe ausgerichtet werden. Dabei geht der Trend weg von den homogenen zu gefüllten bzw. verstärkten Verbundwerkstoffen.

Differenziert man zwischen großen und kleinen Fahrzeugen, werden für eine Reihe von Komponenten bzw. Baugruppen unterschiedliche Lösungen geboten sein. Bei Kleinwagen lassen sich Teile der Vorderfront, die Kotflügel und die Motorhaube zu einem Bauteil zusammenfassen und aus Kunststoff fertigen. Bei einer großen Reiselimousine der Oberklasse würde dieses Teil Ausmaße annehmen, die für die Verwendung von Kunststoff problematisch sind. Das Prinzip der Rahmenbauweise mit Anbauteilen ließe sich aber bei beiden Fahrzeuggrößen durchsetzen, wie auch die US-Fahrzeuge zeigen. Der Audi-Forschungs-Pkw von 1981 als Vertreter der größeren Fahrzeuge ist weitgehend nach dem

gleichen Prinzip wie z. B. der kleinere FIAT VSS oder die Großraumlimousine Renault Espace mit Anbauteilen aus Kunststoff versehen worden.

In der Bauweise können Fortschritte bevorzugt dort angenommen werden, wo nichttragende Teile der Karosserie durch Multifunktionsteile aus Kunststoff zu ersetzen sind. Das Konzept der volltragenden Stahl-Karosserie erlaubt dabei auch die Einbeziehung von leichten Faserverbundwerkstoffen, z. B. im Dach. Die ausreichend hohe Schubsteifigkeit ermöglicht Gewichtseinsparungen durch Kunststoffe, ohne daß die Torsionssteifigkeit wegen des geringeren E-Moduls wesentlich beeinträchtigt wird.

Für die tragenden Rahmenstrukturen wird zugunsten von Steifigkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit wohl weiterhin Stahl gewählt, darunter hochfeste Legierungen für die stärker belasteten Bereiche. Die Außenhautteile des Vorderwagens wie Kotflügel oder Motorhaube, die auch Craschanforderungen genügen sollen, lassen sich am günstigsten durch Aluminium substituieren. Eine Bauweise mit teilweise verzinktem und teilweise hochfestem Stahlskelett und Anbauteilen aus Kunststoff und Aluminium entspricht am weitesten den Trends, wie sie z. B. der FIAT VSS oder der Renault Espace zeigen.

Der Personenwagen der mittleren Zukunft wird eine tragende Struktur aus teilweise hochfestem und teilweise verzinktem Stahl haben, an die Kunststoffteile angebaut werden. Dabei muß deren Design den Materialeigenschaften besser als bisher bekannt angepaßt werden. Eine Beschränkung der Zahl der verschiedenen Kunststoffe im Außenbereich wird eintreten, da nur so die bestehenden Probleme in den Lackierstraßen, z. B. die Wahl einer einheitlichen Grundierung, gelöst werden können. Es wird wahrscheinlich bis auf weiteres nicht möglich sein, auf Lackierungen überhaupt zu verzichten, da neben dem Käufergeschmack bei verschiedenen

Kunststoffen auch werkstofftechnische Schwierigkeiten (z. B. Witterungsbeständigkeit, Feuchtigkeitsaufnahme, Oberflächenbeschaffenheit usw.) dem entgegenstehen. Mechanische Komponenten aus Aluminium werden weitgehend auf die Verwendung von Gußlegierungen aus Sekundärmaterial ausgerichtet werden, da Energiebilanz und Kosten günstiger sind. Außenteile aus Knetlegierungen werden wie bisher auf Sportwagen und sonstige Spezialfälle beschränkt bleiben, da hier höhere Kosten für den Leichtbau in Kauf genommen werden können als bei Großserienlimousinen.

Der Durchbruch eines alternativen Werkstoffs ist nicht zu erwarten, eher ausgereifere Mischbauweisen der Karosserie und eine vorsichtige Weiterentwicklung hin zu deutlich materialgerechteren Konstruktionen auf konventioneller Basis.

Die Ergebnisse sowie wichtige Arbeitsunterlagen für deren Beurteilung kommen in dem entwickelten Lastenheft, zahlreichen Folgerungen in den einzelnen Kapiteln und dem im Anhang beigegebenen Material zum Ausdruck. Weitere Überlegungen zum Thema müßten sich besonders auf die wirtschaftlichen, weniger auf konstruktive oder anwendungstechnische Fragen ausrichten. Dazu dürfte es erforderlich sein, in enger Zusammenarbeit mit Fahrzeugherstellern und Zulieferern die technologischen Aussichten für Fertigungsaufwand und Produktqualität sowie die potentiellen Kosteneinsparungen mit alternativen Werkstoffen genauer zu untersuchen. Die Realisierbarkeit diverser Bauteile aus alternativen Werkstoffen wird allerorten gezeigt; die Frage, ob sich die notwendigen Investitionen später amortisieren können, bleibt Stoff für weitere Arbeiten.

LITERATUR

- Bemerkungen zur Literaturliste

Die Literaturquelle [1] ist eine Pauschalangabe für diverses aufgrund einer Umfrage in den Jahren 1982 bis 84 überlassenes Material von Firmen wie Vortragsmanuskripte, Werbemittel usw., aber auch unveröffentlichte Studien, Briefe oder persönliche Informationen; daher soll keine Quelle im einzelnen genannt werden.

Ähnliches gilt für die Quelle [2], da die für das Projekt "Auto 2000" erstellten Berichte überwiegend nicht oder nur auszugsweise veröffentlicht bzw. nur in geringer Zahl für die beteiligten Mitarbeiter vervielfältigt worden sind.

Literatur mit []* hat nur mittelbar in anderen Quellen vorgelegen.

Die Literaturstellen [315] bis [323] geben einige weitere Informationen zu den Kapiteln 1 und 2, die Literaturstellen [324] bis [352] zu den Kapiteln 3 und 4. Diese Veröffentlichungen sind bei der Erarbeitung dieser Kapitel nur am Rande berücksichtigt worden, sollen aber der Vollständigkeit halber mitaufgeführt werden.

[1] Diverse Unterlagen, persönliche Informationen, Briefe oder teilweise unveröffentlichte Studien der Firmen:

AC Delco Europe,
 Akzo Plastics bv,
 Deutsche Akzo Coating GmbH,
 Alcan-Aluminiumwerke GmbH,
 Aluminium-Walzwerke Singen,
 Aluminium-Zentrale e. V.,
 ATO Chemie Deutschland GmbH,
 AUREPA-STADLER,
 AUDI NSU Auto Union AG,
 Gottlob Auwärter GmbH & Co.,
 BASF AG,
 Bakelite Gesellschaft mbH,
 Beratungsstelle für Stahlverwendung,
 Süddeutsche Kühlerfabrik Julius Fr. Behr GmbH &
 Co. KG,
 Bayerische Motoren-Werke AG,
 Bocklenberg & Motte GmbH & Co. KG.,
 Bostik GmbH,
 Robert Bosch GmbH,
 Bremskerl-Reibbelagwerke Emmerling & Co KG,
 Brose Fahrzeugteile GmbH & Co.,
 The Budd Company,
 Ciba-Geigy GmbH,
 Daimler Benz AG,
 Dinol GmbH,
 DSM Deutschland GmbH,
 Du Pont de Nemours GmbH,
 Eaton GmbH,
 VEB Automobilwerke Eisenach,
 Estel-Hoesch Werke AG,
 FAG Kugelfischer Georg Schäfer & Co,
 Felten & Guilleaume,
 Ferrozell Gesellschaft Sachs & Co mbH,
 Fichtel & Sachs AG,
 Flachglas AG,
 Ford-Werke AG,
 Carl Freudenberg,
 Garrett Corporation,
 Gevetex Textilglas-GmbH,
 Girling Bremsen GmbH,
 GKN House,
 Fisher Body Division General Motors Corporation,
 Deutsche Goodyear GmbH,
 Grillo-Werke AG,
 Grünzweig & Hartmann und Glasfaser AG,
 Gutbrod-Werke GmbH,

Henkel KGaA,
 Herberts GmbH,
 Accumulatorenfabrik Hoppecke GmbH & Co. KG,
 Hoechst AG,
 Chemische Werke Hüls AG,
 Deutsche ICI GmbH,
 ICI Europa,
 INA-Wälzlager Schaeffler KG,
 Integral Hydraulik GmbH & Co. Kg,
 IVM Technical Consultants GmbH,
 Keiper GmbH & Co KG,
 Kern & Liebers GmbH & Co,
 Kienzle Apparate GmbH,
 Eugen Klein KG,
 Mannesmann Kronprinz AG,
 Deutsches Kupfer-Institut,
 Leonhard Kurz,
 Kühlerfabrik Längerer & Reich GmbH & Co. KG,
 Ludwig Loewe,
 Filterwerk Mann & Hummel GmbH,
 Mahle GmbH,
 METAWELL GMBH,
 Menzolit-Werke Albert Schmidt GmbH & Co. KG,
 Metallgesellschaft AG,
 Möller-Werke GmbH,
 Monsanto Europe S.A.,
 Adam Opel AG,
 Owens-Corning Fiberglas Deutschland GmbH,
 Petri AG,
 Phillips Petroleum Int. GmbH,
 Pininfarina Studi e Ricerche,
 Pirelli ATG,
 Dr.-Ing. h. c. F. Porsche AG,
 Presta Press- & Stanzwerk AG,
 Röhm GmbH,
 Saint Gobain,
 VEB Sachsenring Automobilwerke,
 Schweizerische Aluminium AG,
 Sekurit Glas Union GmbH,
 Deutsche Shell AG,
 Chemische Fabrik Stockhausen GmbH,
 Dr. A. Stankiewicz GmbH,
 Thyssen AG,
 Veritas Gummiwerke AG,
 Vernay Europa B.V.,
 Volkswagenwerk AG,
 Wacker-Chemie GmbH,
 Hermann Wiederhold GmbH,
 VEB WTZ Automobilbau,
 Theodor Wuppermann GmbH,
 Ymos Metallwerke

und weitere.

- [2] Der Bundesminister für Forschung und Technologie, Forschungsprojekt "Forschungs-PKW", Lastenhefte und Szenarien 1978-1982 sowie Abschlußbericht UNI-CAR, 1983.
- [3] J. Blödorn:
"Bauweisen und Materialien zukünftiger Automobile",
Forschungsbericht, Institut für Fahrzeugtechnik, Technische Universität Berlin, 1983.
- [4] J. Blödorn:
"Some Aspects of Construction and Materials of Future Automobiles",
International Policy Forum, Stenungsbaden, Stenungsund, Sweden, June 13 - June 18, 1983.
- [5] J. Blödorn:
"Mode of Construction and Materials of some Recent Research Automobiles",
International Policy Forum, Stenungsbaden, Stenungsund, Sweden, June 13 - June 18, 1983.
- [6] J. Bandel:
"Der Forschungs-Personenwagen",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 82 (1980) 2.
- [7] Ausschreibung zum Projekt "Demonstration automobiltechnischer Forschungsergebnisse in integrierten Gesamtkonzepten von PKW-Versuchsmodellen",
Der Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT), Bonn (1978).
- [8] H. Appel, J. Blödorn, A. Kühnel, R. Pasch, H. Rattaj, H.-P. Willumeit, W. Wollert:
"Das Sicherheitskonzept des Forschungs-PKW UNI-CAR",
VDI-Bericht Nr.418, 1981, S. 123-130.
- [9] W. Wollert, J. Blödorn, H. Appel, A.Kühnel:
"Realisation of Pedestrian Protection Measures on Cars",
SAE Technical Paper Series, P-121, 830051, International Congress and Exhibition, Detroit, USA, 1983.

- [10] J. Blödorn, W. Wollert, A. Kühnel, R. Pasch, H. Rattaj, H. Appel:
"Anwendung von Polyurethan-Schaumstoffen zur Verbesserung der Äußerer Sicherheit beim Forschungs-PKW UNI-CAR",
Kunststoffe 72 (1982) 4, S. 217-221.
- [11] J. Blödorn:
"Realisation of Pedestrian Protection Measures on Cars",
Vortrag 830051, SAE, International Congress and Exhibition, Detroit, USA, 1983.
- [12] H. Karl:
"Fang- und Bremseinrichtung an Kraftfahrzeugen",
Patentschrift Nr. 642667 beim Reichspatentamt, Kl. 63c, Gr. 70, vom 19.5.1932.
- [13] U. Seiffert, H.-D. Beckmann:
"Die Bedeutung der ESV-Konferenzen, dargestellt mit Beispielen aus der Volkswagen-Entwicklung",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 82 (1980) 10.
- [14] F. Panik:
"Die VIII. ESV-Konferenz - Überblick",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 83 (1981) 5.
- [15] H. Appel:
"Ergebnisse und Schlußfolgerungen aus dem ESV-RSV-Programm und der BMFT-Studie "Technologien für die Sicherheit im Straßenverkehr",
Entwicklungslinien in der Kraftfahrzeugtechnik, Verlag TÜV-Rheinland GmbH, Köln, 1977.
- [16] F. Panik, W. Schmid:
"Die 7. ESV-Konferenz - Überblick",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 82 (1980) 1.
- [17] A. Zomotor, J. Nitz, G. Ruf:
"Results of Handling, Stability and Braking Tests of the Minicars RSV",
VIIIth International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Wolfsburg, 21. - 24.10.1980.

- [18] U. Seiffert, C. Voy:
 "IRVW II Fahrzeugsicherheit ein Teil des integrierten Fahrzeugkonzeptes",
 ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 83 (1981) 5.
- [19] C. Becker, W. König:
 "Wolfsburger Morgenland",
 Auto Motor und Sport, 23/1980.
- [20] Presse- und Werbematerial der Firmen sowie diverse weitere Firmenunterlagen,
 siehe entsprechende Texthinweise.
- [21] H. Appel, B. Breuer, U. Essers, J. Helling, H.-P. Willumeit:
 "UNI-CAR - Der Forschungs-Personenwagen der Hochschularbeitsgemeinschaft",
 ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 84 (1982) 3.
- [22] H. Appel, K.-P. Hilber:
 "Comparison of Different German Research Vehicles",
 International Policy Forum, Hakone Prince, Hakone, Japan, 16 May - 22 May 1982.
- [23] C. Becker:
 "Forschungsauto Uni-Car",
 Auto, Motor und Sport 23/1981.
- [24] A. Kühnel, J. Blödorn, H. Appel, R. Pasch, H. Rattaj, W. Wollert:
 "Realisierung und Wirksamkeitsnachweis von Sicherheitsanforderungen am Forschungs-PKW UNI-CAR",
 Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr, Heft 36, 1982, S. 152-157.
- [25] H. Barske, H. Schretzenmayr:
 "Das Audi-Konzept für die Entwicklung eines zukünftigen Personenwagens mit erhöhtem Nutzwert",
 ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 82 (1980) 4.
- [26] H. Schretzenmayr:
 "Die Konzeption der Karosserie des AUDI Forschungsautos",
 ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 84 (1982) 3.

- [27] "Audi features plastic sandwich floor",
Automotive Engineering, January 1982.
- [28] B. Strackerjahn:
"Rahmenbedingungen für den Automobilbau der
Zukunft und ihre Auswirkungen auf den
Mercedes-Benz Forschungs-Personenwagen
"Auto 2000"",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 82 (1980) 2.
- [29] C.-P. Elberth:
"Der Zweck heiligt die Form",
mot - Die Auto-Zeitschrift 10/82.
- [30] A. Bauer:
"Kunststoffe im Volkswagen AUTO 2000",
Entwicklungslinien in Kraftfahrzeugtechnik und
Straßenverkehr, Forschungsbilanz 1981, Verlag TÜV
Rheinland.
- [31] U. Seiffert:
"VW-Auto 2000",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 83 (1981) 9.
- [32] O. v. Fersen:
"Das Auto von morgen",
VDI nachrichten Nr. 42 / 15. Oktober 1982.
- [33] B. Heißing, H.-J. Krüger:
"Bilanz der Kraftfahrzeugforschung",
TÜ 24 (1983) Nr. 5 Mai.
- [34] H. Flegl:
"Porsche 995 - Ein Konzept auf der Basis
zukünftiger Technologien",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 82 (1980) 5.
- [35] H. Flegl:
"The Porsche Research Car",
International Symposium on Traffic and Transport-
ation Technologies, Hamburg 1979, Proceedings
Volume CII, Verlag TÜV Rheinland e. V., Köln.

- [36] M. Uebelstädt:
 "Überlegungen zum Großserieneinsatz von Sandwichbauteilen ... am Beispiel der Motorhaube des AUDI-Forschungsautos",
 Entwicklungslinien für Kraftfahrzeuge und Kraftstoffe, Forschungsbilanz 1982, Verlag TÜV Rheinland 1983.
- [37] H. Hablitzel:
 "Die Grenzen des Kunststoffeinsatzes im Automobilbau der 80er Jahre",
 Grenzen der Kunststoffanwendung im Pkw-Bau in den 80er Jahren, Jahrestagung VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1981.
- [38] Jahrestagungen der VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik in Mannheim, Rosengarten,
 Fachbeirat Kunststoffe in der Fahrzeugtechnik, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1977 - 1984.
- [39] K. Jüllig:
 "Entwicklung eines Front-End",
 PLASTverarbeiter, 33. Jahrgang, 1982, Nr. 5.
- [40] E. Hellriegel:
 "Integrierter Front- und Heckstoßfänger",
 Kunststoffe im Automobilbau, Jahrestagung der VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1983.
- [41] G. Walter:
 "Unterboden-Motorraumverkleidung aus glasmattenverstärktem Polypropylen (PP-GM) des Mercedes PKW 190 E",
 Jahrestagung VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik (siehe oben), VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1983.
- [42] R. Heim, W. Labatzke:
 "Verkleidung und Schutzleiste für das Stoßfängersystem",
 Jahrestagung VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik (siehe oben), VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1983.
- [43] F. Piech, J. Klingel:
 "Der neue Audi 100",
 ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 85 (1983) 1.

- [44] B. Breuer:
 "The pedestrian-oriented, low-noise and economical research car",
 Proceedings International Symposium on Traffic and Transportation Technologies, Volume C II,
 S. 70-88, Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln 1979.
- [45] H. Rattaj, B. Rehm, A. Kühnel, H. Appel, R. Pasch, K. Sauerbier:
 "Die Ergonomie im UNI-CAR - Konzept und praktische Erprobung",
 Entwicklungslinien für Kraftfahrzeuge und Kraftstoffe, Forschungsbilanz 1982, Verlag TÜV Rheinland GmbH.
- [46] W. Klie, W. Fischer:
 "Stoßfänger-Biegeträger und Absorbererelemente",
 Kunststoffe im Automobilbau, Jahrestagung der VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1983.
- [47] "Metallkäßig mit Kunststoffverkleidung",
 Industrieanzeiger, Nr. 19 v. 05.03.1982 / 104. Jg.
- [48] O. v. Fersen:
 "Module erschließen Modellvielfalt",
 VDI-Nachrichten Nr. 44 / 29.10.1982.
- [49] C.-P. Elberth:
 "Kunststoff ist Trumpf",
 mot - Die Auto-Zeitschrift, Nr. 2/1983.
- [50] "Karosseriebau der Zukunft",
 Krafthand, 54 (1981) 24, S. 1927-1930.
- [51] D. Scott:
 "Hybrid Car Has Bolt-on Body Elements",
 Automotive Engineering, Volume 90, Number 2, February 1982.
- [52] U. Sorgatz, A. Germer:
 "Plastics Application from the Vehicle Designer's Point of View",
 SAE Technical Paper Series, 840266, 1984.

- [53] G. Perini:
"A Revolution in Car Design",
Car Styling, Nr. 38, 1982, Hokuto Tsusho, Inc.,
Japan.
- [54] "RSV Phase I",
Minicars Corporation, Goleta, California, 1976.
- [55] D. Friedman:
"Minicars' Research Safety Vehicle Status",
Contract Schedule 2/1/77 to 1/30/80, Contract
Nr. DOT-HS-7-01552, Minicars Inc., Goleta,
California.
- [56] D. Friedman, E. Belohoubek:
"The Near-Term Prospect For Automotive Electro-
nics, Minicars' Research Safety Vehicle",
SAE-Paper 780858, 1978.
- [57] W. W. Dickhart:
"Producibility Studies on Research Safety Vehicle
at Budd",
SAE Technical Paper Series 811000, International
Off-Highway Meeting & Exposition, Milwaukee,
September 14-17, 1981.
- [58] P. James:
"Les matériaux nouveaux: une réponse aux
impératifs de la carrosserie automobile",
Ingenieur de l'Automobile, Nr. 15, 1981.
- [59] "Mid 80s Cars: Saving Weight At All Costs",
Design Engineering, June 1981, London.
- [60] J. Houston:
"Motor Industry Plans In Plastics For The '80s",
Engng. Mater. a. Des., 25 (1981) 8.
- [61] C. Brée:
"Etude des portes du prototype V.E.R.A.",
Ingénieurs de l'Automobile, 1981 Nr. 15.
- [62] O. v. Fersen:
"Serienelemente sparen Entwicklungszeit",
VDI-Nachrichten Nr. 43 / 22.10.1982.

- [63] "Die realistische Lösung von Peugeot: Versuchsfahrzeug für mehr Wirtschaftlichkeit",
Krafthand, Heft 17, 05.09.1981.
- [64] "Spar-Prototypen unter die Haut geschaut",
Automobil Revue Nr. 37 vom 03.09.1981.
- [65] "Auf dem Weg zum Sparsam-Auto",
Automobil Revue Nr. 20 vom 13.05.1982.
- [66] B. Heil:
"Peugeot Vera technisch betrachtet",
mot - Die Auto Zeitschrift, Nr. 13/1982.
- [67] M. Cantner:
"Das aktuelle Thema: Kunststoffe im Automobilbau",
Kunststoffjournal Nr. 6, 1981.
- [68] F. G. Richardson:
"Pedestrian Protection and Damageability and the Calspan Research Safety Vehicle",
Eight International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Wolfsburg, Germany, 1980.
- [69] G. J. Fabian:
"Materials for the Calspan/Chrysler Research Safety Vehicle",
SAE Technical Paper Series (810231), Detroit, Michigan, 1981.
- [70] G. J. Fabian:
"Compatibility In The Calspan Research Safety Vehicle",
Eight International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Wolfsburg, Germany, 1980.
- [71] B. F. Smith, S. P. F. Petty:
"Results of Angled Barrier and Headform Impact Tests of the Calspan Research Vehicle",
VIIIth International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Wolfsburg, 21. - 24.10.1980.

- [72] H.-G. Haldenwanger, S. Schäper:
"Vom Prototyp zur Serie - Entwicklung von
Kunststoffteilen der Rennsport- und Serien-
ausführung des Audi Quattro",
PLASTverarbeiter, 33. Jahrgang, 1982, Nr. 5.
- [73] K.-D. Johnke:
"Glasfaserverstärkte Kunststoffe im Auto-
mobilbau",
Kunststoffberater 27 (1982) 1/2.
- [74] K. Dausend:
"Kunststoffe heute und morgen im Automobilbau",
Diplomarbeit an der Technischen Universität
Berlin, Institut für Fahrzeugtechnik, 1982.
- [75] E. Fumia:
"Audi Quartz: Anwenden von Kunststoffen für
ästhetische Automobilkarosserien",
Kunststoffe im PKW- und Nutzfahrzeugbau,
Jahrestagung VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik,
VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1982.
- [76] "Kunststoffverbunde senken PKW-Gewicht",
VDI-Nachrichten Nr. 18 vom 30.04.82.
- [77] "Tech 1 von Opel: Gut in Form",
Autohaus 5/1982.
- [78] "Slippery Opel based on front-drive Kadett",
Automotive Engineering, January 1982.
- [79] "GM-Versuchslimousine Aero X",
Automobil Revue, Nr. 37 vom 3. 9. 1981.
- [80] O. v. Fersen:
"Eve nutzt Kraftstoff optimal ohne Schalten",
VDI-Nachrichten Nr. 45 / 5. November 1982.
- [81] "Renault baut Forschungsauto EVE",
Krafthand - Heft 5, März 1982.
- [82] "Neuer V.E.S.T.A. von Renault",
Renault Presse Aktuell, 10. 1982, Deutsche
Renault AG, Brühl.

- [83] "Automobilstudie TRX",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 83 (1981) 5.
- [84] "SVAR Alfa Romeo Synthesis Vehicle",
Ninth International Technical Conference on
Experimental Safety Vehicles, November 1982,
Kyoto, Japan.
- [85] E. Benzing:
"Zwei Experimentalfahrzeuge von Alfa Romeo",
Automobil Revue Nr. 48 vom 25. 11. 1982.
- [86] O. v. Fersen:
"Videokamera ersetzt Rückspiegel",
VDI Nachrichten, Nr. 46 / 12. 10. 1982.
- [87] J. Nitz, K.-R. Deutenbach, R. Poltrock:
"ARVW Konzept eines luftwiderstandsarmen Rekord-
fahrzeugs",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 84 (1982) 5.
- [88] "Probe III",
Ford-Werke AG, Köln, 1981.
- [89] "Ford probes aerodynamic limits",
Automotive Engineering, January 1982.
- [90] H.-R. Richarz:
"Das Sparmobil von Ford",
Auto Zeitung 12/81.
- [91] "Sparauto namens Viking",
Automobil Revue vom 6. 5. 82.
- [92] J. L. Vickers:
"Technical features of the Viking V Research
Vehicle",
SAE Technical Paper Series 810838, West Coast
International Meeting, Washington, August 1981.
- [93] S. A. Bruno, N. E. Hoxsie, W. Hrynyk:
"Western Michigan University Research Vehicle
Gamma",
SAE Technical Paper Series 810837, West Coast
International Meeting, Washington, August 1981.

- [94] N. Haug:
"Über kurz oder lang",
Auto, Motor und Sport, Heft 17, 24. August 1983.
- [95] A. Koewius:
"Aluminium in der Karosserie und Ausrüstung",
METALL, 35. Jahrgang, Heft 3, März 1981.
- [96] A. Kühnel:
"Der Fahrzeug-Fußgänger-Unfall und seine
Rekonstruktion",
Disseration 1980 an der Technischen Universität
Berlin, D 83.
- [97] H. Schmalz, H. Dürr:
"Verfahren zum Herstellung eines kratzfesten
Überzuges auf Kunststoffflächen",
Patentschrift DE 2113734 C 2 beim Deutschen
Patentamt, Veröffentlichungstag 1. 7.1982.
- [98] H. Appel, J. Blödorn:
"Vorrichtung zur Halterung einer Scheibe am
Rahmen eines Fahrzeuges, insbesondere einer
Frontscheibe an einem Personenkraftwagen",
Offenlegungsschrift DE 2944753 A1 beim Deutschen
Patentamt, Anmeldetag 02.11.79.
- [99] A. Kühnel, J. Blödorn, W. Wollert, H. Appel,
H. Rattaj, R. Pasch:
"Fußgänger- und Zweiradfahrerschutz am UNI-CAR",
BMFT, Entwicklungslinien für Kraftfahrzeuge und
Kraftstoffe, Forschungsbilanz 1982, Verlag TÜV
Rheinland GmbH.
- [100] G. Kraatz:
"Experimentelle Untersuchung der Kinematik und
der Belastungsverhältnisse bei motorisierten
Zweirad-Unfällen mit dem Forschungs-PKW UNI-CAR",
Diplomarbeit 7/82, Institut für Fahrzeugtechnik,
TU-Berlin.
- [101] F.-A. Winter:
"Experimentelle Untersuchung der Kinematik und
der Belastungsverhältnisse bei Fahrrad-Unfällen
mit dem Forschungs-PKW UNI-CAR",
Diplomarbeit 8/82, Institut für Fahrzeugtechnik,
TU-Berlin.

- [102] K. Seel, L. Klier, M. Potter:
"Glasfaserverstärkte RIM-Polyurethane",
Plastverarbeiter, 32. Jahrgang 1981, Nr. 10.
- [103] W. Falk, A. Krüger:
"Zur Problematik der Farbgebung von Kunststoff-
teilen im Fahrzeug-Innenraum",
Kunststoffe bei der Innenausstattung von Fahr-
zeugen, Jahrestagung VDI-Gesellschaft Kunst-
stofftechnik, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1979.
- [104] K. Lipinsky, A. Kühnel:
"Dynamische Prüfung von Prallkörpern aus
PUR-Integralschaum",
Forschungsbericht Nr. 232, Institut für Land-
verkehrsmittel der Technischen Universität
Berlin, Dezember 1977.
- [105] A. Kühnel, H. Appel, J. Blödorn, R. Pasch,
H. Rattaj, W. Wollert, H.P. Willumeit:
"Sicherheitsgewinn und Innenraum des UNI-CAR",
XIX. Intern. FISITA-Congress, 1982, Melbourne,
Australien.
- [106] B. Breuer:
"Der Forschungs-Personenwagen UNI-CAR",
XIX Intern. FISITA-Congress, 1982, Melbourne,
Australien.
- [107] G. Kraatz:
"Komponentenversuche für Fußgängerschutzelemente
am Forschungs-PKW",
Studienarbeit 5/81, Institut für Fahrzeugtechnik,
TU-Berlin.
- [108] H. Käufer:
"Arbeiten mit Kunststoffen",
Band 1, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin
Heidelberg New York 1978.
- [109] H. Hablitzel, K. Krüger:
"Anforderungen der Kraftfahrzeugindustrie an die
Aluminium-Werkstoffe",
Eine Mitteilung aus der PKW-Entwicklung der
Volkswagenwerk AG Wolfsburg, März 1976.

- [110] K. Schwenk, H. Hablitzel:
"Anforderungen der Kraftfahrzeugindustrie an die
Chemiewerkstoffe",
Mitteilung der Volkswagenwerk AG, Wolfsburg,
April 1973.
- [111] H. Käufer, B. Woite:
"Stoßgerechtes Konstruieren von Bauteilen aus
Thermoplasten am Beispiel von Karosserieteilen
mit integriertem Stoßfänger",
Konstruktion 34 (1982) H. 9, S. 353-360.
- [112] H. Morres:
"Berechnungsverfahren und Parameter-Einflüsse bei
der Ermittlung von Dummybelastungswerten",
Diplomarbeit Nr. 14/83 am Institut für Fahrzeug-
technik, TU Berlin, 1984.
- [113] H. Käufer:
"Kunststoffe als Werkstoff",
Vogel-Verlag, 1974, 87 Würzburg, Postfach 800.
- [114] H. Bott, H.-H. Braess u. a.:
"Forschungsprojekt Langzeitauto",
Forschungsbericht TV 7508, Bundesministerium für
Forschung und Technologie, Bonn, 1976.
- [115] C.-P. Elberth:
"Ist das Blech-Zeitalter vorbei?",
mot - Die Auto-Zeitschrift, Nr. 4/1981.
- [116] G. Walter:
"Kunststoffanwendungen bei funktionellen Teilen
in Mercedes-Benz-Fahrzeugen",
Grenzen der Kunststoffanwendung im Pkw-Bau in den
80er Jahren, Jahrestagung VDI-Gesellschaft Kunst-
stofftechnik, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1981.
- [117] H. Hablitzel, K.-D. Johnke:
"Die neuen Zwänge und die Alternative
Kunststoffe",
Kunststoffberater 4/80.

- [118] K.-D. Johnke, P. Behr:
"Kunststoffe im Automobilbau unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Aspekte",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift
82 (1980) 1 und 3.
- [119] R. Schiller, L. Trepte:
"Recycling im Automobilbau",
Nr. 10 der Schriftenreihe der Forschungsvereinigung Automobiltechnik eV (FAT), Frankfurt/M, 1979.
- [120] J. Fischer:
"Kunststoff als Alternative?",
Kfz-Betrieb, 12. Oktober 1981.
- [121] W. Trommer:
"Ausgesuchte Anwendungen für Kunststoffe im Automobilbau",
GAK, 1/1982 - Jahrgang 35.
- [122] E. Döring:
"Die "blechernen" Autositze gilt es noch zu erobern",
Kunststoff-Journal 10/82.
- [123] K. W. Fischer:
"Glasfaserverstärkte Polyamide im Fahrzeugbau",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 81 (1979) 3.
- [124] M. Osawa, M. Ide:
"Trends of Auto Materials in Japan",
International Policy Forum, Hakone Prince,
Hakone, Japan, 16 May - 20 May 1982.
- [125] H. Böhm:
"Einführung in die Metallkunde",
Bibliographisches Institut AG, Mannheim, 1968.
- [126] H. Borchers:
"Metallkunde",
Sammlung Götschen Band 432, De Gryther & Co., 1968.
- [127] R. Ohler, Ch. Straßburger:
"Stahlblech im Automobilbau",
Seminar für Kraftfahrzeugtechnik, Institut für
Fahrzeugtechnik, TU Berlin, 03.11.1980.

- [128] A. Fußgänger:
"Schmiede- und Gußteile im Fahrzeugbau im Vergleich",
VDI-Bericht Nr. 410, 1981, S. 51-58.
- [129] "Gießen hat Zukunft",
Technica, Basel, 29 (1980) 5, S. 361-363.
- [130] R. Gretsche, K. G. Schmitt-Thomas:
"Aluminiumverwendung im Automobilbau und Recycling",
Nr. 20 der Schriftenreihe der Forschungs-
vereinigung Automobiltechnik eV (FAT),
Frankfurt/M, 1982.
- [131] W. Domke:
"Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung",
Verlag Giradet, Essen 1969.
- [132] R. Gretsche:
"Aluminiumverwendung im Automobil und Recycling",
METALL, 36. Jahrgang, Heft 4 und 6,
April/Juni 1982.
- [133] A. Krauth:
"Keramische Bauteile für Otto- und Diesel-
motoren",
Entwicklungslinien für Kraftfahrzeuge und
Kraftstoffe, BMFT, Forschungsbilanz 1982, Verlag
TÜV Rheinland 1983.
- [134] R. Baun:
"Neue Werkstoffe im Motorenbau",
mot - Die Auto Zeitschrift, Nr. 15, 1983.
- [135] W. Beitz, K.-H. Küttner:
"Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau",
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York,
15. Auflage 1983.
- [136] "Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen im
Kfz-Bau",
MBB-WF-Information (79) 1.

- [137] K. Matthias:
"Experimentierfahrzeug mit tragender Bodengruppe
in Kernverbund-Bauweise aus Chemiewerkstoffen",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 85 (1983) 3.
- [138] B. Klein:
"Faserverstärkte Kunststoffe",
Ingenieur Digest, Heft 2, Feb. 1982, 21. Jahrgang.
- [139] P. Ventre, J. F. De Andria, J. C. Rullier:
"The Development of Weight-Reduced Vehicles
Perceived by Renault",
Society of Automotive Engineers, Nr. 800829, 1980.
- [140] H.-P. Bäuerle, W. Thull, U. E. Wezel:
"Leichtbau für Pkw-Karosserien",
wt, Zeitschrift für industrielle Fertigung
71 (1981) Nr. 7.
- [141] "Einsatzmöglichkeiten und Einsatzwahrscheinlich-
keit von faserverstärkten Kunststoffedern im
Fahrzeugbau",
Verband der Deutschen Federindustrie, Hagen,
Harbridge House Europe, Kronberg/Ts, Oktober 1981.
- [142] "A Contigent Forecast of Plastics Substitution",
Philip Townsend Associates Inc., 1982.
- [143] P. Mast:
"Das SAVE-Rettungssystem, Lösungsansätze für den
Einsatz von Kunststoffen im Nutzfahrzeug",
Kunststoffe im Automobilbau, VDI-Verlag GmbH,
Düsseldorf 1983.
- [144] R. Fernengel:
"Spritzgegossene Frontspoiler bei BMW",
Kunststoffe im Automobilbau, VDI-Verlag GmbH,
Düsseldorf 1983.
- [145] W. Barthel:
"Plasteinsatz im Fahrzeugbau",
Kraftfahrzeugtechnik 5/80.
- [146] H.-G. Haldenwanger:
"Energiesparen durch Kunststoff im Kfz",
Kunststoffberater 26 (1981) 12.

- [147] H. Bott:
 "Tendenzen in der Materialauswahl für Pkw aus der Sicht der Sportwagenentwicklung",
 Stahl und Eisen 101 (81) 10.
- [148] W. Hufnagel, A. Koewius:
 "Aluminiumwerkstoffe für den Automobilbau",
 Automobil-Industrie, Vogel-Verlag Würzburg,
 24. Jahrgang, Heft 3 / September 1979.
- [149] "Studienprojekt Porsche Aluminium-Karosserie",
 Schweizerische Aluminium AG, Zürich, Ausgabe
 1/9/1981 ku.
- [150] K.-G. Reinhardt:
 "Zur Entwicklung und anwendungstechnischen
 Erprobung der Punktschweißklebstoffe "Fimoweld"
 und "ZIS 452",
 Plaste und Kautschuk, 17. Jg., Heft 3/1970.
- [151] H. E. Burst, H.-P. Bäuerle, W. F. Thull:
 "The All-Aluminium Auto Body - A Study Based on
 the Porsche 928",
 SAE Technical Paper Series 830094, 1983.
- [152] U. Steuer, H. P. Bäuerle, W. Kling,
 K. H. Lüpfert:
 "Erfahrungen mit den Aluminiumbauteilen des
 Porsche 928",
 Aluminium und Automobil, Internationales Symposi-
 um Düsseldorf 1980; VDI-Bericht Nr. 372, 1980.
- [153] A. Koewius:
 "Analyse des Einflusses einer substituierenden
 Verwendung von Aluminium auf die Energiebilanz
 bei Landfahrzeugen",
 Dissertation an der Fakultät für Maschinenwesen
 der Universität Hannover, 1983.
- [154] E. Bauer:
 "Alles dran und drin",
 ACE Lenkrad 7/1984.
- [155] K.-H. Baldeau, F.-J. Floßdorf:
 "Wettbewerb von Stahl und Aluminium im Auto-
 mobilbau",
 Stahl und Eisen 101 (81) 4.

- [156] "Materials Decisions Based On Economics And Energy",
Automotive Engineering, July 82.
- [157] S. Tyschkus:
"Forschung und Entwicklung - Neue Methoden im Automobilbau",
Technik heute 8-81.
- [158] H. Domininghaus:
"Die Kunststoffe - unentbehrliche Alternativwerkstoffe für das Automobil der kommenden Jahre",
Plastverarbeiter Nr. 12, 1980 und Nr. 1, 1981.
- [159] R. Bald, G. Heese, H. Goldbach:
"Wie wird ein großflächiges Karosserieteil aus Kunststoff steif?",
Konstruktion und Design, Dezember 80.
- [160] R. Bald, G. Heese, H. Goldbach:
"Steifigkeitsprobleme bei großflächigen Karosserieteilen aus Chemiewerkstoffen",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 83 (1981) 3.
- [161] "Der Wettbewerb von Stahl und Kunststoff im Automobilbau",
Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf,
Rundschreiben VB 63/Stb 63 vom 26.5.1981.
- [162] "Auto Katalog 1983",
Vereinigte Motor-Verlage GmbH, Stuttgart, 1983.
- [163] R. Riess:
"Modifizierte Thermoplaste - PA, PBTP, PC - für Außenanwendungen am Kraftfahrzeug",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 85 (1983) 3.
- [164] "Zähigkeitsmessungen an olefinischen Thermoplasten für die Anwendung im Automobilbau",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 82 (1980) 3.
- [165] E. Hellriegel:
"Werkstoffgerechtes Konstruieren",
Seminar für Kraftfahrzeugtechnik, Institut für Fahrzeugtechnik, TU Berlin, 17.11.1980.

- [166] H. H. Atzorn, J. Wiedemann:
"Analyse von Leichtbautechnologien des Flugzeugbaus auf ihre Anwendbarkeit im Automobilbau", Studie im Auftrag der Daimler-Benz AG, Technischen Universität Berlin, Institut für Luft- und Raumfahrt, September 1984.
- [167] A. Sternfield:
"More new ways to use plastics for auto parts", Modern Plastics International, 11 (1981) 7.
- [168] Ch. Betzhold, H. Gahlau:
"Leise Fahrzeuge trotz Leichtbau", Schweizer Aluminium Rundschau, Heft 5/1980.
- [169] H. P. Falkenstein:
"Technologische Eigenschaften neuerer Aluminium-Karosserieblechwerkstoffe", VDI-Bericht Nr. 372, 1980.
- [170] A. Koewius:
"2. Internationales Symposium Aluminium + Automobil", METALL, 35. Jahrgang, Heft 2, 1981.
- [171] D. Anselm, M. Danner:
"Auswirkungen der Reparaturforschung auf die Gestaltung neuer Kraftfahrzeugmodelle", Der Maschinenschaden 54 (1981) Heft 2.
- [172] J. A. DiCello, R. A. George:
"Design Criteria for Dent Resistance of Auto Body Panels", Automotive Engineering Congress, Detroit, 1974, SAE 740081.
- [173] M. Grahle:
"Zur Frage des Schweißens bei der Fertigung von Kraftfahrzeugen aus feuerverzinktem Stahlblech", Schweißen und Schneiden 28 (1976) 9.
- [174] J. A. Mock:
"One-side galvanized steel: hot dipped vs electrolytic", Materials Engineering, 87 (1978) 3.

- [175] J. Hennig:
"Kratzfest beschichtete transparente Kunststoffe",
Kunststoffe 71 (1981) 2.
- [176] R. Röpke:
"Scheinwerfer-Streuscheiben aus Kunststoff",
Kunststoffe für Außenteile im Automobilbau,
Jahrestagung VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik,
VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1980.
- [177] "6. VDI-Kunststofftagung: Kunststoffe im
Personenwagen- und Nutzfahrzeugbau",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift
84 (1982) 7/8.
- [178] R. Liebler:
"Kratzfestbeschichtung von Fertigteilen",
Röhm-Spektrum, Januar 1984.
- [179] K. Herbst, K. Modricker, A. Lüders:
"Einfluß der Werkstoffgüte auf das Lebensdauer-
verhalten von Radscheiben",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 84 (1982) 1.
- [180] A. Wimmer:
"Einfluß von Aluminiumblechrädern auf die
Eigenschaften von Personenkraftwagen",
Aluminum, 57. Jahrgang, 1981, 5.
- [181] "Aluminium intern",
Beratungs- und Informationsdienst der
Aluminium-Industrie, Nr. 3, September 1981,
Aluminium-Verlag GmbH.
- [182] E. Reimertz:
"Framhjulsdriven snaljap",
Göteborgs Posten, 17.06.1983.
- [183] L. Schilling:
"Der Volvo von morgen - mit Margarine im Tank",
WELT am SONNTAG, Nr. 46 vom 13.11.83.
- [184] C.-P. Elberth:
"Der modernste Diesel?",
mot - Die Auto-Zeitschrift 14/83.

- [185] H. J. Köhnert:
"Weitere Nichteisenwerkstoffe für Kolben?",
Firmenschrift Mahle GmbH Stuttgart.
- [186] J. Maxwell:
"Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Thermoplaste
für die Automobilindustrie",
Referat auf der SITEV 1981, Genf.
- [187] R. Golding, D. Ward:
"American who thinks the plastic engine will go a
long way",
Engineer, London, 253 (1981) 6542/3.
- [188] A. F. Schmidt:
"Verbrennungskraftmaschinen",
Springer-Verlag Berlin/Heidelberg/New York, 1967.
- [189] O. v. Fersen, C.-P. Elberth:
"Der Kunststoffmotor",
mot - Die Auto-Zeitschrift 16/80.
- [190] H. W. Immerheiser:
"Der Kunststoff-Motor - Problemlöser der
Zukunft?",
Der Konstrukteur, Nr. 9, 1983.
- [191] P. Walzer:
"Entwicklungstrends beim Pkw, Ergebnisse der
VW-Forschung",
Seminar für Kraftfahrzeugtechnik, Institut für
Fahrzeugtechnik, Technische Universität Berlin,
31.1.83.
- [192] R. Rocchio:
"Konstruktion und Erprobung keramischer Bauteile
für Pkw-Motoren",
Entwicklungslinien für Kraftfahrzeuge und Kraft-
stoffe, BMFT, Forschungsbilanz 1982, Verlag TÜV
Rheinland 1983.
- [193] N. Zernig:
"Konstruktion und Erprobung keramischer Bauteile
für luftgekühlte Lkw-Motoren",
Entwicklungslinien für Kraftfahrzeuge und Kraft-
stoffe, BMFT, Forschungsbilanz 1982, Verlag TÜV
Rheinland 1983.

- [194] J. L. Mason, A. F. McLean:
"Ceramics For Gas Turbine Engines",
National Science Foundation Workshop,
Washington, DC, June 27-28, 1983.
- [195] R. A. Rackley, J. R. Kidwell:
"The AGT101 Advanced Automotive Gas Turbine",
82-GT-72, The American Society of Mechanical
Engineers, New York.
- [196] J. Kruse:
"Neue Autos wirklich leichter?",
mot - Die Auto Zeitschrift, Nr. 22/1979.
- [197] O. v. Fersen:
"Können Kunststoffe Metalle ersetzen?",
mot - Die Auto-Zeitschrift, Nr. 8/1979.
- [198] K.-B. Motte:
"Kunststoffanwendungen bei Automobilen von
General Motors",
Kunststoffe im Pkw- und Nutzfahrzeugbau,
VDI-Jahrestagung, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf,
1982; *Plastverarbeiter*, 33. Jg. 1982, Nr. 5.
- [199] E. Burling:
"Eine neue Generation weicher, formbarer
Materialien für Innenverkleidungen",
Referat auf der SITEV 1981, Genf.
- [200] H. Hablitzel:
"Das Skelett zum Leben erwecken",
Kunststoff-Journal 10/82.
- [201] M. B. Bever:
"The Impact of Materials and Design Changes on
the Recycling of Automobiles",
MATERIALS AND SOCIETY, Vol. 4, No. 3, 1980.
- [202] "Plastics and paints for vehicle bodies",
Automotive Engineer, February/March 1982.
- [203] W. Heck:
"Erfahrungen mit Fertighimmeln bei Porsche",
Kunststoffe bei der Innenausstattung von Fahr-
zeugen, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1979.

- [204] E. Hellriegel:
"Seiten- und Innenverkleidung",
Kunststoffe bei der Innenausstattung von Fahr-
zeugen, Jahrestagung der VDI-Gesellschaft Kunst-
stofftechnik, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1979.
- [205] W. Behrens:
"Werkstoffe für die Lenkradummantelung",
Kunststoffe bei der Innenausstattung von Fahr-
zeugen, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1979.
- [206] D. F. Gentle:
"Herstellen großflächiger Formteile aus Thermo-
plasten",
Kunststoffe im Automobilbau, Jahrestagung der
VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, VDI-Verlag
GmbH Düsseldorf, 1983.
- [207] "Bayer im Auto 2000",
Presse-Information der Bayer AG, Leverkusen, 1981.
- [208] J. Breitenbach:
"Produkt- und Verfahrensoptimierung für selbst-
tragende Sitzkonstruktionen",
Industrie Anzeiger, Nr. 64 v. 7.8.1981 / 103. Jg.
- [209] G.-A. Horsfall:
"Abbau von Polyester, Nylon 66 und Nylon 6 durch
Tageslicht",
Referat auf der SITEV 1981, Genf.
- [210] G. Hartwich:
"Neuzeitliche Produktionsanlagen in der Auto-
mobilindustrie",
Produktionstechnisches Kolloquium; IWF,
TU Berlin, Juni 1979.
- [211] "Aufteilung des Fahrzeuggewichtes",
ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 83 (1981) 6.
- [212] H. Appel, K. P. Hilber (Herausgeber):
"Product and Production Technology of Future
Automobiles",
Technische Universität Berlin, Massachusetts
Institute of Technology, Reports on Cooperative
Research No. 6, Berlin 1984.

- [213] D. J. Inman:
"Ausblick auf die Entwicklung des Verbrauchs und der Kosten von Energie und Kunststoffen",
Vortrag auf der SITEV, Genf, 13.05.1981.
- [214] U. Seiffert:
"Material-Trends im zukünftigen Automobilbau",
Stahl und Eisen 101 (1981), Heft 15/81.
- [215] W. F. Madden:
"Der europäische Kunststoffmarkt in den achtziger Jahren",
Kunststoffe 72 (1982) 4, Carl Hanser Verlag,
München.
- [216] "Five-year forecast of reinforced plastic composites",
Automotive News Detroit Extra, September 6, 1982.
- [217] M. R.-G. Teinturier:
"L'évolution du coût des matières plastiques",
Ing. de l'Automobiles, 1981/9.
- [218] "1981 General Motors Public Interest Report",
General Motors Corporation.
- [219] K.-D. Johnke, P. Behr:
"HDPE-Kraftstoffbehälter (KKB) im Automobilbau",
Plastverarbeiter, Nr. 5, 1982; Kunststoffberater
12/1982; Kunststoffztg., VDI-Verlag GmbH
Düsseldorf, 1982.
- [220] "Entwicklungstrends in der Automobilindustrie",
VDA-Telegramm Nr. 42 vom 25.10.82, Verband der
Automobilindustrie e. V., Frankfurt/M.
- [221] J. Fischer:
"Zweigleisige Entwicklung im Fahrzeugbau",
VDI-Nachrichten Nr. 18 / 30. April 1982.
- [222] H. Hablitzel:
"Plastic Developments for European Passenger Car
Production in Changing Times",
SAE Technical Paper Series, Nr. 820799.

- [223] U. Schurr, W. Grolik:
"Fortschritte bei der Anwendung von verstärktem Polypropylen im Kfz-Innenraum",
Kunststoffe, 72. Jahrgang 1982, Heft 4.
- [224] H. G. Ring:
"Stoßfänger und Karosserieaußenteile aus Polyurethan",
Kunststoffe im PKW-Bau, Jahrestagung der VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1977.
- [225] H. Hablitzel, K.-D. Johnke:
"Die neuen Zwänge und die Alternative Kunststoff",
Kunststoffe für Außenteile im Automobilbau, Jahrestagung der VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1980.
- [226] N. Bertone:
"Aussichten für die Außenanwendung von Kunststoffen am Fahrzeug",
Kunststoffe für Außenteile im Automobilbau, Jahrestagung VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1980.
- [227] J. Schöttner:
"Ökonomische und soziale Konsequenzen des sog. Langzeitautos",
Schriftenreihe des Verbandes der Automobilindustrie e. V. (VDA), Nr. 40, 1982.
- [228] J.-L. Mazodier, N. Huret:
"Les nouvelles données économiques de la compétitivité de l'aluminium dans la construction automobile",
Revue de l'Aluminium, Juni 1980.
- [229] "Ford Energy Report",
Int. J. of Vehicle Design, Special Publication SP1, 1982, UK.
- [230] A. v. Seidel:
"GFK - Leichtbauwerkstoff für den Automobilbau",
GFK im Fahrzeugbau, Jahrestagung VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1978.

- [231] H. Fleckenstein:
 "Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für ein Standard-
 produkt aus Faserverbundwerkstoff im Vergleich zu
 Stahl",
 VDI-Z 125 (1983) Nr. 4 - Februar (II).
- [232] "Wie funktioniert das? Die Technik im Leben von
 heute",
 Bibliographisches Institut Mannheim/Wien/Zürich,
 Meyers Lexikonverlag, ISBN 3-411-01732-5, 1978.
- [233] W.-C. Weltman jr.:
 "Verwendung von Aluminium-Karosserieblech im
 amerikanische PKW",
 Aluminium und Automobil, Internationales
 Symposium Düsseldorf, 3. - 4.12.1980.
- [234] F.-R. Hoch:
 "Verfahren und Bedingungen für das Fügen von
 Aluminium-Karosserieblechlegierungen",
 Mitteilungen aus dem Alcoa Technical Center,
 Aluminium, 54. Jg., 1978.12.
- [235] F.-L. Siever:
 "Wirtschaftliches und umweltfreundliches
 Applizieren im Lackierbetrieb",
 Referat auf der Fachpresse-Konferenz der Herberts
 GmbH, Wuppertal, am 25.10.1982.
- [236] H. Käufer:
 "Gezielte Gestaltung des Fügebereichs und seine
 Einbeziehung in die Gesamtkonstruktion",
 Vortrag anlässlich der Tagung "Fertigungssystem
 Kleben" an der TU Berlin, 1984.
- [237] K.-G. Reinhardt:
 "Zur Entwicklung und anwendungstechnischen
 Erprobung der Punktschweißklebstoffe "Fimoweld"
 und "ZIS 452"",
 Plaste und Kautschuk, 17. Jahrgang, Heft 3/1970.
- [238] F. Eichhorn, H. Stepanski:
 "Festigkeits- und Alterungseigenschaften von
 Punktschweißklebverbindungen an Karosserieblechen
 aus Aluminium",
 Bänder Bleche Rohre 2-1980.

- [239] J. Ritz:
"Umweltfreundliche Lackprodukte - Beispiele und Probleme",
Herberts GmbH, Wuppertal, Pressekonferenz 1982.
- [240] H. Ritter:
"Rationalisierung der Betriebsabläufe und Umweltschutz bei Herberts Hand in Hand",
Herberts GmbH, Wuppertal, Pressekonferenz 1982.
- [241] G. Ehnert:
"Automobilstoßfänger aus hochfesten Polyester-Harzmatten",
Menzolit-Werke, Kraichtal-Menzingen, 1980.
- [242] "Vetrotex und die Automobilindustrie",
Firmenschrift der Gevetex Textilglas-GmbH, Aachen.
- [243] W. Schönthaler:
"Einführung in das Gebiet der härtbaren Formmassen, ihre Eigenschaften, Einsatzgebiete und Verarbeitung",
Bakelite GmbH, Lemathe, Sonderdruck 1979.
- [244] J. J. Lanfranchini:
"Erfahrungen beim Herstellen der Heckklappe des CITROËN BX aus ZMC",
Kunststoffe im Automobilbau, VDI-Jahrestagung, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1983.
- [245] J. Maxwell:
"Glasfaserverstärkte Thermoplaste für die Automobil-Industrie",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 81 (1979) 10.
- [246] Ch. Voy:
"Die Darstellung einer GFK-Fahrzeugachse als großserienorientierter Optimierungsprozeß",
Kunststoffe im Automobilbau, VDI-Jahrestagung, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1983.
- [247] "V. VDI-Kunststofftagung: Grenzen der Kunststoffanwendung im Personenwagen",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 83 (1981) 11.
- [248] "Trend zum Kunststoff im Auto wächst",
Industrie Anzeiger, Nr. 87 v. 29.10.1980.

- [249] P. Beardmore, J. J. Harwood, K. R. Kinsman,
R. E. Robertson:
"Fiber-Reinforced Composites: Engineering
Structural Materials",
Science, Vol. 208, 23. May 1980.
- [250] D. Schulz:
"Airbus-Seitenruder in Faserverbundwerkstoff",
Grenzen der Kunststoffanwendung im Pkw-Bau in den
80er Jahren, VDI-Jahrestagung der Automobilbauer
25. und 26. März 1981, Mannheim.
- [251] F. J. Bollig, K. H. Decker:
"Duroplastische Formmassen",
Kunststoffe, Heft 10/1980, Carl Hanser Verlag,
München.
- [252] K. G. Grunert:
"Die Ermittlung entscheidungsrelevanter
Produktmerkmale beim Automobilkauf",
Schriftenreihe des Verbandes der Automobil-
industrie e. V. (VDA), Nr. 40, 1982.
- [253] U. Schnell:
"Die internationale Wettbewerbsfähigkeit der
deutschen Automobilindustrie auf dem Pkw-Sektor",
Gesellschaft für wirtschafts- und verkehrs-
wissenschaftliche Forschung e. V., Bonn 1981.
- [254] L. Boschen:
"Leichte leben länger",
Auto Zeitung, 23/82.
- [255] "Autokarosserien: Leichtbauwerkstoffe auf dem
Vormarsch",
Konstruktion & Design, Juli/August 1979.
- [256] H. Hablitzel:
"Kunststoffe im Fahrzeugbau",
Kunststoffe 72 (1982) 10.
- [257] "Do lightweight materials really save energy?",
Automotive Engineering, March 1982, Volume 90,
Number 3.

- [258] H. Hablitzel:
 "Reinforced Polyester in the European Automotive Industry",
 Society of Automotive Engineers, Nr. 790169, 1980.
- [259] D. Brose:
 "Wirtschaftlichkeit einiger Verfahren für die Wiederverwendung von Kunststoffen",
 Kunststoffe im PKW-Bau, VDI-Jahrestagung, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1977.
- [260] B. v. Rotberg, D. Lenk:
 "Stoß- und Pufferfänger für den PORSCHE 924",
 GPK im Fahrzeugbau, VDI-Jahrestagung, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1978.
- [261] B. Ostmann:
 "Kinderleicht",
 Auto, Motor und Sport, Nr. 2 / 1982.
- [262] L. Hamm:
 "Praxis und Auswirkungen des Aluminium-Recyclings im Pkw-Bau",
 Aluminium, 56. Jg., 1980.12.
- [263] K.-D. Johnke:
 "Glasfaserverstärkte Kunststoffe (UP-GF) im Automobilbau - Anforderungen und Anwendungsbeispiele",
 Grenzen der Kunststoffanwendung im Pkw-Bau in den 80er Jahren, Jahrestagung VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1981.
- [264]* K.-H. Radermacher:
 "Ein Einheits-Spar-Auto?",
 Automobil Revue, 76. Jahrgang, Nr. 45, 29.10.81.
- [265] J. Wehrmeister:
 "FEE Fahrzeugtechnik EWG/ECE, Loseblatt Texte Kommentare",
 Kirschbaum-Verlag, Bonn, Stand 1983,
 ISBN 3 7812 1115 0.
- [266] K. Blümel, W. Müschenborn:
 "Höherer Energieverzehr durch Verwendung hochfester Feinbleche im Fahrzeugbau",
 Thyssen Technische Berichte, Heft 2/80.

- [267] U. Bez, M. Rauser:
 "Specific Energy Absorption and Vehicle Weight",
 VIIIth International Technical Conference on
 Experimental Safety Vehicles, Wolfsburg,
 21. - 24.10.1980.
- [268] "Autotüren aus Maisstengeln?",
 Plastverarbeiter, 33. Jg., 1982, Nr. 3.
- [269] L. Boschen:
 "Doppelt hält länger",
 Autozeitung 4/83.
- [270] R. Gretsch:
 "Rückführung und Substitution von Kupfer im
 Kraftfahrzeugbereich",
 Nr. 11 der Schriftenreihe der Forschungs-
 vereinigung Automobiltechnik eV (FAT),
 Frankfurt/M, 1979.
- [271] Kh. G. Schmitt-Thomas, G. Johner, R. Weber:
 "Optimierung des Aluminiumeinsatzes im Kraft-
 fahrzeug zum Leichtbau und Recycling",
 METALL, 35. Jahrgang, Heft 8, August 1981.
- [272] J. J. Harwood:
 "Automakers Lighten the Load",
 Technology Review, July 1981.
- [273] H. Sinn, W. Kaminsky, J. Janning:
 "Aufarbeitung von Altreifen und Gummi",
 Kautschuk + Gummi, Kunststoffe, 32. Jahrgang,
 Nr. 1/1979.
- [274] "Altreifen-Gummiaufbereitung in Kall",
 ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 84 (1982) 12.
- [275] H. Emminger, J. Siebenlist:
 "Pyrolyse steigert das Recycling",
 VDI-Nachrichten vom 30.7.1982.
- [276] W. Beitz, U. Hove, M. Pourshirazi:
 "Altteilverwendung im Automobilbau",
 Nr. 24 der Schriftenreihe der Forschungs-
 vereinigung Automobiltechnik eV (FAT),
 Frankfurt/M, 1982.

- [277] R. Zellner, H. G. Wagner:
"Über die Geschwindigkeit des reaktiven Abbaus industrieller Emissionen in der Atmosphäre",
Chemische Rundschau, 32 (1979) 24.
- [278] B. Kreuzer, V. Möcker, E. Rekitte,
K. G. Tempel:
"Was Sie schon immer über Umweltschutz wissen wollten",
Bundesministerium des Innern, Verlag W. Kohlhammer GmbH, ISBN 3-17-007259-5, 1981.
- [279] H. Becher, E. Düsing:
"Industrieroboter in der Fahrzeugherstellung",
Elektrotechnische Zeitung, ETZ, 102 (1981) 23.
- [280] U. Rembold, Ch. Blume, R. Dillmann, G. Mörtel:
"Technische Anforderungen an zukünftige Montage-roboter",
VDI-Z 123 (1981) Nr. 18.
- [281] H. Appel, K.-P. Hilber:
"Likely Trends for Passenger Cars and its Production - A German Perspective - ",
International Policy Forum Stenungsbaden,
Stenungsund, Sweden, 13. June - 18. June 1983.
- [282] "Auto 82/83",
Jahresbericht Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA), Frankfurt/M 1983.
- [283] J. Haeusler:
"Arbeitslärm ist meist Prozeßlärm",
Umwelt, (1979) 3.
- [284] "8. Internationales Symposium über Industrie-roboter",
WT-Werkstatttechnik, 68 (1978) 17.
- [285] P. Nicolaisen:
"Probleme der Arbeitssicherheit beim Einsatz von Industrierobotern",
WT-Werkstatttechnik, 70 (1980) 1.

- [286] G. Kühnen, W. Pfeiffer:
"Schadstoffkonzentrationen im Atembereich von
Schweißern",
Staub - Reinhaltung der Luft, 42 (1982) 3.
- [287] P. Nicolaisen:
"Auswirkungen steigender Automatisierung auf die
Arbeitssicherheit - Beispiel Industrieroboter",
Fördern und Heben, 27 (1977) 7.
- [288] H. J. Preis:
"Arbeitssicherheit beim Einsatz von Montage- und
Handhabungsgeräten (Industrieroboter)",
VDI-Berichte, Nr. 323, 1978.
- [289] H. Kettner:
"Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen 1978 in der
Sowjetunion",
Staub - Reinhaltung der Luft, 39 (1979) 1.
- [290] "Gesundheitsgefährdungen beim Schweißen",
Schweißtechnik, 29 (1979) 12.
- [291] A. Koewius:
"Zum Stand der Aluminiumanwendung im Automobil
vor dem Hintergrund der Kraftstoff-Verbrauchs-
senkung am Beispiel der USA",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift Nr. 11/1980
und 12/81.
- [292] W. C. Patterson:
"Technological Trends in the Automobile Industry
and Their Impact on Aluminium Usage",
Technological Forecasting And Social Change 18,
205-216 (1980) / Nr. 3.
- [293] J. Bandel, E. Plassmann:
"Mobilität und Individualverkehr in den Neunziger
Jahren",
XIX International FISITA Congress, Melbourne,
Australia, November 8-12, 1982.
- [294] G. Kortzfleisch:
"Projektionen technologischer und ökonomischer
Entwicklungen im Automobilbau",
Schmiertechnik und Tribologie, 26. Jg., 6/1979.

- [295] H. K. Schneider:
"Weltwirtschaft, Energie und Verkehr",
Entwicklungslinien für Kraftfahrzeuge und
Kraftstoffe, Der Bundesminister für Forschung und
Technologie, Forschungsbilanz 1982, Verlag TÜV
Rheinland 1983.
- [296] U. Seiffert:
"Künftige Kriterien für die Auslegung von
Fahrzeugen und ihren Antrieben",
VDI-Berichte, Nr. 466, 1983.
- [297] U. Seiffert, P. Walzer:
"Development trends for future passenger cars",
Int. J. of Vehicle Design, Vol. 3, No. 1, 1982,
UK.
- [298] J. A. Oldfield:
"Energy related to vehicle design",
Int. J. of Vehicle Design, Vol. 3, No. 2, 1982,
UK.
- [299] W. Lincke:
"Das Automobil in den nächsten beiden Jahr-
zehnten",
Umschau 81 (1981), Heft 13.
- [300] R. Linde, H.-J. Vorholz, G. Weich:
"Straßenverkehr 2000",
Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e. V.,
München 1979.
- [301] B. Grunau:
"Aral-Prognose '79",
Aral AG, Bochum.
- [302] "Rosa Zeiten für die Branche",
ACE-Lenkrad, Oktober 1983.
- [303] "Shell-Prognose des PKW-Bestandes bis zum Jahr
2000",
Aktuelle Wirtschaftsanalysen, Deutsche Shell
Aktiengesellschaft, September 1983.

- [304] R. Wiegert:
"Langfristige Prognoseverfahren",
Schriftenreihe des Verbandes der Automobil-
industrie e. V. (VDA), Nr. 20, 1974.
- [305]* "U.S. Automotive Industry in the 1980s - A
Domestic and Worldwide Perspective",
Arthur Andersen & Co, The University of Michigan,
Juli 1981.
- [306] E. Motschall, N. Jaeschke:
"Chemiewerkstoffe für die Automobilindustrie",
Autohaus, 6/1981.
- [307] G. Gintrand:
"Zwei Jahrzehnte Glasfaser-Verbundwerkstoffe",
Vetrotex-Textilglas-Report 2/82, 14. Jahrgang.
- [308] H. Rühmann:
"20 Jahre Anwendung von GFK im Spiegel der
Statistik",
Firmenschrift Gevetex Textilglas GmbH, Aachen,
10/81.
- [309] W. Falk:
"Erfahrungen und Probleme bei der Serienfertigung
des C-Säulenlüftungsgrills, Typ Taunus",
GFK im Fahrzeugbau, VDI-Jahrestagung, VDI-Verlag
GmbH Düsseldorf, 1978.
- [310] H. Rühmann:
"Der GFK-Markt in der Bundesrepublik Deutschland
und Europa - Ist-Zustand und Prognosemöglich-
keiten",
Vetrotex-Textilglas-Report 3/1982, 14. Jahrgang.
- [311] U. Seiffert:
"Kunststoffanwendungen beim Forschungskonzept
Volkswagen-Auto 2000",
Kunststoffe im Pkw- und Nutzfahrzeugbau,
Jahrestagung VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik,
VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1982.
- [312] H. H. Braess:
"Zahlen und Fakten zum Fortschritt im Pkw-Bau",
Entwicklungslinien für Kraftfahrzeuge und
Kraftstoffe, BMPT, Forschungsbilanz 1982, Verlag
TÜV Rheinland 1983.

- [313] "Der Automobilbau der 80er Jahre... mit technischen Kunststoffen von DuPont", Firmenschrift der DuPont de Nemours International S. A., Genf, 12.81.
- [314] R. Schaefer, M. Grahle:
"Forschungsprojekt "Langzeitauto" - Zielsetzungen und Anforderungen an die Schweißtechnik",
Schweißen und Schneiden, Jahrgang 27 (1975), Heft 8.
- [315] Delphi-Forschung "Kraftfahrtechnik 2000", Dokumentation Kraftfahrwesen, Bietigheim-Bissingen, 1983.
- [316]* "Technological Trends in the 1980s for the Automotive Industry,"
McKinsey and Company, München 1983.
- [317] H. Appel, K. P. Hilber:
"Design and Technology for Future Competition - A Trilateral Comparative Study",
International Policy Forum, Stenungsbaden, Stenungsund, Sweden, June 13 - June 18, 1983.
- [318] K. P. Hilber, C. Jeschke:
"Wechselwirkungen zwischen Gestaltung und Nutzung von Automobilen",
Unveröffentlichtes Manuskript, Technische Universität Berlin, IFT, 1984.
- [319] B. Breuer:
"Vom Konzept zum Prototyp des UNI-CAR",
Entwicklungslinien für Kraftfahrzeuge und Kraftstoffe, BMFT/DGMK/VDI, Berlin 1983.
- [320] H. Appel, J. Blödorn, A. Kühnel, R. Pasch, H. Rattaj:
"Exterior Safety and Side Protection with the UNI-CAR",
Ninth Intern. ESV Conference, 1982, Kyoto, Japan.

- [321] R. Pasch, A. Kühnel, W. Wollert, J. Blödorn,
H. Rattaj, H. Appel:
"Structural rigidity and occupant loading in the
case of the side collision",
VIIth. International IRCOBI Conference on the
Biomechanics of Impacts, Köln 1982.
- [322] G. Perini:
"Details Surrounding the Development of the
UNI-CAR",
Car Styling, Nr. 38, 1982, Hokuto Tsusho, Inc.,
Japan.
- [323] J. Potthoff:
"Das aerodynamische Konzept des Forschungs-Pkw
UNI-CAR",
Symposium Fahrzeug-Aerodynamik 1982 Wolfsburg,
Paper I/7.
- [324] L. Meyer, Ch. Straßburger:
"Kaltumformbarkeit und Schweißverhalten von
oberflächenveredeltem Feinblech für die Auto-
mobilindustrie",
Thyssen Technische Berichte, Heft 2/79.
- [325]* H.-H. Braess:
"Langzeitauto",
Bild der Wissenschaft, DVA, Stuttgart, 3/1978.
- [326] H. Braun, F. Mahnig:
"Gegossene Achsteile - wirtschaftlich und
betriebssicher",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 81 (1979) 2.
- [327] E. Eckermann:
"Vom Dampfwagen zum Auto",
Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH, 1981,
980-ISBN 3 499 17707 2.
- [328] H. P. Freers:
"What Will Happen To The Automobile And The
Automotive Industry Between Now And 1990?",
The U.S. in the International Automotive Future,
Society of Automotive Engineers, Inc., P-118,
1983.

- [329] E. Görl, B. Meuthen:
"Elektrolytisch verzinktes Feinblech für den
Automobilbau",
Stahl und Eisen, 103 (1983), Nr. 17.
- [330] H. Hablitzel:
"Schema der Entwicklung eines Kunststoffteiles",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 83 (1981) 3.
- [331] R. Harlfinger:
"Vorbeschichtetes Feinblech für den Auto-
mobilbau",
Stahl und Eisen, 103 (1983), Nr. 17.
- [332] E. Hellriegel:
"Zier- und Schutzleisten, Zierstreifen",
Kunststoffe für Außenteile im Automobilbau,
Jahrestagung VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik,
VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1980.
- [333] W. Meyerhöfer:
"Der Markt für Kraftfahrzeugteile",
ifo-schnelldienst 1-2/82, IFO-Institut für
Wirtschaftsforschung München.
- [334] M. Motobayashi:
"Materialfluß-Begleitkarten zur Produktions-
steuerung",
Werkstatt und Betrieb 115 (1982) 2.
- [335] A. Muraoka:
"Nissan's Perspective on Automotive Technology",
The U.S. in the International Automotive Future,
Society of Automotive Engineers, P-118, 1983.
- [336] "Kunststoffmotor im Renntest",
Auto Zeitung 7/82.
- [337]* "How Much Energy to Produce Reinforced Plastic
Parts?",
Automotive Engineer, 2.2.1975.
- [338] "Designing the energy-efficient world car...
with DuPont Engineering Plastics",
Firmenschrift der E. I. duPont de Nemours & Co.,
Wilmington, Delaware.

- [339] "Motor Vehicle Goals Beyond 1980",
The Report by the Federal Task Force on Motor
Vehicle Goals Beyond 1980, Volume 1, Executive
Summary, 1976, US Department of Transportation.
- [340] "Nettoenergieersparnis - die Wirtschaftlichkeit
von Magnesium in Automobilen",
METALL, 36. Jahrgang, Heft 9, September 1982.
- [341] "Kunststoffe umwerben das Automobil",
VDI-Nachrichten, Nr. 9 / 27. Februar 1981.
- [342] "Hektik in der Giftküche",
Wirtschaftswoche Nr. 1/2 vom 6.1.1984.
- [343]* K.-H. Radermacher:
"Kunststoffe im Automobilbau",
Kunststoffe, 70. Jahrgang, 1980/7.
- [344] D. Schauwinhold:
"Herstellung und Verwendung von feuerverzinktem
und aluminisiertem Feinblech für den Automobilbau",
Stahl und Eisen, 103 (1983), Nr. 17.
- [345] R. Schulze:
"Korrosionsbelastung an Personenwagen-Karosserien
in Europa",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 84 (1982) 3.
- [346] D. Thorpe:
"Neuentwicklungen der ICI für den Poly-
urethan-Verarbeiter",
Referat auf der SITEV 1981, Genf.
- [347]* T. N. Trebilcock, J. N. Epel:
"Light Truck FRP Leaf Spring Development",
SAE Technical Paper Series 810468.
- [348] J. A. Vaccari:
"Designing for plated plastics",
Design Engineering, February 1981.

- [349] G. Vogelrath, U. Feldmann:
 "Bandbeschichtetes, insbesondere zinkstaub-
 beschichtetes Feinblech für die Automobil-
 industrie",
 Stahl und Eisen, 103 (1983), Nr. 17.
- [350] H. Weule:
 "Industrieroboter in der Karosserie-Schweiß-
 technik",
 VDI-Z 120 (1978) Nr. 4 - Februar (II).
- [351] U. Bez, H.-W. Stahl:
 "Energieabsorbierende Verkleidung für eine
 Aufbausäule eines Kraftfahrzeuges",
 Offenlegungsschrift DE 3108759 A1 vom 16.9.1982
 beim Deutschen Patentamt.
- [352] "Industrieroboter sind zunehmend auf dem
 Vormarsch",
 Tagesspiegel, Nr. 11579 vom 26.10.83.
- [353] H.-G. Haldenwanger, H. Repper, S. Schäper:
 "Neue Kunststoffanwendungen bei der Innenaus-
 stattung - Teile mit Multifunktionen - des
 Audi 100",
 Kunststoffe im Automobilbau, VDI-Jahrestagung,
 VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1983.
- [354] D. Gentle:
 "Verstärkte Polyurethane in den USA",
 Grenzen der Kunststoffanwendung im Pkw-Bau in den
 80er Jahren, Jahrestagung VDI-Gesellschaft
 Kunststofftechnik, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf,
 1981.
- [355] R. Fernengel:
 "Glasfaserverstärktes Polyurethan",
 Grenzen der Kunststoffanwendung im Pkw-Bau in den
 80er Jahren, Jahrestagung VDI-Gesellschaft
 Kunststofftechnik, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf,
 1981.
- [356] M. Marsicano, V. Ballardini, M. Bacchella:
 "Die Einführung von RIM- und RRIM-Formteilen bei
 Alfa Romeo",
 Kunststoffe im Pkw- und Nutzfahrzeugbau,
 Jahrestagung VDI-Gesellschaft Kunststofftechnik,
 VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1982.

- [357] "Materials Reference Issue",
Machine Design, March 19, 1981.
- [358] "SMC-Außenteile von Menzolit",
ATZ, Automobiltechnische Zeitschrift 82 (1980) 3.
- [359] "SMC bewahrt Rohstoffe und spart Energie!",
Menzolit Report 5, Ausgabe 1/79, Menzolit-Werke,
Kraichtal-Menzingen.
- [360] "Leichtes Kleid für schnelle Renner",
Konstruktion & Design, November 1980.
- [361] H. Barske, W. Kümmerle:
"Der Energie- und Rohstoffverbrauch des
Audi-Forschungsautos im Vergleich zu herkömm-
lichen Fahrzeugen",
Entwicklungslinien für Kraftfahrzeuge und
Kraftstoffe, Forschungsbilanz 1982, Verlag TÜV
Rheinland 1983.
- [362] N. Eisenreich, H. P. Kugler, W. Liehmann:
"Einfache optische Verfahren zur analogen
Wegmessung bei dynamischen Vorgängen",
10. Kolloquium der Gesellschaft für
Umweltsimulation, 26./27. März 1981; VFI 5/81.
- [363] U. Seiffert, P. Walzer:
"The Future for Automotive Technology",
Francis Pinter Limited, London and Dover, N.H.,
ISBN 0-86187-460-9, 1984.
- [364] "Tatsachen und Zahlen",
47. Folge 1983, Verband der Automobilindustrie
e. V., Frankfurt/M.
- [365] "Perspektiven des zukünftigen Verkehrs",
Hrsg. Daimler Benz AG, VDI-Verlag GmbH,
Düsseldorf 1983, ISBN 3-18-419087-0.
- [366] M. Flemming:
"Fasertechnik",
Dornier GmbH, 1981 - 1983.

ANHANG

	Seite
Entwicklung von Karosserieteilen aus Kunststoff am Beispiel des Forschungs-Pkw UNI-CAR	286
Bildverzeichnis	362
Forschungsautos im Detail:	
UNI-CAR, Daimler Benz Fo-Auto, Audi Fo-Auto, Volkswagen Fo-Auto	371
FIAT VSS, Pininfarina/Audi Quartz, Minicars RSV, Peugeot Vera,	374
Calspan RSV, Audi Quattro Rallye, VW Passat Serie 1982, Porsche 995	377
Tabellen und Bilder zu den Kapiteln 3 - 6	380
Zusammenstellung einer Auswahl von Ergebnissen der Literaturanalyse	389

A 1 ENTWICKLUNG VON KAROSSERIETEILEN AUS KUNSTSTOFF AM BEISPIEL DES FORSCHUNGS-PKW UNI-CAR

A 1.1 GESTALTUNG UND FERTIGUNG

Im folgenden Kapitel soll exemplarisch die Vorgehensweise beschrieben werden, die zur Wahl bestimmter Bauweisen und Werkstoffe dieser Komponenten für ein zukunftsweisendes Fahrzeug führten, die Randbedingungen erläutert und Kritik geübt werden. Das Beispiel UNI-CAR eignet sich dafür besonders, da hier sehr unterschiedliche Anforderungen gestellt wurden, die sowohl den (eher mittel- bis langfristig in dieser Intensität zu erwartenden) Fußgängerschutz als auch eine ausreichende Seriennähe mit der entsprechenden Berücksichtigung aktueller Fertigungstechnologien umfaßte.¹

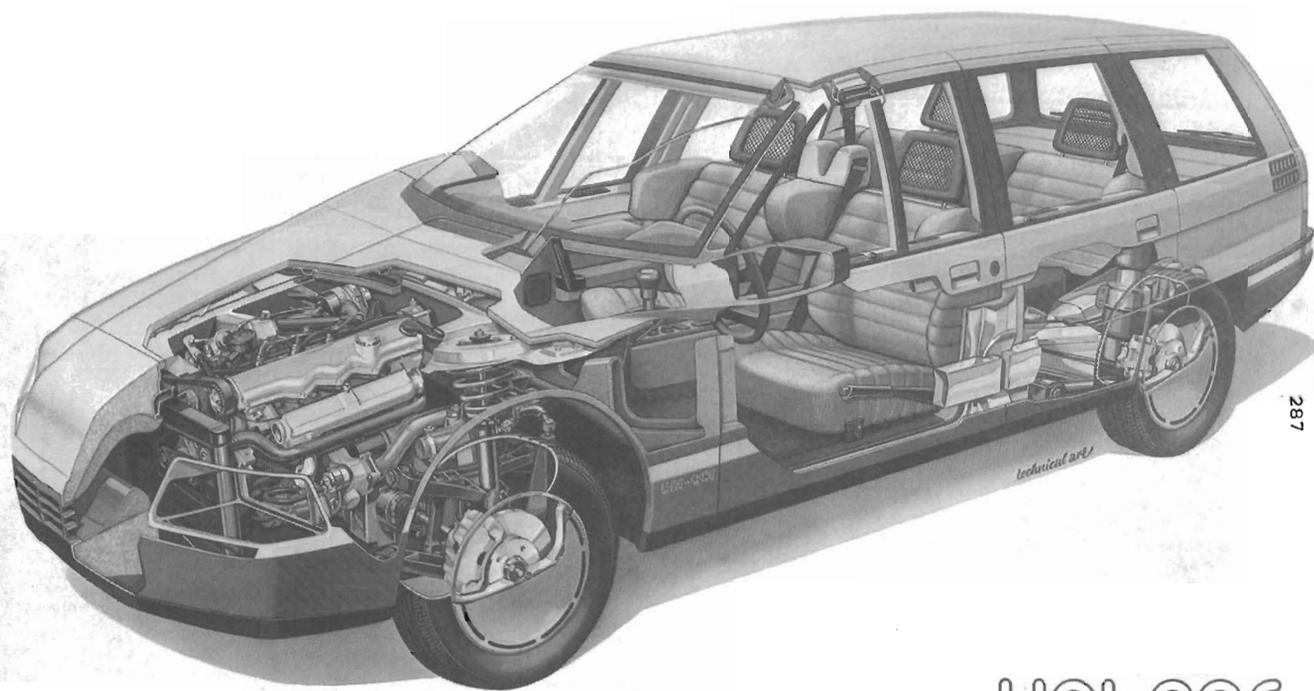
A 1.1.1 Formgebung

Die für das UNI-CAR vorgegebenen Entwicklungsziele gute Aerodynamik und niedrige Geräuschemission hatten formgebende und konstruktive Maßnahmen zur Folge, die als Randbedingungen für das Sicherheitskonzept für die äußeren Verkehrsteilnehmer Fußgänger und Zweiradfahrer als vorgegeben anzusehen waren. Dazu zählten:

- glattflächiger, in allen Richtungen abgerundeter Vorderwagen,
- flach ansteigender, niedriger, langer Vorderwagen,
- starker seitlicher Einzug der Dachkanten,
- stark geneigte Windschutzscheibe.

¹ Siehe dazu z. B. [2], [7], [8], [9], [21], [23], [24].

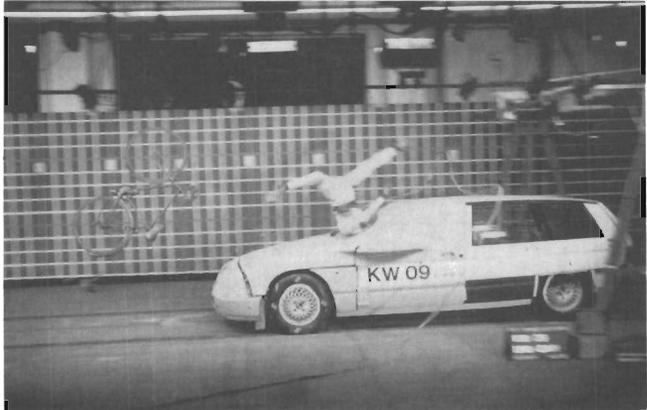
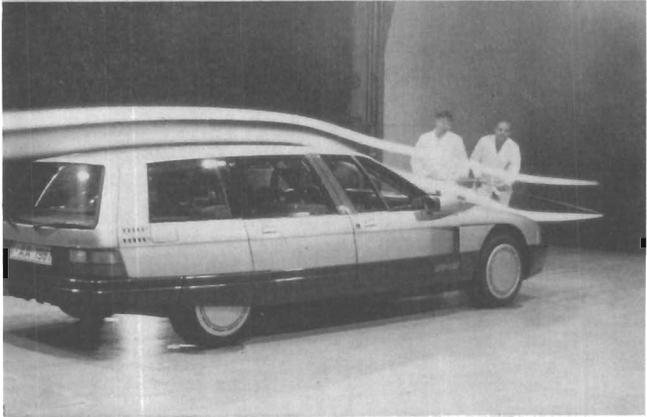
Seite 87 und 88: Bild 81, UNI-CAR Schnittzeichnung; Bild 82, UNI-CAR bei der Vorstellung und in Erprobung.



287

UNI-CAR

Der Forschungs-Pkw der
Hochschularbeitsgemeinschaft



Als Kompromiß zwischen den Anforderungen der Aerodynamik (niedriger, flach ansteigender Vorderwagen) und des Fußgängerschutzes (mäßig ausgebildete, abgerundete Haubenvorderkante, ausreichende Bauhöhe für Deformationswege) wurde die in Bild 83 gezeigte Form gewählt. Eine ausreichende Abwickellänge (UNI-CAR 1,95 m, zum Vergleich VW Golf 1,75 m), integrierte Stoßfänger, Scheinwerfer und Außenspiegel verringern die Formaggressivität.

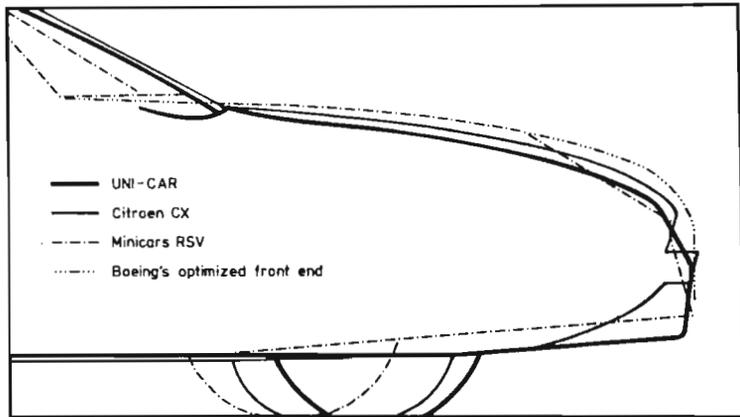


Bild 83: Frontkontur des UNI-CAR und vergleichbare Konturen.

Die Höhe des Überganges Vorderfront/Haubenoberseite ist von großer Bedeutung für den Bewegungsablauf und die Belastung der gestoßenen Person (Bild 84 zeigt verschiedene Phasen einer Fußgänger/Fahrzeug-Kollision). Eine niedrige Einleitungshöhe der resultierenden Anstoßkraft bewirkt in der Regel eine hohe Aufprallgeschwindigkeit des Kopfes auf die Motorhaube. Eine deutlich ausgebildete, höhere Vorderkante wäre günstiger, verstärkt jedoch meist die Hüft- und Brustbelastungen kleiner Personen, so daß ein Kompromiß getroffen werden muß.

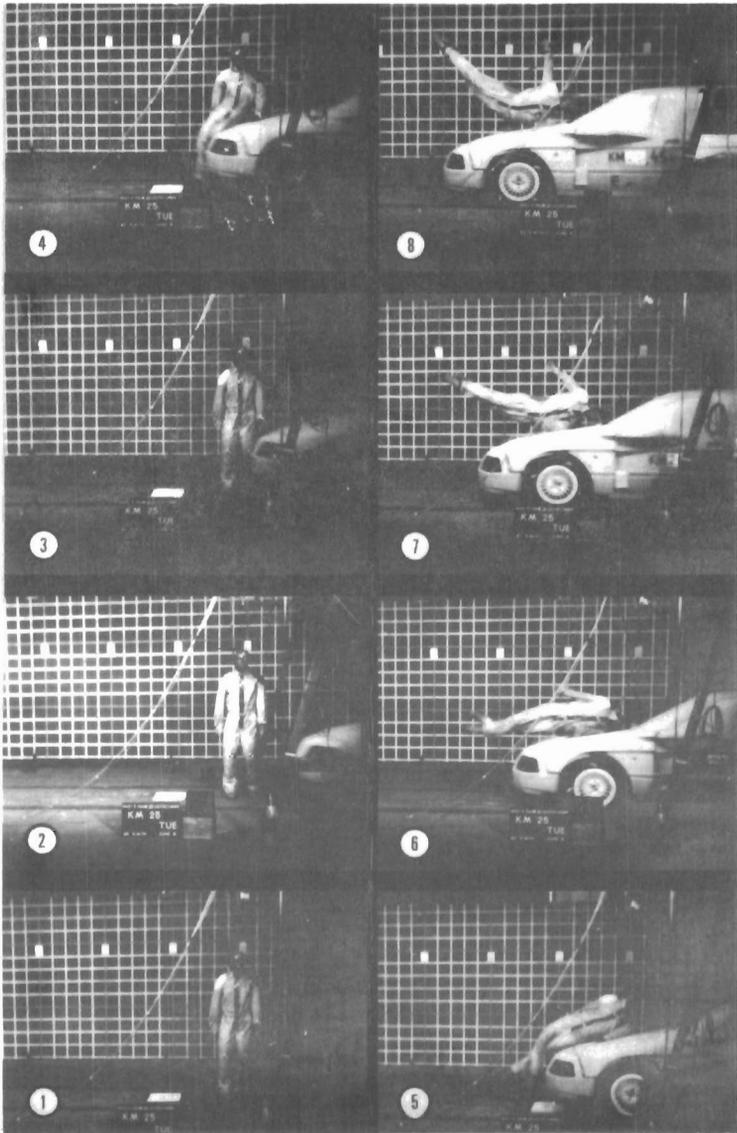


Bild 84: Ablauf eines Fußgängerversuchs mit dem UNI-CAR.

A 1.1.2 Werkstoffauswahl

Maßgebender Parameter für die gemäß dem Entwicklungsziel Fußgängerschutz des UNI-CAR zu konstruierenden Einrichtungen war der zum Abbau der Stoßenergie zur Verfügung stehende Weg, da große Deformationswege geringe Belastungen auf den Körper des Fußgängers ermöglichen.

Die bei einem Aufprall zwischen Fahrzeug- und Körperteil wirkende Kraft soll nach oben hin durch die (durchschnittliche oder nach anderen Kriterien festgelegte) biomechanische Belastungsfähigkeit des Menschen begrenzt werden, nach unten hin durch die abzubauenende Energie. Um den Deformationsweg möglichst gut auszunutzen, bemüht man sich, den Kraft-Weg-Verlauf einem Rechteck anzunähern, d.h. einerseits die auf den Körper wirkenden Kräfte beim Aufschlag möglichst schnell auf ein noch erträgliches - bei ausreichendem Deformationsweg entsprechend niedriges - Niveau anzuheben und über dem gesamten vorhandenen Weg dort zu halten. Das Ausfedern sollte durch einen starken Kraftabfall gedämpft werden, um die Zeitdauer der Einwirkung, die übertragene Energie und die Abwurfkräfte gering zu halten.

Dies gelingt mit gewöhnlichem Blech wegen der relativ leicht beherrschbaren plastischen Verformungsmöglichkeiten recht gut, wenn die notwendigen Wege bereitgestellt werden können und die Richtung der Krafteinleitung bekannt ist. Um eine ähnlich gute Kennung wie z. B. mit einem sich gezielt zusammenfaltenden Blechkörper zu erhalten, ist bei der Verwendung von Kunststoffen ein nicht unerheblicher konstruktiver und experimenteller Aufwand erforderlich, wenn der gewählte Werkstoff auch die Fahrzeugaußenhaut bildet. Er soll dann schließlich auch die vom durchschnittlichen Kunden vom Blech gewohnten Qualitätsansprüche an die Oberflächenbeschaffenheit erfüllen und leicht zu verarbeiten sein.

Bei einer Schalenbauweise wie bei den üblichen Blechkonstruktionen bliebe aber auch mit Karosserieteilen aus Kunststoffen, die sich ebenso leicht herstellen, montieren oder lackieren ließen und die ebenso gute Verformungseigenschaften oder sogar Reversibilität zeigen würden, ein bedeutsamer Nachteil. Es läßt sich nicht über die gesamte Oberfläche die gleiche Steifigkeit erreichen, da immer verhärtend wirkende Ecken, Kanten, Rippen oder sonstige, in einem ungünstigen Winkel zur Aufprallrichtung stehende Flächen und Anschlußteile in Kauf genommen werden müßten. Dies ist ein zu beachtendes Problem bei derart komplexen Bewegungsabläufen wie dem Fußgängerunfall. Bild 85 zeigt eine typische Kantenbildung im vorderen Haubenbereich beim Fußgängerunfall.

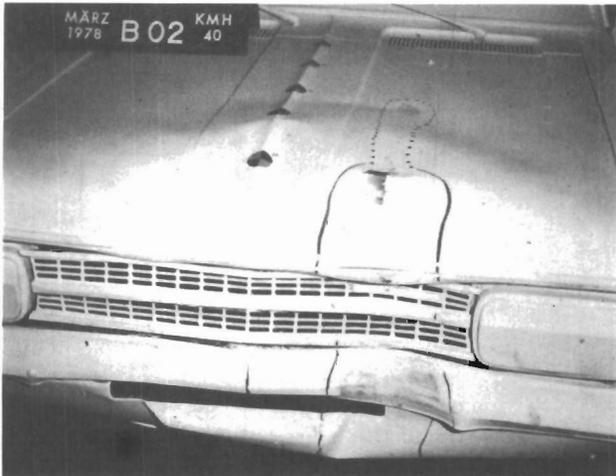


Bild 85: Hochgewölbte Haubenvorderkante nach Kollision mit einem Fußgängermodell.

Zudem neigen selbst mit großzügigen Radien geformte Schalenkörper bei einer örtlichen Deformation, wie z. B. am Übergang Fahrzeugfront / Motorhaube beim Aufprall des Beins eines Fußgängers, zur Bildung von Biegekanten. Da diese zwecks Energieaufnahme durch die Schale nicht sofort zurückspringen, entstehen harte Zonen, die den Fußgänger beim weiteren Aufwurf und anschließenden Abwurf gefährden.

Ein weiteres konstruktives und werkstoffkundliches Problem bei hochbelasteten Kunststoff- bzw. Verbundwerkstoffen ist die Beherrschung des Spannungsverlaufs an den Kraftumlenkungs- und -überleitungsstellen, bei der Einleitung in der Flächenebene, in den Bereichen starker Beulen- und Kantenbildung oder durch Temperaturbelastungen, Oberflächenfehler und Lackierungen. Erfahrungsgemäß sind hier Schwachpunkte zu erwarten, deren Beseitigung u. U. recht langwierige konstruktive Entwicklungsarbeiten erfordert, welche in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht geleistet werden konnten.

Es wurden daher Kombinationen von Werkstoffen vorgesehen, die den sich teilweise widersprechenden Anforderungen durch Aufgabenteilung gerecht wurden, d. h. für die Oberfläche eine strapazierfähige Haut und darunter einen energieabsorbierenden Hartschaumstoff. Bei der Konzeption der Fahrzeugkarosserie wurden dementsprechend alle unfallrelevanten Fahrzeugflächen mit entsprechend den Anforderungen angepaßten Schaumstoffen belegt, die die Aufprallenergie aus beliebigen Stoßrichtungen über ihr Volumen verteilt abbauen sowie durch Schichtung von Schaumstoffen unterschiedlicher Eigenschaften gute Deformationskennwerte und gute Oberflächen ermöglichen. Gewichtsnachteile sollte durch Verwendung möglichst leichter Hart- oder Halbhartschaumstoffe zur Energieaufnahme oder durch das Vorsehen von Hohlräumen begegnet werden, wobei letztere durch gezielte Anordnung auch die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Deformationseigenschaften mindern können.

Die Entscheidung, Polyurethan als Werkstoff zu verwenden, wurde insbesondere wegen der großen Variationsmöglichkeiten dieses Werkstoffs getroffen. Hier seien unter anderem die Möglichkeiten der Herstellung von großvolumigen und dünnwandigen Integralschaumstoffteilen, Elastizitätsmodul- bzw. Steifigkeitsänderungen durch Variation des Raumgewichts, die Möglichkeit der Beimischung von Glasfasern und die Verfügbarkeit elastischer, halbharter und harter Polyurethan-Mischungen zu nennen. Daß das Material seine Kennwerte in einem weiten Temperaturbereich mit ausreichend geringen Änderungen beibehält, war für die Werkstoffwahl eine wichtige Voraussetzung. Dazu kam, daß zur Herstellung von Teilen aus PUR relativ kostengünstige Kunststoff-Werkzeuge verwendet werden können, denn für Prototypen ist die Anfertigung von teuren Stahlwerkzeugen, wie sie für Spritzguß- oder Preßteile benötigt werden, kostenmäßig nicht vertretbar.

Am Institut für Fahrzeugtechnik der TU Berlin ist schon früher einmal ein Fußgängersicherheitsfahrzeug (Bild 86) mit einer Vorderfront aus Polyurethanschaum entwickelt worden [96]. Dabei handelte es sich um eine Konstruktion, bei der ein voll aus Integralschaum mit einem Raumgewicht von 350 kg/m^3 gefertigtes Frontteil vorgesehen wurde. Das Gewicht war mit über 20 kg jedoch doppelt so hoch wie beim ursprünglichen Blechteil und die Oberflächenqualität wegen der geringen Steifigkeit des Werkstoffs und nicht porenfreier Hautausbildung nicht befriedigend in den Griff zu bekommen. Der Low-Speed-Test nach FMVSS 215 konnte wegen der geschwächten Strukturen des Versuchsträger nicht erfüllt werden; andere Konstruktionen von Exportfahrzeugen aus der Serie hatten zu diesem Zweck allerdings meist zusätzliche Metallträger mit weiteren 15 - 20 kg. Bei simulierten Fußgängerunfällen zeigte sich insbesondere mit Kinderdummies der Nachteil zu hoher Elastizität. Dabei wurde zwar der Primäranprall relativ gut gedämpft, der Dummy aber durch das elastische Ausfedern stark auf die Fahrbahn geschleudert. Er erlitt dadurch häufig sogar höhere Belastungen als bei Versuchen mit ungepolsterten

Fahrzeugen. Eine Materialeinstellung gleicher Steifigkeit, aber geringerer Elastizität war für die Versuche nicht verfügbar.

Dieses erste Versuchsmuster sollte zunächst nur die prinzipielle Richtigkeit und Realisierbarkeit von Polsterungen an der Pkw-Front zeigen. Besondere Entwicklungsziele für das UNI-CAR waren daher neben besseren Eigenschaften beim Fußgängerunfall deutlich geringeres Gewicht, seriennahe Fertigungsqualität sowie Erfüllung des Low-Speed-Tests. Diesen Anforderungen nahe kam ein Stoßfänger eines japanischen Großserien-Pkws aus PUR-Halbhartschaumkern mit RRIM-Haut, so daß die gewählte Soft-Nose-Konzeption realisierbar und ebenfalls großserienfähig zu werden versprach.

Die Prototypenteile wurden in Zusammenarbeit mit den Firmen Bayer (Werkzeuge, Soft-Nose, Motorhaube, Spiegel, Seitenteile, Stoßfänger hinten), Phoenix (Scheibenrahmen, Dachkanten, Lackierung, Kleinteile), Karmann und Ital Design (Modelle und Blechteile) sowie Lesonal (Lack) erstellt.



Bild 86: Fußgängersicherheitsfahrzeug von 1978 [96].

A 1.1.3 Konstruktive Ausführung

- Frontteil

Als Frontteil des UNI-CAR wurde ein sogenanntes Softface, d.h. ein Kunststoffelement verwendet, das die gesamte Vorderfront abdeckt (Bild 87 und 88) und aus verschiedenen Polyurethansystemen besteht. Es baut sich aus einer dünnen Haut aus relativ festem Integralschaum und einem Grundkörper aus energieabsorbierendem, halbhartem Schaumstoff auf, nachfolgend kurz EA-Schaum genannt. Die Deckhaut (RRIM, je nach Ausführung "Bayflex 70" oder "Bayflex 101", beides Polyetherpolyol-Formulierungen, bis 6 % Glasanteil) wurde möglichst weich gehalten, um Verhärtungen z. B. im Bereich der Scheinwerferschächte und im Kühlluftleinlaß zu mildern. Für eine ruhige Oberfläche sorgte die Hinterschäumung, die auch Welligkeiten oder ein Durchhängen der Haut bei erhöhten Außentemperaturen verhindern sollte. Die Gesamtdicke betrug rund 200 mm; mit dieser Konstruktion sollten bis zu einer Kollisionsgeschwindigkeit von 45 km/h die Belastung des Fußgängers unter der noch erträglichen biomechanischen Grenze bleiben. Wie Vorversuche (siehe A 1.2) zeigten, mußte das Raumgewicht des EA-Schaumstoffes bei etwa 100 kg/m^3 liegen; dies war die untere Grenze dessen, was mit dem zur Verfügung stehenden Kunststoffwerkzeug und Werkstoffeinstellungen mit geeigneten Restitutionsfaktoren realisiert werden konnte.

Diese Verbundkonstruktion verband die Vorteile einer hohen Energieabsorption und guter Oberflächenbeschaffenheit. Die alleinige Verwendung energieabsorbierender halbharter Schaumstoffe schied aus, da diese keine strapazier- und lackierfähigen Oberflächen bilden; Integralschaumstoffe andererseits erfüllen zwar die Anforderungen an die Oberflächenqualität, ihr Energieabsorptionsvermögen ist jedoch nicht ausreichend und sie führen zu Teilen mit erheblich höherem Gewicht. Das Gesamtgewicht der Soft-Nose betrug bei den letzten Versionen nur noch 12 - 13 kg und war damit nicht höher als bei verschiedenen Serienwagen mit

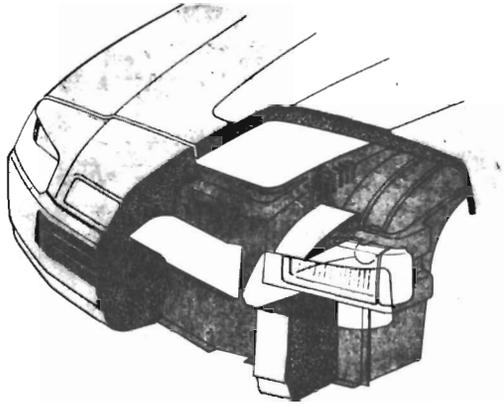


Bild 87: Schnitt durch den Vorderwagen des UNI-CAR.

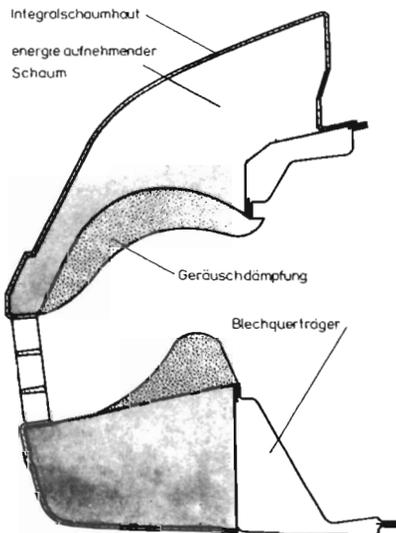


Bild 88: Schnitt durch das Soft-Face.

steifer Haut ohne Hinterschäumung, sparte aber die dort notwendigen Verstärkungs- und Energieabsorptionselemente ein. Stahlkonstruktionen sind mindestens ebensoschwer. Die zu dieser Zeit gültige amerikanische Vorschrift FMVSS 215 zur Vermeidung von Bagatellschäden (5-mph-Test) konnte ohne zusätzliche energieaufnehmende Stoßfängersysteme erfüllt werden. Den Nachweis erbrachte eine Reihe von Aufprallversuchen mit einem dem sonst üblichen Pendel gleichwertigen Versuchsschlitten (Bild 89). Die Rückverformung des Frontteils wurde voll gewährleistet, da die elastische Haut nach einem Aufprall eventuell zurückbleibende Unebenheiten im Grundkörper ausgleichen konnte. Bemerkenswert ist, daß die im Bereich des Kühllufteinlasses selbst als Kühlergrill ausgebildete Deckhaut der direkten Beaufschlagung durch die Stoßwulst des Prüfkörpers standhielt.

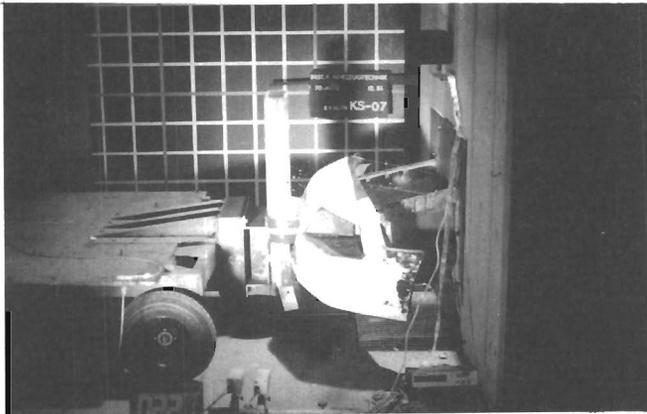


Bild 89: Low-Speed-Versuch mit UNI-CAR-Vorderwagen.

Die Lackierung sämtlicher PUR-Außenteile sowie der Blechkarosserie erfolgte mit einem sehr elastischen PUR-Lack. Farbton- und Glanzunterschiede der verschiedenen Karosserieabschnitte sollten auch nach Jahren nicht auftreten.

Die Scheinwerfer wurden in der hinter dem Frontteil liegenden, kräfteverteilenden Prallplatte montiert und die Schächte aus aerodynamischen Gründen abgedeckt. Für die Abdeckscheiben standen Polycarbonat (PC), schlagzäh modifiziertes Polymethylmethacrylat (PMMA) - jeweils mit oder ohne die Kratzfestigkeit erhöhende Beschichtung (Polysiloxan, Resart Ihm AG, [97]) - und vorgespanntes Glas (ESG) zur Auswahl. Da keiner dieser Werkstoffe gleichermaßen kratzfest, unzerbrechlich und UV-beständig ist, war eine Einzelentscheidung nur für den speziellen Anwendungsfall und als Kompromiß möglich.

Der erste Prototyp erhielt der schnellen Verfügbarkeit wegen Glasscheiben; die folgenden Fahrzeuge wurden unterschiedlich ausgerüstet. Die simulierten Fußgängerunfälle zeigten später, daß die PC-Scheiben erwartungsgemäß nicht splitterten und großen Verformungen mit relativ hohen Geschwindigkeiten standhielten, in einigen Ausnahmefällen es jedoch zum Bruch kam, siehe Bild 90. Da dies bei ebenen Platten, auch mit Beschichtung, selbst bei höheren Belastungen nicht geschah, dürfte hier ein Einfluß innerer Spannungen durch die Formgebung der Scheinwerferabdeckscheiben vorgelegen haben. Die Beschichtungen selbst sind bei den Versuchen auch bei nur geringen elastischen Verformungen der Scheiben zwar stets geplatzt, mit bloßem Auge war dies aber kaum zu erkennen. Für einen Serieneinsatz müßten die Beschädigung der Beschichtung nach reversiblen Verformungen und mögliche negative Einflüsse genauer untersucht werden, da z. B. die Lösungsmittel- und Kraftstoffbeständigkeit sowie die Schlagzähigkeit beeinträchtigt werden können. Als Problem bei den PC-Scheiben stellte sich die schlechte Haftung der nachträglich aufgebrauchten Beschichtungen heraus, die sich teilweise bereits beim Abziehen der Schutzfolien von der Scheibe lösten. Die Haftung einer kratzfesten Beschichtung auf dem polymeren Trägermaterial, ihre Widerstandsfähigkeit und der Einfluß auf die mechanischen Eigenschaften des Trägers kann nur bei seriennäheren Teilen aus entsprechenden Werkzeugen fundiert beurteilt werden.

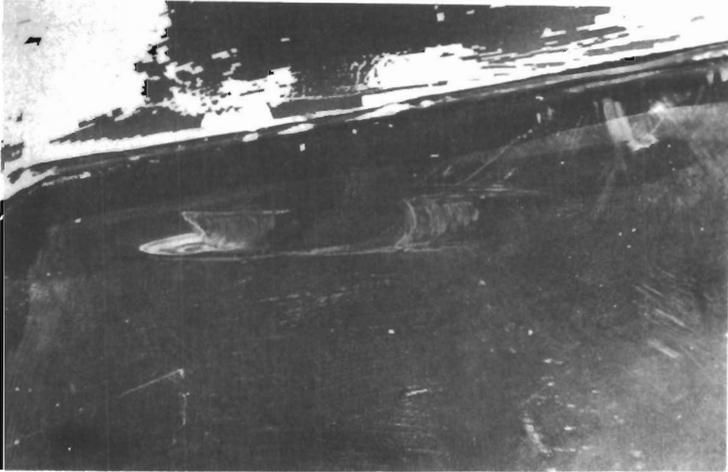


Bild 90: Kratzfeste Beschichtung einer Scheinwerferabdeckscheibe aus PC am UNI-CAR nach einem Fußgängerversuch.

Die Befestigung der Abdeckscheiben erfolgte mit der gleichen Polyurethan-Klebe-Dicht-Masse, die auch für die Montage der Glasscheiben verwendet wurde, jedoch mit entsprechend gewählten Primern und ohne weitere Haltevorrichtungen oder Zierleisten. Voraussetzung war daher das Einhalten sehr geringer Toleranzen in Größe und Form der Abdeckungen sowie ein sehr genaues Arbeiten beim Einsetzen, so daß diese Konstruktion für eine Serienfertigung sicherlich noch modifiziert werden müßte.

Die Abdeckscheiben sollten zunächst auch mit einer Heizung versehen werden. Es wurden Versuche mit aufgedampften Aluminiumleiterbahnen (Bild 91) sowie aufgesprühten und gemalten Leitlacken gemacht. Die aufgedampften Schichten erwiesen sich als zu dünn, so daß die Heizleiter zu breit hätten ausfallen müssen. Die Silberleitlackbahnen konnten mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht gleichmäßig genug aufgebracht werden. Bei Erwärmung der Leitlackbahnen

verformte sich das Scheibenmaterial an den Stellen erhöhten Widerstandes und erhöhte diesen dadurch weiter, wodurch die Leiterbahnen schnell durchbrannten. Kurzfristig konnten aber durchaus an einigen Versuchsteilen befriedigende Heizleistungen erreicht werden, so daß bei entsprechenden Fertigungsmöglichkeiten und zusätzlichem galvanischen Überzug wie bei Glasscheiben auch funktionsfähige Heizscheiben zu erwarten gewesen wären. Da die Beschlagneigung der Abdeckscheiben aber als relativ gering einzuschätzen war, (Messungen ergaben Temperaturen von über 33°C an der Scheibeninnenseite nach 10 min Brenndauer der Scheinwerfer bei 20° Außentemperatur) wurden die Versuche wegen des unverhältnismäßig hohen Aufwandes für die Weiterentwicklung abgebrochen.

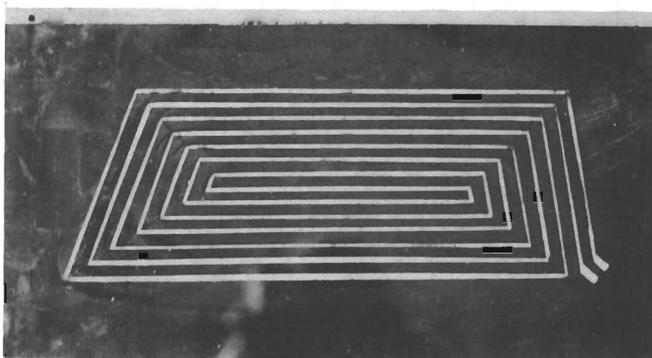


Bild 91: Versuchsmuster einer heizbaren Scheinwerferabdeckscheibe aus bedampftem Polycarbonat.

Die komplizierte Konstruktion des Frontteils mit zahlreichen Hinterschneidungen und Losteilen, angeformtem Kühlergrill und langen Fließwegen für das eingespritzte Material erforderte ein relativ aufwendiges und teures

Werkzeug (Werkzeuge und Nebenkosten incl. 10 Exemplare fast 400.000 DM) wie in den Bildern 92 und 93 [2] gezeigt, unterstreicht aber auch die Möglichkeiten dieses Verfahrens. Über die Wirtschaftlichkeit ist damit noch nichts ausgesagt, da zunächst die Erprobung der Technologie und die Funktion der Kunststoffteile im Vordergrund stand. Die Fertigung der Haut allein wäre trotz einer Werkzeugverweildauer von 5 bis 10 Minuten fast schon serienfähig; der Kern hatte mit mehreren Stunden allerdings indiskutabel

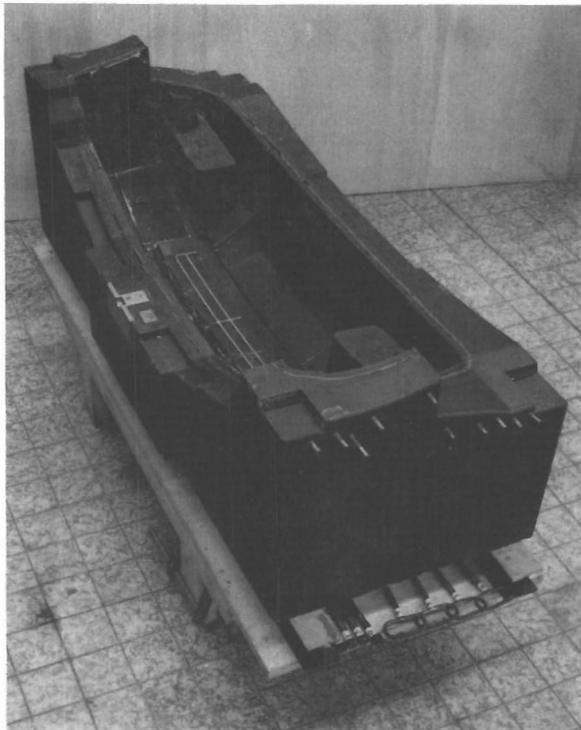


Bild 92: Geöffnetes Kunststoffwerkzeug für das Softface.

lange Aushärtezeiten. Bei größeren Stückzahlen muß natürlich aus Gründen der besseren Oberflächenqualität, Lebensdauer und Temperierbarkeit auf ein Stahlwerkzeug übergegangen werden. Vorrichtungen zum verzugsfreien Transport und Lagern der Teile (das PUR-Material reagiert auch nach Abklingen des eigentlichen Schwindungsprozesses noch einige Tage in geringem Maße aus) stellen weiteren, für eine Großserie nachteiligen Aufwand dar.

Derartige Kunststoffwerkzeuge bestehen meist aus einer laminierten Oberfläche aus Epoxidharz mit Glasfaserverstärkung, einer Hinterfüllung aus kunstharzgebundenem Quarzsand und Stahleinlagen. Dazu kommen Kupferrohrleitungen zur Temperierung, Angußteile und Zuhaltungen.

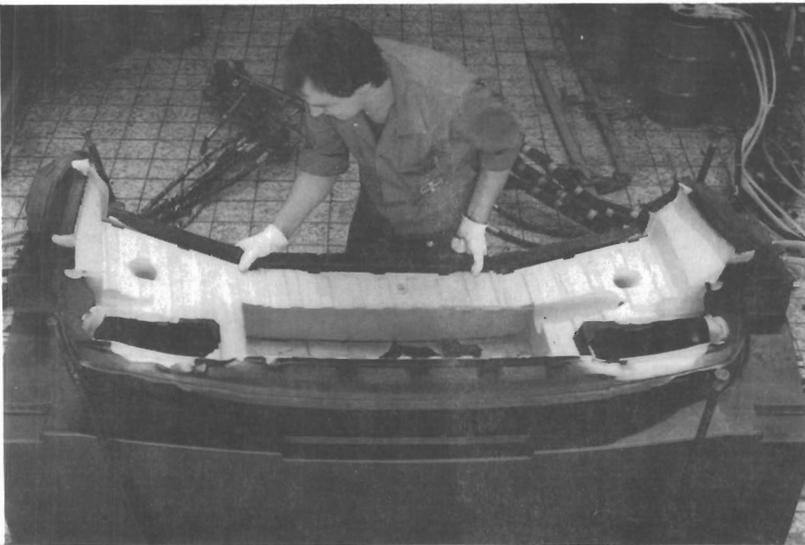


Bild 93: Entnahme eines mit Halbhartschaum hinterfüllten Soft-Face-Rohlings aus dem Werkzeug.

- Motorhaube

Die Motorhaube bestand aus einer Unterschale aus glasfaserverstärktem Epoxidharz, einer energieaufnehmenden Schicht aus halbhartem PUR-Schaumstoff, einer dünnen, die Oberfläche stabilisierenden Glasfasereinlage und einer zähelastischen Deckhaut aus PUR-Integralschaum (Bild 94). Die Glasfasereinlagen sollten ein vergrößertes "Schrumpfmodell" zum Ausgleich der Materialschwindung entbehrlich machen, wie es für die Herstellung des Werkzeuges für das Front-End notwendig war. Zunächst wurden die beiden GFK-Schalen angefertigt, in das Werkzeug eingelegt und der Zwischenraum mit dem gleichen Halbhart- bzw. EA-Schaumstoff (Raumgewicht 100 kg/m^3) wie beim Frontteil gefüllt. Die Integralschaumstoffhaut wurde dann in einem weiteren Arbeitsgang mit einem zweiten Werkzeugdeckel gefertigt. Formfüllungs- und Oberflächenprobleme gaben das Raumgewicht 300 kg/m^3 und eine Mindestdicke von ca. 10 mm vor, wodurch zunächst ein höheres Gesamtgewicht als angestrebt in Kauf genommen werden mußte. Vorversuche mit einer dünneren, aber entsprechend dichteren Außenhaut (3 - 4 mm, RG $1,1 \text{ kg/m}^3$) zeigten eine zu hohe Steifigkeit bei noch höherem Gewicht und Problemen bei der Beherrschung der Schwindung und der Haftung am EA-Schaumstoff.

Erste Versionen erhielten ein eingelegtes Aluminiumtraggerüst, da wegen der Schallkapsel zunächst mit höheren Motorraumtemperaturen gerechnet wurde, als sie dann am Prüfstand gemessen wurden (Bild 95). Wie die Fahrversuche zeigten, könnte darauf verzichtet und das Gewicht der Haube bis auf zwei Drittel des Gewichts konventioneller Blechkonstruktionen vergleichbarer Größe und Torsionssteifigkeit gesenkt werden (mit Aluminium 28 kg, ohne 23 kg, Fläche ca. $1,9 \times 1,1 \text{ m}^2$). Bei Verringerung der Dicke der Integralschaumhaut als größtem Gewichtsanteil an der Haube ließe sich das Gewicht noch deutlicher mindern, was jedoch

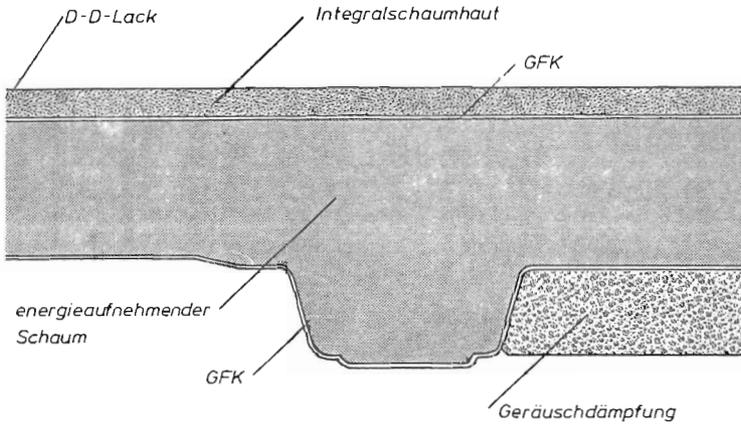


Bild 94: Motorhaube mit GFK-Träger.

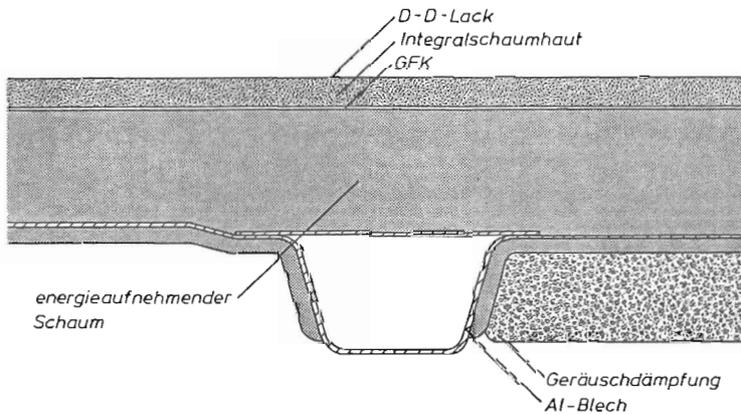


Bild 95: Motorhaube mit Aluminiumgerüst.

bei den Prototypenversionen auf fertigungstechnische Schwierigkeiten stieß bezüglich Formfüllung und Homogenität des Materials. Rein rechnerisch hätte sich auch die Dicke der GFK-Deckschichten dieser Sandwich-Konstruktion noch weiter verringern lassen, man stößt hier jedoch ebenfalls an Grenzen der Herstellbarkeit und Hantierbarkeit. Ein großer Teil der dünnen GFK-Schalen zeigte nach der Ausschäumung ohnehin kleine Risse. Eine gewichtsoptimierte Aluminiumeinlage hätte eventuell ebenfalls eine weitere Einsparung gebracht. Die untere GFK-Schale bewirkte eine geschlossene Oberfläche zum Motorraum und Radkasten hin, wodurch eine Versiegelung des Schaumstoffkerns zur Vermeidung von Öl- oder Wasseraufnahme entfallen konnte.

Die Versionen mit Aluminiumeinlage hatten außerdem den Vorteil, daß sie sich bei Anpaßarbeiten an die Prototypen einfacher richten ließen; in einer Serienproduktion sollte die Notwendigkeit dazu allerdings ohnehin entfallen. Insbesondere die GFK-Versionen warfen dagegen durch die Schwindung von Kern und Integralschaumstoff-Oberfläche erhebliche Probleme auf. Die Trennfuge Soft-Nose / Haube fiel nie zufriedenstellend aus; durch Richten des Aluminiumrahmens konnte aber leicht eine gute Anpassung erreicht werden. Die GFK-Versionen dagegen hätten an der Unterseite aufgetrennt, mittels einer Schablone in Form gebracht und neu überlaminiert werden müssen. Bei einer Serienproduktion müßte eine genaue Konstanz der Schwindung der beiden verwendeten PUR-Werkstoffe durch sorgfältige Überwachung der Verfahrensbedingungen gewährleistet werden, da bis zu den Radläufen heruntergezogene Haubenteile schon bei geringem Verzug in den Radien große Maßabweichungen an den Flanken bewirken.

Die Aufgabe der Stoßabsorption (z. B. Kopfaufprall des Fußgängers) übernahm hauptsächlich der 3 bis 5 cm dicke EA-Schaum-Kern, weniger die weichere Oberfläche. Die darunterliegende dünne Glasfaserlage brach nach einer kurzen Phase eines starken Kraftanstiegs und ermöglichte

damit eine gute Kraft-Weg-Kennung mit höherer Energieaufnahme bei erträglichem Kraftniveau. Zur weiteren Gewichtsverringerung wäre als Kernwerkstoff auch ein leichterer Hartschaumstoff denkbar gewesen, da es hier nicht in gleichem Maß wie beim Frontteil auf eine vollständige Rückverformung ankam. Die Außenhaut aus Integralschaumstoff sollte die Bruchkanten der Glasfaserschicht von der Haut des Fußgängers fernhalten und im Alltagsbetrieb vorstellbare geringfügige Beschädigungen der oberen Glasfaserschicht und Eindrückungen des Halbhartschaumkerns ausgleichen.

Aus Kostengründen wäre für ein Serienteil jedoch eine Vereinfachung des Fertigungsvorgangs zwingend notwendig. Bei Vorversuchen mit einer abgeformten Serienhaube wurden z. B. ein Grundierfüller und ein besonderer Schaumstoff für die Außenhaut in das offene Werkzeug gesprüht. So konnte ein Füllvorgang gespart, das Gewicht verringert und die Oberfläche verbessert, aber leider noch keine ausreichende Strapazierfähigkeit der Oberfläche erreicht werden; hier ist noch einiges an Entwicklungsarbeit zu leisten. Ebenso müßten noch wirtschaftlichere Verfahren zur Herstellung des Sandwich-Unterbaus entwickelt werden. Hier zeigte sich ein Hauptnachteil der zur Erzeugung sehr torsionssteifer und leichter plattenförmiger Bauelemente sonst prädestinierten Sandwich-Bauweise.

- Außenspiegel

Der Fußgängerschutz wurde auch berücksichtigt bei der Gestaltung der Außenspiegel, siehe Bild 96. Sie wurden ähnlich aufgebaut wie die Motorhaube, enthielten jedoch eine Blecheinlage, die den Verstellmotor und die Federklemmen für eine gemäß StVZO vorzusehende Abreißvorrichtung trug. Auch ein an der Tür angeschraubter GFK-Sockel besaß eine Oberseite aus Integralschaumstoff. Gewicht und Fertigungsaufwand zeigten jedoch, daß diese mehrteilige Konstruktion kaum zur Serientauglichkeit entwickelt werden kann.

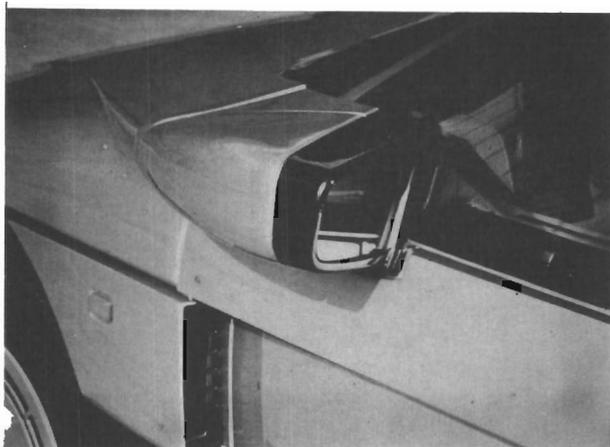


Bild 96: Außenspiegel des UNI-CAR
mit Integralschaumhaut.

- Scheibenrahmen und Dachkanten

Um zu vermeiden, daß ein um die Frontscheibe laufendes Polster des Windschutzscheibenrahmens Design und Aerodynamik des Fahrzeugs beeinträchtigt, wurde ein Element aus Integralschaumstoff zwischen Scheibe und Blechstruktur angeordnet.

Es hatte ein Raumgewicht von rund 300 kg/m^3 , eine Dicke von knapp 5 cm und wurde wie die Scheibe eingeklebt. Der angrenzende, ebenfalls gepolsterte Türrahmen bestand aus Aluminium und war entsprechend verformbar. Ungünstig war wegen des geringen E-Moduls des Aluminiums der relativ große Querschnitt des Türscheibenrahmens, da auf einen ausreichenden Dichtungsdruck Wert gelegt wurde. Mit einer Stahlkonstruktion hätten sich erheblich bessere Sichtverhältnisse realisieren lassen. Ebenfalls denkbar wäre ein gebogenes Strangpreßprofil wie beim Ro 80 oder ein Druck-

gußteil gewesen. Ein möglicherweise höheres Gewicht wäre, rückblickend betrachtet, aus Gründen der Verkehrssicherheit und des negativen subjektiven Eindrucks der Insassen von dem sehr massiv wirkenden Pfosten vertretbar gewesen.

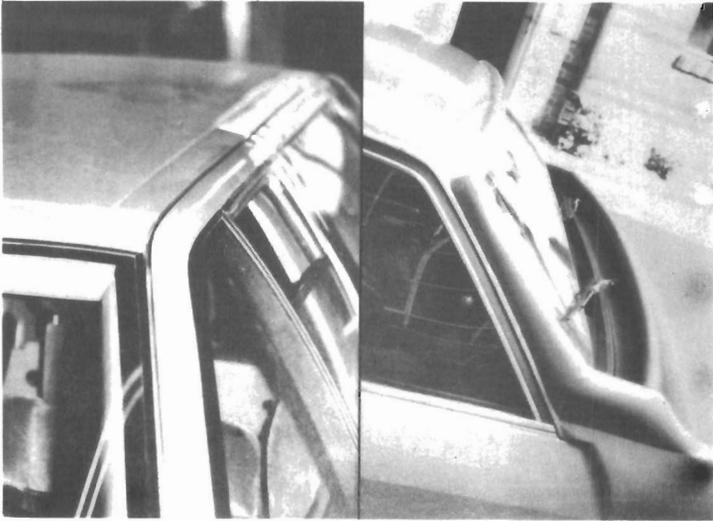


Bild 97: Aerodynamisch günstiges Design der Scheibenrahmenpolsterung beim UNI-CAR im Vergleich zu dem älteren Fußgängerschutzfahrzeug [96].

Die Bilder 97 bis 99 zeigen die oberflächenbündige Gestaltung der Frontscheiben- und Dachrahmenpolsterungen für den Fußgänger- und Zweiradfahrerschutz am UNI-CAR; Bild 97 zeigt einen Vergleich zwischen dem UNI-CAR und einem älteren Versuchsfahrzeug mit aufgesetzten Polsterungen, Bild 98 dazu einen Schnitt durch die vordere Dachkante und Bild 99 einen Schnitt durch den A-Pfosten.¹

¹ Siehe auch [98], [99].

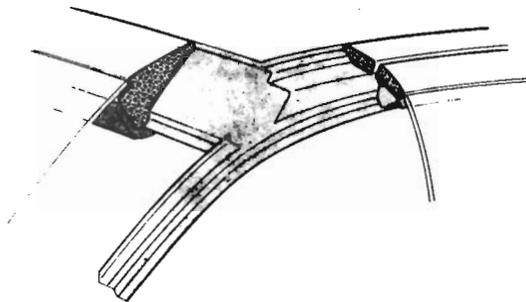


Bild 98: Frontscheiben- und Dachrahmenpolsterung.

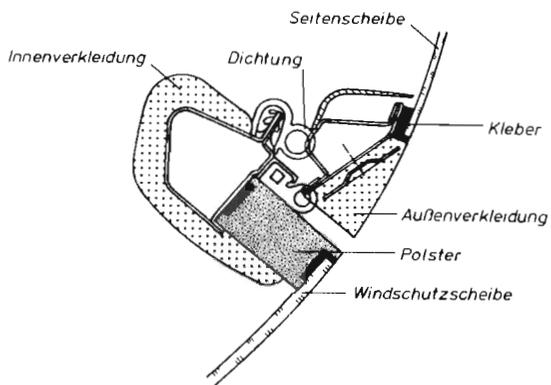


Bild 99: Schnitt durch den A-Pfosten.

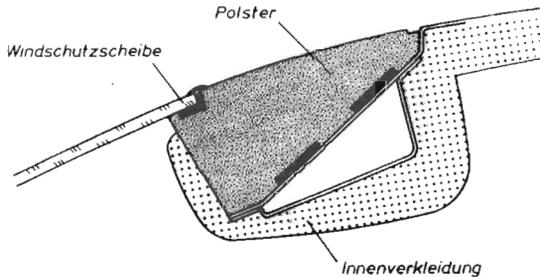


Bild 100: Schnitt durch die vordere Dachkante.

An der vorderen Dachkante (Bild 100) oberhalb der Frontscheibe wurde die Scheibenrahmenpolsterung verbreitert und mit der Dachkantenpolsterung zusammengefaßt. Infolge der weitgehenden Überdeckung durch Motorhaubenhinterkante und Frontscheibe sowie der Lackierung in Wagenfarbe war das Polster von außen nicht als solches zu erkennen.

Bild 101 zeigt den A-Pfosten des UNI-CAR nach dem Kopfaufprall eines Radfahrers bei einem Versuch mit 40 km/h. Deutlich sind der verformte Aluminium-Türrahmen und die Bruchlinien in der VSG-Frontscheibe zu erkennen, wobei sich das PUR-Polster darunter aber nicht bleibend deformiert hat. Die Dreieckscheibe ist wie bei thermisch vorgespanntem Glas typisch in viele Krümel zerfallen; diese hängen aber noch an einer Folie, die wie bei der Frontscheibe zum Schutz der Insassen angebracht wurde. Ein Nutzen auch für Äußere Verkehrsteilnehmer kann darin gesehen werden, daß die Folie die Glasreste aus dem Rahmen zieht, wenn die Scheibe durchschlagen wird. Der Körper kann so nicht auf eventuell stehengebliebene Bruchkanten schlagen.



Bild 101: A-Pfosten nach Kopfaufprall eines Radfahrers.

Für die nur bei geöffneter Tür bzw. Motorhaube sichtbaren Teile wäre ein Übergang auf den leichteren EA-Schaumstoff (Raumgewicht 100 bis 120 kg/m³) vorstellbar gewesen; bei Verwendung einer Lackfolie oder ähnlichen Oberflächenmaterialien auch für die Dachkante.

Vorversuche am Fallgewicht zeigten, daß die Glasscheibe in einer solchen Konstruktion nur einen geringen Einfluß auf die Kraft-Weg-Kennung hat, da sie bei einem Kopfaufprall zerbricht, bevor kritische Verzögerungen erreicht werden (Bild 113). Vergleichsversuche ohne Scheibe zeigten nur relativ geringe Unterschiede und diese nur in der ersten Phase des Kraftanstiegs. Bei Verwendung von Kunststoffscheiben waren die Belastungen dagegen erheblich höher. Erklären läßt sich dies damit, daß hier die Kräfte zu weit verteilt wurden, der Integralschaumstoff als Körper daher härter wirkte und das lokale Anbrechen der Scheibe und die

damit verbundene Kraftbegrenzung in diesem Falle nicht zum Tragen kam. Die Kunststoffscheiben lassen sich wegen der damit verbundenen geringeren Steifigkeit auch nicht so dünn machen, daß sie den gewünschten Sicherheitseffekt noch ermöglichen; abgesehen davon, daß für die von den Scheibenwischern abrasiv hochbelastete Scheibe derzeit nur Glas in Frage kommt.

Insbesondere bei Verwendung von halbhartem Integralschaum für den Scheibenrahmen dürfte dieser nicht zu vernachlässigende Schubkräfte auf die eingeklebte Scheibe übertragen und somit auch zur Versteifung der Karosserie beitragen. Der Trend zu immer dünneren, stärker gewölbten und damit weniger belastbaren VSG-Scheiben setzt der Einbeziehung der Frontscheibe in das Tragsystem der Karosserie ohnehin Grenzen, so daß ein bei Höchstbelastungen nachgebender und Kraftspitzen dämpfender Rahmen sich unter Umständen als positiv erweisen kann.

Das Polster bedeutete jedoch keine Einschränkung der Alltagsauglichkeit, da das Fahrzeug z. B. durchaus durch Druck auf die Glasscheibe geschoben werden konnte, ohne daß diese brach (siehe auch Kapitel A 1.2). Die Vermessung der Sichtwinkel bestätigte die Erfüllung aller gesetzlichen Anforderungen. Die höchstzulässigen Sichtverdeckungswinkel werden von UNI-CAR unterschritten. Die Rundumsicht beträgt mit $42,4^\circ$ binokularer Verdeckung 88,2 % und liegt in der gleichen Größenordnung wie zwei zum Vergleich gemessene Serien-PKW mit Werten von $36,8^\circ$ und $39,6^\circ$. Die auch aus Gründen der Aerodynamik sehr schräggestellten A-Pfosten führen mit $5,8^\circ$ zu gerade noch zulässigen Sichtverdeckungen, die aber, wie eine Untersuchung [45] der subjektive Bewertung mittels Fragebogen zeigte, zwar als gewöhnungsbedürftig, aber nicht als störend empfunden werden.

Bild 102 zeigt einen der ersten Entwürfe für den gepolsterten A-Pfosten aus der Lastenheftphase des UNI-CAR. Dabei sollte das Schaumstoffpolster nicht selbst lackiert, sondern durch eine Blende abgedeckt werden.

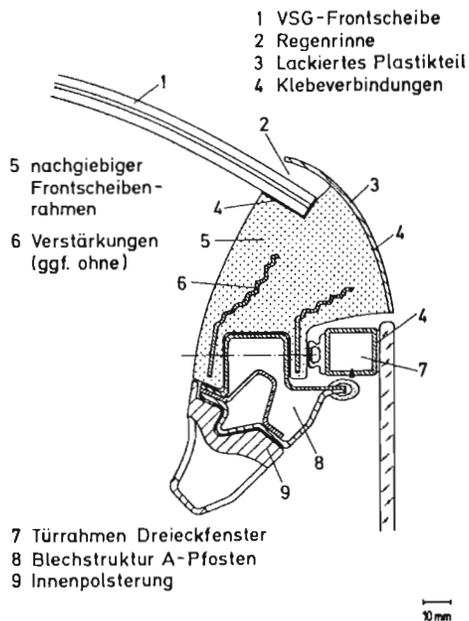


Bild 102: Erster Entwurf des A-Pfostens aus der Lastenheftphase des UNI-CAR.

Für den Insassenschutz wurde durch mehrere Versuche nachgewiesen, daß mit dieser Konstruktion der 50 km/h-Test gegen die Wand nach FMVSS 212 problemlos erfüllt werden kann, siehe die Bilder 103, 104 und 105.

Die Befestigung von Glasscheiben mit Klebe-Dicht-Massen auf PU-Basis gehört zum Stand der Technik (insbesondere

seit längerem in den USA) und setzt sich weiter gegen die konventionellen Klemmdichtungen durch. Wie Laboruntersuchungen bei erhöhter Temperatur, Feuchtigkeit und UV-Strahlung bestätigten, ist die Haftung der verwendeten Klebe-Dicht-Massen auf Glas, PUR wie auf Lack insbesondere bei Verwendung spezieller Primer gut. Wie bei allen Klebverfahren hängt hier jedoch viel von der Sorgfalt bei Vorbereitung und Durchführung der Montage ab (und gegebenenfalls von der Haftung des Lacks auf dem Untergrund).

Da die Anbringung von Zierleisten wegen des oberflächenbündigen Einbaus der Scheiben nicht erwünscht war, mußte der Scheibenrand im Bereich der Klebefuge mit einer UV-undurchlässigen keramischen Schicht bedruckt werden.

Einige Frontscheiben wurden mit einer Ausbauhilfe versehen. Ein elektrisch leitender Aufdruck konnte erhitzt werden und löste dann die Klebung, wodurch das Auswechseln der Scheibe ohne Beschädigung der Kunststoffteile möglich wurde. Da unzerstörte Scheiben in der Praxis allerdings selten ausgewechselt werden, ist der Nutzen für Großserienfahrzeuge durch diese Vorrichtung wohl gering. Das Heraustrennen der Scheiben mit einem scharfen Messer gestaltete sich während der Versuchsreihen einfach und problemlos. Eine wichtigere Frage wäre allerdings, ob Reparaturbetriebe ebenfalls stets die notwendige Sorgfalt bei den Vorbereitungen des Verklebens walten lassen und die ab Werk vorgesehenen Haftqualitäten bzw. überhaupt befriedigende Qualitäten bei Verarbeitung unter dem in Werkstätten üblichen Zeitdruck erreicht werden. Bei unsachgemäßem Lösen der Scheiben mit Hilfe von überhitzten Drähten oder ähnlichen aufgeheizten Schneidwerkzeugen können giftige Dämpfe frei werden; für die Praxis ist diese Frage wohl nicht bedeutend, da Temperaturen über 400°C erreicht werden müssen und dabei auch nur geringe Mengen entstehen dürften [1].



Bild 103: Vorversuch mit geklebter VSG-Scheibe auf Vorsatzrahmen und PUR-Integralschaumstoffstreifen.



Bild 104: Crash-Test entsprechend FMVSS 212 mit eingeklebtem Windschutzscheibenrahmen aus PUR-Integralschaum mit nicht angeschnallten Dummies.



Bild 105: Scheibenrahmenpolster nach Versuch mit 50 km/h
gemäß FMSS 212; Dummies nicht angegurtet.

Seitlich wurden die Türen bis an die Dachfläche gezogen, die Regenrinne in den entstehenden Spalt verlegt und Dachkante und Türrahmen gepolstert (Bild 106). Die Notwendigkeit dieser Maßnahme ergab sich aus einer Reihe von Versuchen sowie Untersuchungen realer Unfälle von Zweiradfahrern, die sehr häufig mit dem Kopf gegen diesen Bereich stoßen. Der geringe zur Verfügung stehende Bauraum ließ zwar keine auch bei 45 km/h Kollisionsgeschwindigkeit zufriedenstellende Lösung zu; durch die Dachkantenpolsterung seitlich wurde dem Zweiradfahrer beim Kopfaufprall ein zusätzlicher Deformationsweg zu dem durch den Helm schon vorhandenen zur Verfügung gestellt. Die Versuche zeigten später, daß die Kopfbelastungen noch zu hoch, aber deutlich niedriger als beim Vergleichsfahrzeug waren.

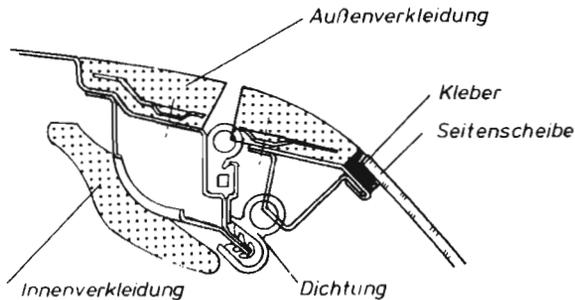


Bild 106: Schnitt durch den Dachrahmen.

Zur Anwendung kam hier ebenfalls ein Integralschaumstoff mit einem Raumgewicht von 300 kg/m^3 . Zur Verminderung der Schwindung und zum leichteren Ausgleich von Karosserietoleranzen bei der Montage wurden Einlegeteile mit Gewindestiften vorgesehen, die allerdings auch die Gefahr des Verzugs vergrößerten. Es wurde daher erwogen, auf eine Klebefestigung überzugehen, wodurch auch Dichtprobleme entfallen wären. Diese Dichtprobleme ergaben sich meist durch die unbefriedigende Abformung von schmalen, ringförmigen Erhebungen um die Befestigungsschrauben. Bei zu starkem Anziehen der Schrauben bildeten sich unruhige Oberflächen der Polsterleisten aus; bei mäßigem Anziehen drang Regenwasser in den Innenraum. Bild 107 zeigt einen der Versuche¹, mit denen die seitliche Dachkantenpolsterung getestet wurde.

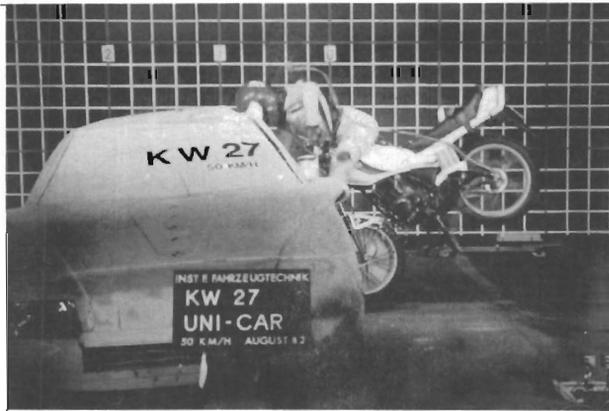


Bild 107: Versuch zur Dachkantenpolsterung mit Zweiradfahrdummy.

¹ Siehe [100], [101].

Bild 108 zeigt Vorstudien zur Dachrahmengestaltung aus der Lastenheftphase des UNI-CAR. Die zusätzlichen Polster haben einen relativ großen Raumbedarf, da hier eine Vielzahl von teilweise divergenten Entwicklungszielen wie Zweiradfahrerschutz, Kopffreiheit für Insassen, Zellenstabilität, Innenpolster für Insassen, Aerodynamik und Design zu erfüllen ist.

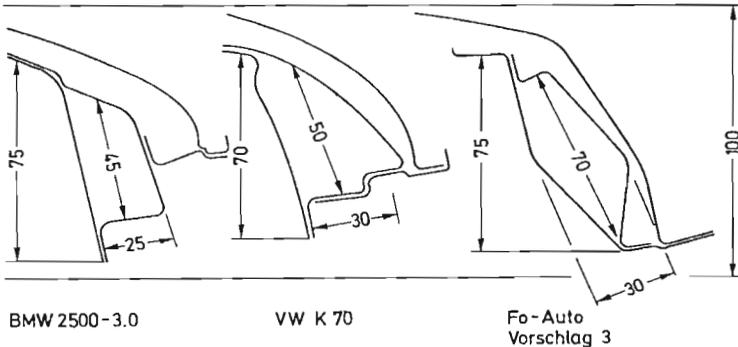
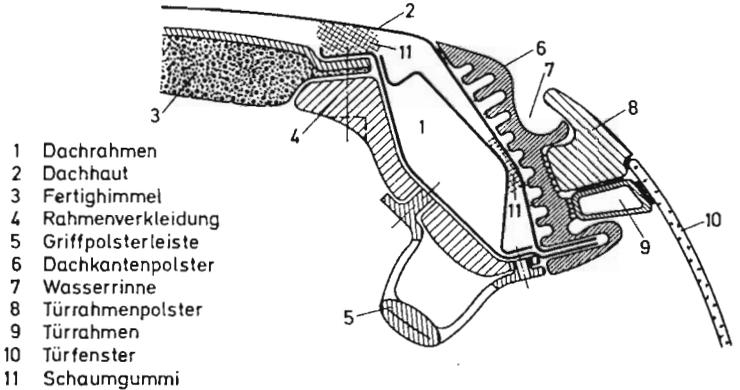


Bild 108: Frühe Entwicklungsstufe des Dachrahmens aus der Lastenheftphase.

A 1.1.4 Probleme und Erfahrungen mit den am UNI-CAR verwendeten Werkstoffen

Die Verwendung von Polyurethan im Kraftfahrzeugbau ist prinzipiell nicht neu. Beim UNI-CAR wurde nun der Versuch unternommen, sehr großflächige und großvolumige Teile, wie Frontteile oder Motorhaube, mit hohen Oberflächenqualitäts- und Sicherheitsansprüchen in relativ weichen Materialeinstellungen herzustellen.

Fertigungsversuche mit dem Frontteil hatten gezeigt, daß die Dicke der PUR-Haut und deren Konsistenz sich derart beeinflussen, daß die gestellten Forderungen für den Fußgängerschutz nach einer möglichst weichen und dünnen elastischen Haut mit lackierfähiger, von Poren und Welligkeiten freier Oberfläche nicht gleichzeitig erfüllt werden konnten. Eine gute Formfüllung erfordert einen ausreichenden Fülldruck; damit ergeben sich ein bestimmtes Mindestraumgewicht und entsprechende Materialeigenschaften. Die verfügbaren Werkstoffe (mikrozelluläre PUR-Elastomere der Bayer AG, Leverkusen; darunter die Bayflex-Versuchsprodukte VP PU 1900 B mit Desmodur VP PU 0534 sowie Bayflex VP PU 1935 AT mit Desmodur PA 100 bei der weicheren Ausführung) ließen sich zwischen 0,7 und 1,1 kg/dm³ variieren; die Wanddicke mußte wegen der hohen Kosten für sonst notwendige weitere Schäumwerkzeuge fest bleiben. Die Werkzeugkonstruktion setzt dabei hinsichtlich der Auslegung der Einspritzkanäle und Entlüftungsbereiche viel Entwicklungsarbeit und Erfahrung voraus. Ein perfektes Serienteil, wie es ein erfahrener Verarbeitungsbetrieb später herstellen könnte, konnte aus Zeit- und Kostengründen nicht erreicht werden und war auch nicht beabsichtigt, da hier eine nach speziellen Gesichtspunkten ausgewählte Materialvariation in Zusammenarbeit mit dem Rohstoffanbieter auf die Eignung für den Einsatz als Sicherheitselement erprobt werden sollte. Bei Verwendung anderer Werkstoffe wären entsprechende Probleme ebenfalls zu erwarten gewesen.

Auch bezüglich des Schwindungsverhaltens der verwendeten PUR-Schaumstoffe konnten einige Probleme wegen der vergleichsweise geringen Zahl der Versuchsteile und der aus Kostengründen vorgegebenen Beschränkung auf Kunststoffwerkzeuge nicht zufriedenstellend gelöst werden. Geht man z. B. von einer mittleren Schwindung von 1,5 % (gemessen bei 6 % Kurzglasfaseranteil, Bayflex 70-Haut allein 1,2 %) am Frontteil aus, erhält man nicht nur Maßabweichungen bis zu 3 cm, die durch ein dementsprechend proportional vergrößertes Werkzeug ausgeglichen werden könnten, sondern auch einen Verzug, der sich durch unterschiedliche Materialdicken und die Formgebung des Teils ergibt und entsprechende Werkzeugauslegung verlangt. Ebenso können auch Einlegeteile zur Befestigung, Verstärkung oder Schwindungsminderung zum Verzug beitragen. Beachtet werden muß insbesondere bei Faserverstärkung auch ein unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizient in und quer zur Fließrichtung [102].



Bild 109: Konturabweichungen Soft-Nose / Haube.

Besonders problematisch ist die Fertigung von Teilen, die in den Strak der Karosserie passen, d.h. sich nahtlos in die Fahrzeugaußenhaut einfügen sollen. Bei den sehr großen Formteilen, wie Frontteil und Motorhaube, war eine Übereinstimmung der Anschlußkonturen bisher nur mit Nacharbeiten zu erreichen, siehe Bild 109. Das gilt ebenso für den Übergang Haube - Außenspiegel - Tür. Bei aneinanderstoßenden, hochglanzlackierten Flächen fallen sehr leicht schon die kleinsten Abweichungen von Krümmungsradien, Oberflächenstrukturen oder Winkeln ins Auge. Befriedigende Lösungen sind hier äußerst schwierig, wenn keine Schattenfugen, Narbungen oder Farbabsätze vorgesehen werden können. Die Verwendung von Kunststoffaußenteilen muß daher schon im Karosseriedesign besonders berücksichtigt werden.

Eine kunststoffgerechte Konstruktion sollte allerdings nach Meinung der Kunststoffverarbeiter ohne Lackierung auskommen. Das darf natürlich nicht dazu führen, daß die Teile nun derart durchgefärbt werden, daß dadurch der Verbrauch der meist relativ teuren Farbpigmente (Größenordnung 150,- DM pro Kilogramm) überproportional steigt; abgesehen davon ist die Auswahl an ausreichend witterungsbeständigen Werkstoffen und Füllstoffen und damit die Gestaltungsfreiheit begrenzt. Bei Teilen mit hohen Wanddicken wäre der Anteil der Pigmente im Lack geringer als im Kunststoff, bei einseitigen oder Teillackierungen dürfte die Lackierung noch günstiger werden und ermöglicht zudem die Verwendung von Regenerat.¹

Die Lackierung insbesondere der weichen PUR-Karosserieteile warf weitere Probleme auf, da nicht nur eine geschlossene Haut benötigt wird, sondern sich auch unter der Oberfläche keine Lunken oder sonstigen Fehler befinden dürfen. Diese würden sich nach dem Einbrennen des Lacks auch bei vergleichsweise geringen Temperaturen durch Einfallstellen und unruhige Oberflächen bemerkbar machen. Es muß außerdem

¹ Siehe auch [103].

darauf geachtet werden, daß keine in das Werkstück eindiffundierten Lösungs- oder Trennmittel Blasen oder Verfärbungen im Lack hervorrufen können. Problematisch sind ebenfalls die Langzeiteigenschaften von elastischen Spachtelmassen für die Nacharbeiten.

Der hohe Aufwand im Oberflächenfinish von lackierten PUR-Teilen ist einer der größten Kostennachteile dieses Materials. Die Nacharbeitsquoten sind deutlich höher als z. B. bei Spritzgußteilen und bedeuten oft, daß die Teile per Hand geschliffen und gespachtelt werden müssen, wodurch die Kosten hochgetrieben werden [38]. Da das Material nicht weiterverarbeitet werden kann, sind Ausschussteile Abfall.

- Erfahrungen mit weiteren Kunststoffteilen

Neben den vornehmlich für die Fußgänger- und Zweiradfahrersicherheit konzipierten Kunststoffelementen besitzt das UNI-CAR noch einige weitere ähnlich aufgebaute Karosserieteile. Dies sind z. B. die seitlichen Rammschutzleisten und die hintere Radabdeckung. Während die Rammschutzleisten weitgehend bekannten Serienkonstruktionen entsprechen - PUR-RRIM mit Aluminiumeinlagen - wurden die Radabdeckungen ohne jegliche metallische Verstärkungen gefertigt und mit Polyamid-Klemmen befestigt. Es zeigte sich jedoch trotz des hohen Glasfaseranteils von bis zu 30 % ein sehr starker Verzug der Teile.

Der hintere Stoßfänger besteht ebenfalls wie schon ähnlich in Serie befindliche Ausführungen aus einer PUR-RRIM-Haut mit energieabsorbierender Schaumeinlage. Hier gab es dementsprechend auch trotz Glanzlackierung keine nennenswerten Qualitätsprobleme. Nicht übersehen werden darf dabei allerdings, daß die Vorarbeiten zur Lackierung Handarbeit waren und kleinere Oberflächenfehler gespachtelt und verschliffen wurden; ein auf die Großserie nicht zu übertragender Aufwand.

A 1.2 DIMENSIONIERUNG UND ERPROBUNG VON SICHERHEITSELEMENTEN AM BEISPIEL DES UNI-CAR

Soft-Face, Haube und Scheibenrahmen wurden bereits ab Beginn der Vorkonstruktionsphase hinsichtlich ihrer Wirksamkeit in Vorversuchen erprobt und dazu an einer Fallgewichtsanlage (Bild 110) dynamisch getestet.¹

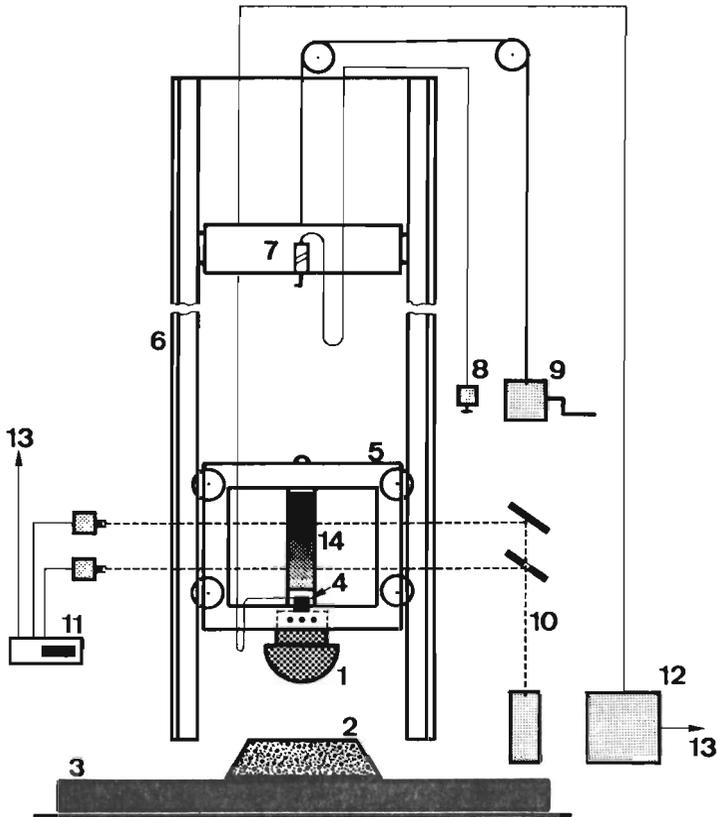
- Versuchsaufbau

Dazu soll kurz anhand Bild 110 der Aufbau dieser Versuchseinrichtung erläutert werden:

Ein Prüfkörper (1) ist an einem Führungsschlitten (5) aus Aluminiumprofilen befestigt. Dieser wird durch vier Rollen in zwei zehn Meter langen, senkrecht stehenden T-förmigen Stahlschienen (6) reibungsarm geführt und ist durch eine elektromagnetische Kupplung mit einem zweiten Schlitten (7) verbunden, der durch eine Winde (9) in die Höhe gezogen werden kann. Durch Entriegelung der Kupplung mit dem Fernauslöser (8) fällt der Führungsschlitten mit Prüfkörper, in den beiden Schienen geführt, mit Erdbeschleunigung auf eine Stahlplatte (3). Diese leitet die auftretenden Kräfte in den Boden ein und kann als nicht verformbar angesehen werden. Die Versuchsteile (2) werden möglichst symmetrisch im Aufprallpunkt des Prüfkörpers auf diese Platte gelegt, um möglichst geringe Kräfte quer zu den Führungsschienen zu erhalten, die die Meßergebnisse beeinflussen könnten.

Aus der Energiebeziehung $1/2 m v^2 = m g h$ ergibt sich die notwendige Aufzugshöhe h des Prüfkörpers für eine bestimmte Geschwindigkeit zu $h = v^2 / 2 g$. In der Praxis müssen dazu noch die von der Führung verursachten Widerstände berücksichtigt werden.

¹ Siehe auch [10], [104], [105], [106], [107].



- | | |
|---|----------------------------|
| 1 Prüfkörper | 2 Versuchsteil |
| 3 Grundplatte | 4 Beschleunigungsaufnehmer |
| 5 Führungsschlitten | 6 Führungsschienen |
| 7 Zug- und Auslösevorrichtung | 8 Fernauslöser |
| 9 Winde mit Zählwerk | |
| 10 Laserlichtschranke mit Strahlenteiler und Fotosensoren;
ebenso Laser-Weggeber (horizontale Strahlanordnung, 90°
gedreht) | |
| 11 Stoppuhr bzw. bei Weggeber logarithmischer Verstärker | |
| 12 Verstärker bzw. Meßwertspeicher | |
| 13 Verbindung zum Rechner | |
| 14 Graukeil | |

Bild 110: Aufbau der Fallgewichtsanlage.

Die Aufprallgeschwindigkeiten lagen, um den gesamten relevanten Bereich abzudecken, zwischen 12,5 km/h und 45 km/h. Der halbkugelförmige Prüfkörper, der den Kopf simulierte, hatte einschließlich des Führungsschlittens ein Gewicht von 5,0 kg und einen Durchmesser von 150 mm, siehe Bild 111. Dadurch war eine Vergleichbarkeit mit früheren Materialuntersuchungen [104] gegeben. Mit einem weiteren, zylinderförmigen und 30 kg schweren Prüfkörper (entsprechend einem Oberschenkel plus anteiliger Körpermasse) konnten mit Aufprallgeschwindigkeiten um 50 km/h Energien bis zu 3000 Nm aufgebracht werden.

Nach den ersten Versuchsreihen wurde, um in Analogie zur amerikanischen Kraftfahrzeugsicherheitsnorm FMVSS 201 mit Insassentests vergleichbare Daten zu erhalten, das Kopfgewicht auf 6,8 kg (15 pound) erhöht und der Durchmesser auf 165 mm (6,5 inch) erweitert. Die zunächst als Auslegungskriterium gewählte Aufprallgeschwindigkeit des Kopfes von 30 km/h wurde demzufolge auch auf 24 km/h (15 mph) verringert (entsprechend die kinetische Energie von 173 auf 151 Nm).

Die Beschleunigung (Verzögerung des Prüfkörpers) wurde mit einem piezoresistiven Beschleunigungsaufnehmer gemessen. Die einachsigen Aufnehmer gaben in Brückenschaltung eine Spannung von 0.2 mV/g bei einem Meßbereich von \pm 750 g ab. Die Meßspannung wurde mit dem Faktor 50 verstärkt und dem Digitalrechner zugeführt. Durch einen Nullpunktsabgleich bei Meßbeginn wurde die auf den momentan frei fallenden Aufnehmer wirkende Erdbeschleunigung zunächst nicht erfaßt und deshalb 1 g von den Meßwerten subtrahiert, aus denen dann Geschwindigkeit, Eindringtiefe, Energieabsorption, HIC (Head Injury Criterion, eine mathematische Bewertungsgröße für die erlittene Beschleunigung), Kraft und die Kraft-Weg-Kennung berechnet wurden.



Bild 111: Modell des Scheibenrahmens unter dem Fallgewicht.

Zur Ermittlung der Aufprallgeschwindigkeit wurde die Zeit gestoppt, die der Schlitten mit Prüfkörper benötigte, um im Abstand von 100 mm montierte Lichtschranken zu passieren. Deren Schaltimpulse wurden zum Starten der Meßwertaufzeichnung durch den Rechner benutzt und für Kontrollzwecke ebenfalls auf Magnetband gespeichert.

Um die Eindringtiefe sofort erkennen zu können und eine Kontrolle der später errechneten Werte zu ermöglichen, wurde bei einigen Versuchen der Weg des Prüfkörpers durch eine einfache Kratzvorrichtung gemessen. Eine Metallspitze, die am Schlitten befestigt war, schiff über eine

lackierte Fläche. Die Höhe des Prüfteils wurde vorher dort markiert.

Da der Aufprallvorgang im Millisekundenbereich liegt und somit für das Auge nicht erkennbar ist, wurden einige Versuche mit mehreren Hochgeschwindigkeitskameras gefilmt. Die Zeit zwischen Aufprall und Bruch der Scheibe ließ sich allerdings auch mit 1000 Bildern pro Sekunde nicht ausreichend genau ermitteln. Als Problem kam hinzu, daß sich bei der dazu notwendigen Beleuchtungsstärke die Prüfkörper unzulässig erwärmten.

- Energieabsorption

Die aufgetretenen Kräfte wurden aus der Beziehung

$$F(t) = m a(t)$$

errechnet, wobei m das Gewicht des Prüfkörpers und $a(t)$ der gemessene Beschleunigungsverlauf über der Zeit ist. Die absorbierte Energie läßt sich prinzipiell aus

$$E_{\text{abs}} = \oint F ds$$

bestimmen, da die Fläche innerhalb der Hysteresekurve dieser Energie entspricht. Dieses war jedoch mit dem verwendeten Rechenprogramm nicht ohne weitere Rechenschritte möglich, da die Kraft-Weg-Kennung nicht in Wertepaaren vorlag, sondern allein durch Übereinanderauftragen der Achsen erzeugt wurde.

Die vom Prüfteil aufgenommene Energie, die in Verformungsarbeit und Wärme umgesetzt wurde, kann man ebenso aus der Energieerhaltung ermitteln:

$$E_{\text{abs}} = E_{\text{vor}} - E_{\text{nach}} ,$$

E_{vor} = Energie unmittelbar vor dem Aufprall,

E_{nach} = Energie beim Lösen vom Prüfteil.

Die relative Energieaufnahme in Prozent ist dann

$$E_{\text{abs}} = \frac{E_{\text{vor}} - E_{\text{nach}}}{E_{\text{vor}}} \cdot 100 (\%);$$

$$\text{mit } E = 1/2 m v^2 ;$$

$$E_{\text{abs}} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{v_1^2} \cdot 100 (\%),$$

v_1 = Geschwindigkeit unmittelbar vor dem Aufprall,

v_2 = Geschwindigkeit unmittelbar nach dem Ablösen.

Bild 112 zeigt die von den Scheibenrahmenpolstern absorbierte Energie über der Aufprallgeschwindigkeit. Man sieht, daß die Energieabsorptionsfähigkeit des Schaumstoffes bei höherer Geschwindigkeit wieder sinkt, was auf das Erreichen der Blocklänge zurückzuführen ist.

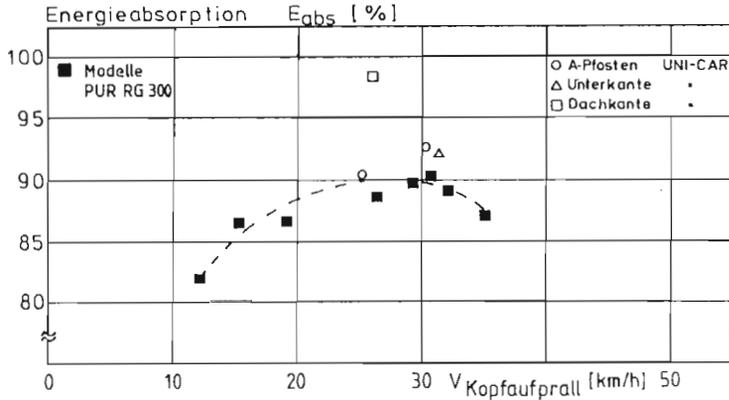


Bild 112: Absorbierte Energie verschiedener Frontscheibenrahmenpolster in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit.

- Bauteilgestaltung und Werkstoffvorauswahl

Zunächst wurden nur sehr einfache Modelle gebaut, die in etwa die Abmessungen bzw. ähnliche Querschnitte wie die endgültigen Teile hatten. Mit ihrer Hilfe sollte zunächst eine Vorauswahl der als geeignet erscheinenden Werkstoffe getroffen und das Ausreichen der vorgesehenen Deformationswege überprüft werden. So wurden beispielsweise für die Prüfung am Fallgewicht als Modelle von Frontscheibenrahmenpolsterungen Scheiben der Größe 30 cm x 30 cm auf PUR-Profile, die aus vorhandenen Blöcken entsprechend zurechtgeschnitten wurden, geklebt. Dazu wurde die auch für die UNI-CAR-Prototypen vorgesehene Klebe-Dicht-Masse verwendet. Die Scheiben bestanden aus Verbundsicherheitsglas (Sekuriflex), 4,0 mm bzw. 5,3 mm stark, das auf der Innenseite mit einer Kunststoff-Folie ("Sekurex"-Folie) versehen war, wodurch Schnittverletzungen der Insassen vermieden werden sollten.

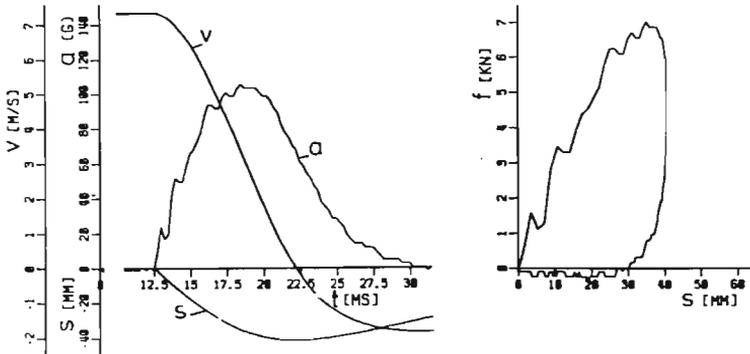


Bild 113: Deformationskennung der Windschutzscheibenrahmenpolsterung unten im Vorversuch (Beschleunigung a , Geschwindigkeit v , Deformation s , Zeit t , Kraft f) (HIC: 605).

Einige ergänzende Versuche wurden mit Polycarbonat- und Acrylglasplatten gemacht.

Bild 113 zeigt exemplarisch den Zeitverlauf von Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg beim Aufprall auf ein Modell des Scheibenrahmens sowie eine daraus errechnete Kraft-Weg-Kennnung.

Das Prinzip der Energieabsorption besteht darin, daß beim Aufprall des Fußgängerkopfes zunächst die Scheibe birst und danach der PUR-Schaum komprimiert wird. Im Diagramm (Bild 114) ist der HIC als Funktion des Raumgewichts in kg/m^3 verschiedener getesteter Materialversionen aufgetragen. Es zeigte sich, daß bei dem begrenzten Weg (50 - 60 mm), der im Bereich der A-Säulen und der vorderen Dachkante zur Verfügung stand, bei Verwendung von elastischem Integralschaum mit einem Raumgewicht von

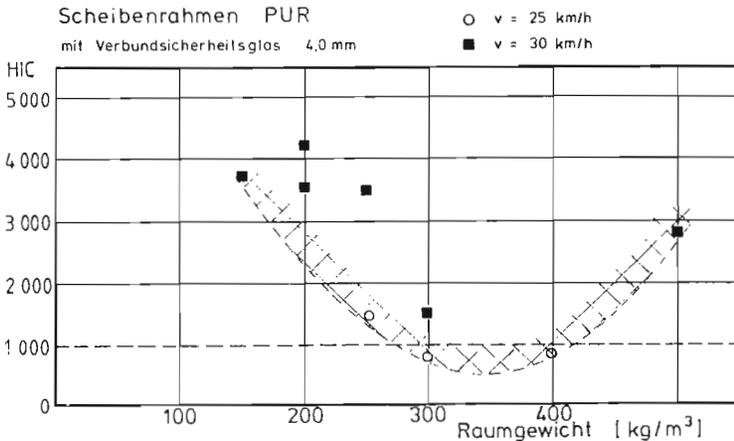


Bild 114: Head-Injury-Criterion (HIC) in Abhängigkeit vom Raumgewicht des als Scheibenrahmenpolster verwendeten Integralschaums.

300 kg/m³ die niedrigsten Belastungswerte erreicht wurden. Die Blocklänge, die entspricht der Dicke des zusammengedrückten Schaumes, betrug ca. 5 mm.

Bei niedrigerem Raumgewicht, dieses entspricht einem geringeren Kraftanstieg, kommt es schon bei geringerer Aufprallgeschwindigkeit zum Durchschlag auf die A-Pfostenstruktur. Bei höherem Raumgewicht wird die Steifigkeit so hoch, daß ebenfalls erträgliche Beschleunigungswerte sowie der HIC-Grenzwert überschritten werden.

- Deformationswege

Die notwendige Stärke der energieabsorbierenden Elemente der Karosserie ergab sich als Kompromiß aus den von Biomechanik und Unfallforschung bekannten Anforderungen und den realisierbaren Dimensionen am Fahrzeug.

Bei simulierten Fahrzeug-Fußgänger-Unfällen hat sich gezeigt, daß die Kopfaufprallgeschwindigkeit der Dummies auf die Motorhaube bei Karosseriekonturen ähnlich dem UNI-CAR in der gleichen Größenordnung wie die Kollisionsgeschwindigkeit liegt. Bild 115 zeigt die Verhältnisse am UNI-CAR und dem Vergleichsfahrzeug (gewonnen aus insgesamt 38 Versuchen, bei denen die Fälle ohne Kopfaufprall hier aber nicht berücksichtigt wurden).

Dies gilt auch für die Kopfaufprallgeschwindigkeit auf die Windschutzscheibeneinfassung, wie die Filmauswertungen bestätigten.

Am UNI-CAR wurde die Frontscheibe von außen auf die energieaufnehmenden Kunststoffquerschnitte entlang des Rahmens geklebt. Hiermit wird eine optimale Anpassung dieser Sicherheitsmaßnahme an die äußere Form des gesamten Fahrzeugs erreicht, und aerodynamische Nachteile einer wulstartigen Polsterung werden vermieden. Damit sind jedoch

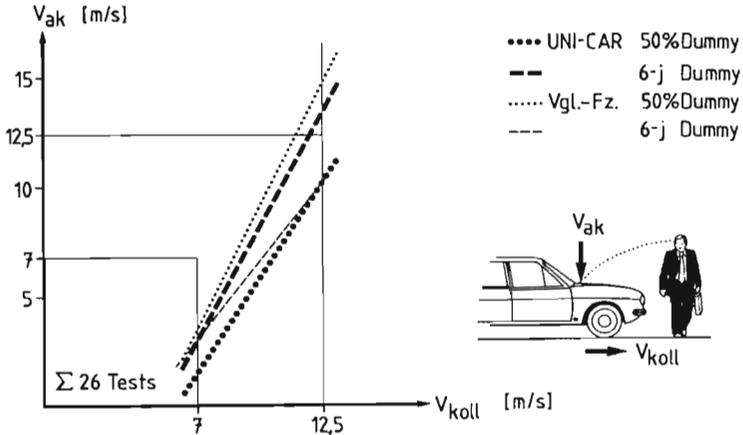


Bild 115: Kopfaufprallgeschwindigkeit bei verschiedenen Fahrzeugtypen über der Kollisionsgeschwindigkeit.

Verringerungen des Querschnitts der Blechstrukturen des A-Pfostens und der Dachkante verbunden. Durch Ablösung der konventionellen 12 bis 18 mm breiten Punktschweißflansche (z. B. durch von präzise gesteuerten Robotern schutzgasgeschweißte Profile) oder bei Verwendung von hochfesten Stählen wäre dies ohne Einbußen der Stabilität der Karosserie möglich.

Eine Vergrößerung der Querschnitte durch die Polsterung würde die Sichtwinkel, sowie die nicht zu unterschätzende ungünstige psychologische Wirkung des dann stärker in den Innenraum ragenden A-Pfostens und den Einstiegskomfort gegenüber konventionellen Pkws mehr als vertretbar verschlechtern.

Bei einer mittleren erträglichen Kopfbeschleunigung von 65 g (angesetzt wurde ein realen Verläufen ähnlicher Halbsinus über 30 ms mit a_{max} ca. 90 g, HIC = 1000) und

einer Arbeitsaufnahme der Polsterung von 2/3 des theoretisch Möglichen einer rechteckigen Kraft-Weg-Kennung) ließ sich ein Deformationsweg von mindestens 50 mm abschätzen.

Doppelt so große Deformationswege wären zwar besser, sind aber aus den genannten Gründen kaum zu realisieren. Um so wichtiger war daher die Optimierung der Steifigkeit des Schaumstoffes über Grundstoff und Raumgewicht, um die gewünschte hohe Energieaufnahme bei voller Ausnutzung des Weges zu erreichen.

- Werkstoffkonsistenz

Zur Senkung der Verzögerungswerte, die beim Aufprall auf den Kopf wirken, ist die "Härte" des Kunststoffes entscheidend, d. h. der Widerstand gegen die aufprallende Masse. Für jeweils eine bestimmte chemische Zusammensetzung kann bei den verwendeten PUR-Schaumstoff-Systemen das Raumgewicht in kg/m^3 als ein Maß dafür angesehen werden. Ist das Raumgewicht niedrig, so ist der Stoff "weich" und wird bei Belastung sehr schnell auf seine Blocklänge zusammengedrückt, wodurch ein sehr starker Kraftanstieg bewirkt wird. Die darunter liegende Blechstruktur stützt die hohen Kräfte ab, und eine Verbesserung gegenüber einer normalen Scheibeneinfassung wird nicht erreicht. Ist der Stoff "hart", also das Raumgewicht hoch, wird er sich beim Aufprall weniger, als es der zur Verfügung stehende Raum zulassen würde, verformen und somit weniger Energie aufnehmen, so daß auch hier keine ausreichende Verbesserung auftritt.

Die optimale Version wird vom Raumgewicht her zwischen "hart" und "weich" liegen: der Kraftanstieg ist schwächer als bei der zu harten Einstellung. Die Deformation erreicht fast die Blocklänge und nutzt die zur Verfügung stehenden Wege gut aus.

Die Versuchsreihen zeigten, daß mit den verfügbaren PUR-Intergralschaumstoffen bei einer im A-Pfostenbereich tolerierbaren Polsterdicke und optimiertem Schaumstoff eine maximale Kopfaufprallgeschwindigkeit von ca. 8,0 m/s erreicht werden konnte, ohne den für derartige Belastungen am häufigsten herangezogenen biomechanischen Grenzwert HIC 1000 zu überschreiten (Bild 116). Die Energieaufnahme hätte mit halbharten Schaumstoffen noch gesteigert werden können, diese schieden wegen der mangelnden Lackierbarkeit hier jedoch zunächst aus.

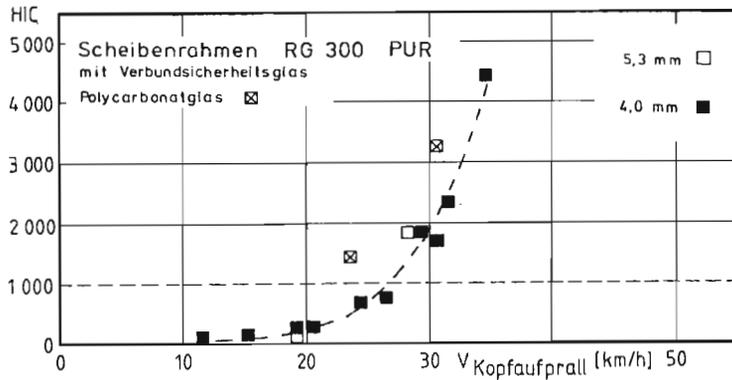


Bild 116: Head-Injury-Criterion (HIC) in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit auf verschiedene Scheibenrahmen.

- Motorhaube

Entsprechend wurde auch für die Motorhaube vorgegangen. Hierbei liegen die Zielkonflikte für die Dicke der Polsterung in der Aerodynamik sowie in der Vermeidung höheren Gewichtes dieser Hauben gegenüber Blechversionen trotz des gewünschten großen Schaumstoffvolumens.

Für die maximal abzudeckende Kopfaufprallgeschwindigkeit von 45 km/h, die sich aus Erkenntnissen der Unfallforschung ergab, lassen sich Deformationswege von mindestens 120 mm ableiten, die jedoch auch aus der Gesamtverformung der Haube und der Scharniere und nicht allein aus der Komprimierung des Materials resultieren können. Für eine starre Unterlage wäre bei einer Blocklänge von einem Drittel eine Gesamtdicke von mindestens 160 mm erforderlich gewesen, die sich schwerlich hätte realisieren lassen. Der Kompromiß fand sich in einer ca. 50 mm starken Grundfläche, bis zu 70 mm starken Verstrebungen und entsprechenden Freiräumen zum Motor und den anderen unnachgiebigen Teilen im Vorderwagen. Bild 117 zeigt für verschiedene Versionen der Haube die Belastungswerte.

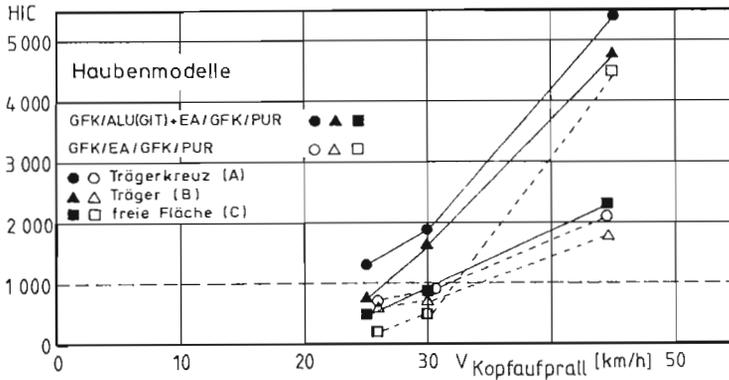


Bild 117: Head-Injury-Criterion (HIC) in Abhängigkeit der Aufprallgeschwindigkeit bei verschiedenen Motorhaubenversionen.

Für den Forschungs-Pkw standen eine EA-Schaumstoff-Version mit einem Traggerüst aus Aluminium und eine Version aus zwei Lagen glasfaserverstärkten Epoxidharzes und einer

dazwischenliegenden energieaufnehmenden Schicht zur Diskussion. Beide waren mit einer zähelastischen Deckhaut aus Integralschaumstoff versehen.

Diese Haubentypen wurden zunächst als Teilmodelle mit den Maßen 50 cm x 50 cm aus einem selbstgefertigten Schäumwerkzeug untersucht. Die Trägerstruktur wurde durch eine T-förmige Verstärkung dargestellt, siehe Bild 118.

Für die Tests wurden Modelle folgender Ausführungen mit und ohne verschiedene Aluminiumeinlagen gewählt:

- EA-Schaumstoff, verschiedene Materialeinstellungen,
- EA-Schaumstoff mit relativ fester PUR-Deckhaut,
- Traggerüst aus Aluminiumblech (0,5 mm) mit EA-Schaumstoff umschäumt und PUR-Deckhaut,
- Traggerüst aus Aluminiumgitterlochblech (0,5 mm) mit EA-Schaumstoff voll umgeschäumt, PUR-Deckhaut,
- dito ohne PUR-Deckhaut,
- dito mit zusätzlich eingelegter Papprolle zur Schaffung eines Hohlraums im EA-Schaumstoff des Trägers,
- zwei Lagen glasfaserverstärktes Epoxidharz, unterschiedlicher EA-Schaumstoff, mit Verstärkung aus Aluminiumgitterlochblech (0,5 mm), Deckhaut aus PUR-Integralschaumstoff (RG 300 kg/m³), Gesamtgewicht variiert von 3120 g bis 3650 g,
- zwei Lagen glasfaserverstärktes Epoxidharz, dazwischen unterschiedlicher EA-Schaumstoff ohne Aluminiumverstärkung, Deckhaut aus PUR-Integralschaumstoff (RG 300 kg/m³), Gesamtgewicht variiert von 1900 g bis 3000 g,
- Modell einer Stahlblechhaube mit vertikal nachgiebigen Versteifungsträgern.

Alle Haubenmodelle wurden jeweils an an einem Trägerkreuz, in Trägermitte und auf der freien Fläche zwischen den Trägern getestet.

Zu Vergleichsuntersuchungen wurden verschieden modifizierte Hauben eines Serienfahrzeugs mit ähnlichen Abmessungen wie beim UNI-CAR in Originalgröße geprüft:

- eine Serien-Motorhaube aus Blech,
- eine Serien-Motorhaube mit EA-Polsterung und PUR-Oberfläche,
- zwei Kunststoff-Sandwichhauben gleicher Form (GFK/EA/GFK/PUR-Integralschaumstoff),
- zwei Kunststoff-Sandwichhauben gleicher Form (GFK/EA/GFK/In-Mould-Coating).

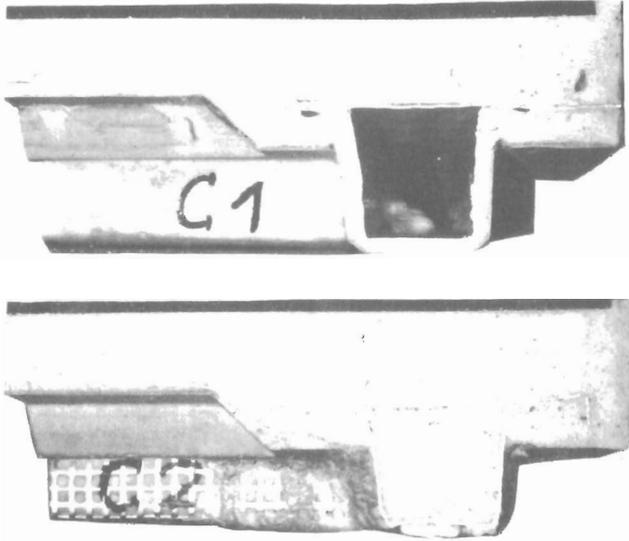


Bild 118: Versuchsmodelle für Motorhauben aus verschiedenen PUR-Einstellungen.

Die Aufprallgeschwindigkeiten lagen in Analogie zu den Scheibenrahmen-Versuchsreihen zwischen 12,5 km/h und 45 km/h; das Gewicht des Prüfkörpers (Kopf) betrug 5,0 kg.

Bei den beiden Vollkunststoffhauben (GFK/EA/GFK/IMC und GFK/EA/GFK/PUR) wurden bis 25 km/h erträgliche Beschleunigungen im Bereich der Träger und bis 30 km/h in den

Bereichen der freien Flächen ermittelt. Die Version GF/EA/GF/IMC ergab bei 45 km/h ein HIC von 939 mit einer Eindringtiefe von 115 mm. Dieser Weg ist in der Realität nur möglich, wenn die Haube genügend Raum zur Durchbiegung hat, d. h. es dürfen keine Teile des Motors, der Zusatzaggregate oder der Karosseriestruktur die Durchsenkung behindern.

Die kleineren Haubenmodelle wurden mit 25 km/h getestet und ergaben bei allen Prüfstellen (Trägerkreuz, Träger, freie Fläche) HIC-Werte unter 1000 bei Verzögerungsspitzen zwischen 75 g und 140 g. Erkennbar waren generell höhere Werte beim Trägerkreuz als beim einfachen Träger und diese wiederum höher als bei der Freifläche. Diese stellte auch die größten Deformationswege zur Verfügung.

Die mit Aluminiemeinlagen versehenen Haubenmodelle (GFK/EA+AL/GFK/PUR) überschritten schon bei 25 km/h die zulässigen Grenzwerte. Nur die freie Fläche ergab ein HIC unter 1000. Diese Konstruktion müßte also dahingehend abgeändert werden, daß die Träger zwar noch ausreichende Spannungen zur Aufnahme von Torsions- und Biegebelastungen übertragen können, bei Beaufschlagung von oben aber nachgeben.

Die Haubenmodelle (GFK/EA/GFK/PUR) ohne Aluminiemeinlagen ergaben bei allen Prüfstellen bis zu einer Aufprallgeschwindigkeit von 30 km/h erträgliche Beschleunigungen. Derartige Hauben entsprechen auch vom Gewicht her (1900 g im Vergleich zu 3600 g) den Anforderungen besser. Allerdings muß sichergestellt werden, daß eine ausreichende Steifigkeit im geöffneten Zustand gegeben ist.

A 1.3 TECHNOLOGISCHE PROBLEME

A 1.3.1 Einflußfaktoren auf Deformationskennungen

Die Eigenschaften eines Materials, die für seine Eignung als Polster ausschlaggebend sind, hängen von einer Vielzahl von Faktoren ab, die nicht nur von seiner Gestalt und mechanischen Kennwerten wie dem Elastizitätsmodul, sondern auch von den Umweltbedingungen, der Art und der Zeitdauer der Belastung beeinflußt werden. Im folgenden sollen diese Faktoren nach Gesichtspunkten des praktischen Vorgehens eingeteilt und beschrieben werden.

- Vom Werkstoffaufbau abhängige Faktoren

Der Aufbau des Materials wird vom Konstrukteur oder Anwender, wenn nicht ohnehin als vorgegeben bzw. ansatzmäßig festgelegt, meist als schwierig beeinflussbare Herstellungs-, weniger als Anwendungsfrage angesehen. Das Material wird in der Regel vom Hersteller verarbeitungsfertig angeboten und dann charakterisiert z. B. nach:

- Elastizität,
- Steifigkeit,
- Festigkeit,
- Homogenität,
- Füll-/Verbundstoffe.

Gerade bei den Kunststoffen ist es wegen der unüberschaubaren Vielzahl von Stoffen und Anwendungsfällen selten möglich, für eine ganz spezielle Konstruktion eine ebenso gezielte Materialherstellung zu betreiben. Man muß sich daher in der Regel darauf beschränken, einen offenbar geeigneten Grundstoff in verschiedenen Einstellungen zu testen, d. h. die Rückkopplung reicht nur bis zu den anwendungstechnischen Abteilungen der Rohstoffhersteller,

selten bis in die chemische Grundlagenforschung. Dem Anwender bleibt es dann überlassen, über Gestaltung, Füll- bzw. Verstärkungstoffe und Homogenität oder gezielte Dichtesteuerung die mechanischen Eigenschaften seinen Anforderungen anzupassen.

Probleme ergeben sich weiterhin, wenn die erreichten Eigenschaften nicht in ausreichend engen Grenzen konstant bleiben. Bei den hier behandelten Polsterelementen zählen als Kriterien für die Deformationskennungen z. B. dazu:

- Beanspruchungsgeschwindigkeit,
- Temperatur,
- Alterung.

- Geschwindigkeitseinfluß

Das plastische Verhalten von Kunststoffen hängt in der Regel weit stärker von der Verformungsgeschwindigkeit ab, als dies bei Metallen der Fall ist. Bei massiven, homogenen Stoffen lassen sich die langen Molekülketten zwar langsam gegeneinander verschieben und läßt sich das Material somit verformen, bei hohen Verformungsgeschwindigkeiten gibt aber eher der Zusammenhalt der Moleküle nach, als daß sie entsprechend schnell aufeinander abgleiten würden.

Es gibt aber auch Einflüsse des Makroaufbaus, z. B. beim Schaumstoff mit seinen Lufteinschlüssen. Neben der Kompressibilität der Luft und des Grundmaterials kommt der Strömungswiderstand beim Verdrängen des Gases aus den Poren zum Tragen.

Um die Abhängigkeit der Materialsteifigkeit von der Deformationsgeschwindigkeit abzuschätzen, wurden bei den Versuchen für die UNI-CAR-Polsterelemente drei identische Prüfteile aus PUR-EA-Schaumstoff RG 120 mit gleicher

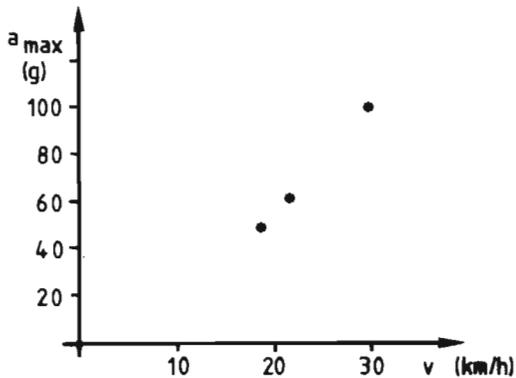


Bild 119: Maximalbeschleunigungen bei gleicher kinetischer Energie (EA, RG 120).

kinetischer Energie unter Variation der Geschwindigkeit und der Masse des Prüfkörpers beansprucht. Die aufgetretenen Maximalbeschleunigungen sind in Bild 119 dargestellt. Die a_{\max} -Werte zeigen einen Anstieg, so daß hier eine Abhängigkeit der Spitzenbeschleunigungen von der Aufprallgeschwindigkeit bestätigt wird.

Da dieses Ergebnis, d. h. eine etwa lineare Kennung, plausibel erschien, wurden zur Begrenzung des Aufwandes keine weiteren Versuche dazu gemacht. Zur Kontrolle wurde aber später bei einer Vielzahl von bereits ausgewerteten Beschleunigungsverläufen aus dem ersten Teil der Kraft-Weg-Kennung in Analogie zur Federsteifigkeit der Kraftanstieg über der Eindringung ermittelt. Hier zeigte sich jedoch keine eindeutige Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit mehr, so daß eine zunehmende Verfestigung des PUR-Schaumes zumindest in dem geprüften Geschwindigkeitsbereich mit diesem Verfahren weder bestätigt noch abgestritten werden konnte (Bild 120).

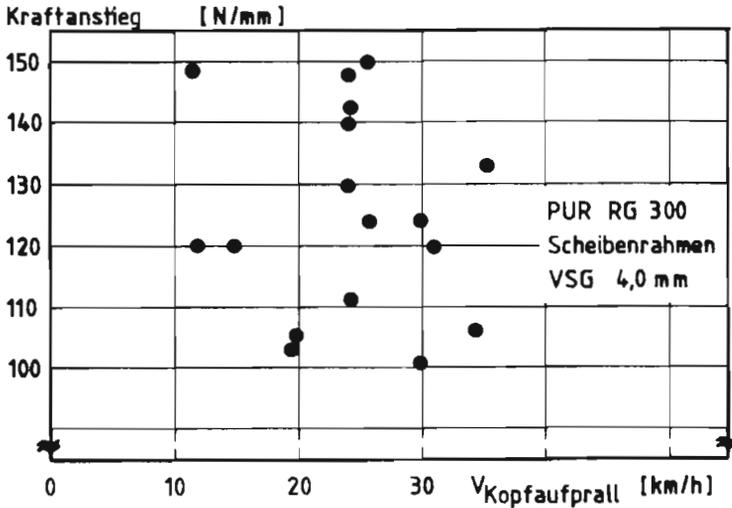


Bild 120: Kraftanstieg bei verschiedenen Aufprallgeschwindigkeiten.

Eine Erklärung wäre z. B. die Verwendung geschnittener Schaumstoffproben für die Vorversuche. Die später verwendeten Originalteile mit allseitiger dichter Haut unterschieden sich in ihrem Verhalten aber nicht signifikant von den zuvor getesteten Proben. Eine Nachprüfung der Meßwerte in früheren Untersuchungen [104] ergab ein ähnliches Ergebnis. Als Erklärung hierfür liegt eine Überlagerung des Effektes durch andere Einflüsse, z. B. eine unzureichende Reproduzierbarkeit nahe. Die Meßwertverläufe in gleichartigen Versuchen stimmten jedoch meist sehr gut überein. Höhere Geschwindigkeiten konnten wegen begrenzter Fallhöhe der Testanlage nicht erreicht werden; die Geschwindigkeitsabhängigkeit könnte sich vielleicht dann deutlicher herauskristallisieren.

- Temperatureinfluß

Insbesondere die thermoplastischen Kunststoffe zeigen allgemein einen geringeren nutzbaren Temperaturbereich, in dem sich ihre mechanischen Eigenschaften relativ wenig ändern, als andere Werkstoffe. So können nur sehr wenige Thermoplaste längere Zeit Temperaturen über 120°C ausgesetzt werden; schon Dauertemperaturen von 80° können eine kritische Belastung darstellen. Bei den Duromeren liegen die Grenzen meist etwas höher; als Anhaltswert können etwa 150° genannt werden. Für die Eignung als Sicherheitselement ist aber meist weniger die obere Einsatzgrenze entscheidend als vielmehr die Neigung zum Verspröden bei tiefen Temperaturen. Die Wahrscheinlichkeit, daß ein solches Bauteil im Winter unter -20° abkühlt und bei geringer Belastung bricht, ist in der Regel größer als die

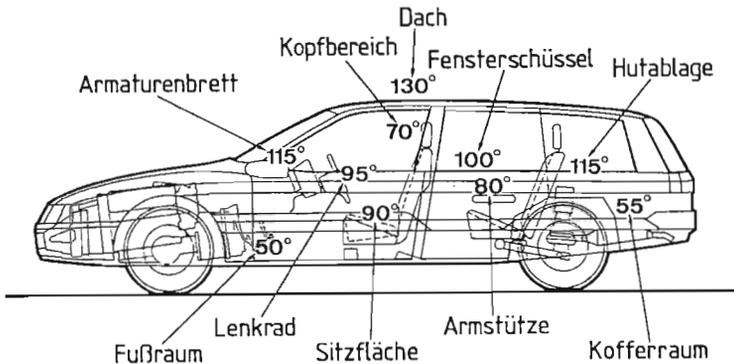


Bild 121: Temperaturen im Fahrzeuginnenraum (nach Zahlen aus [1], [108], [109] und [110]).

Gefahr eines Bruchs durch plastische Verformungen bei zu hohen Temperaturen, da zumindest in Europa kaum mit Innentemperaturen gerechnet werden muß, die allzuweit über 100°C liegen. Für Karosserieteile wie Dach, Motorhaube oder Heckklappe kann es wie Bild 121 zeigt, durchaus kritisch werden; bei in der Sonne stehenden Fahrzeugen können Bleche im Extremfall Oberflächentemperaturen über 200°C erreichen (das ist auch die Anwendungsgrenze von Aluminiumblech) [1].

Ein Sicherheitselement, das nicht allein auf Formbeständigkeit, sondern auf einen bestimmten Steifigkeitsbereich hin ausgelegt wird, ist bei Einbeziehung derartiger Extrema kaum aus Kunststoff ausführbar. Man wird sich daher auf einen sinnvoll begrenzten Gebrauchstemperaturbereich beschränken müssen. Das für die Fußgängerschutzkomponenten des UNI-CAR gewählte Elastomer PUR zeigt mit 3 % Glasgehalt eine Halbierung des Schubmoduls bei 60° und eine Verdoppelung bei -30° gegenüber 0°C [1].

- Alterung

Kunststoffe gelten zwar als weitgehend korrosionsbeständig, werfen aber durchaus Problemen wie das der Alterung auf. Diese führt u. a. zu einem Abfall der Schlagzähigkeit und schränkt ebenso wie die Empfindlichkeit vieler Kunststoffe gegen UV-Strahlung und Dauerfeuchte den Einsatz für witterungsbeanspruchte Teile ein. Allerdings kann auch eine ungeeignete Lackierung zur Verringerung der Schlagzähigkeit und zu Spannungsrissen führen. Bild 122 zeigt als extremes Beispiel einen ca. 10 Jahre alten PUR-Integralschaumstoßfänger, der durch UV-Strahlung, Wasseraufnahme und sonstige Witterungseinflüsse zermürbt wurde. Ein Schutz der Oberfläche durch eine elastische Lackierung oder ein hoher Anteil an geeigneten Füllstoffen sind für derartige Teile unbedingt anzuraten [38].

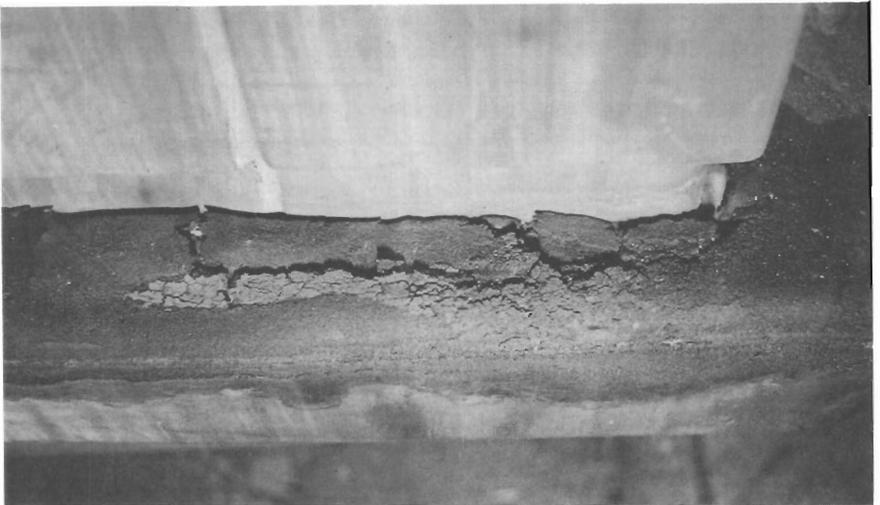


Bild 122: Unlackierter Integralschaumstoßfänger mit starken Witterungsschäden nach langjähriger Gebrauchsdauer.

A.1.3.2 Energieaufnahme

Die Art und Weise, wie die Energie im Material aufgenommen wird, ist für die Eignung der verschiedenen Konzeptionen von Absorptionselementen entscheidend. Abgesehen von den in der Regel nur in Stoßfängern verwendeten hydraulischen Dämpfern kommen meist Bleche bzw. Schalenkonstruktionen oder Schaum- bzw. Wabenkonstruktionen in Betracht. Im Personenwagen werden Bleche nicht allein für die Aufnahme größerer Energien gewählt, wie sie bei der Verzögerung des Fahrzeugs umgesetzt werden, sondern sind häufig auch Bestandteil von anderweitig verkleideten Teilen der Innenausstattung. Schaumstoffteile werden dort bevorzugt, wo ein direkter Kontakt der Insassen auf kurzen Wegen erfolgt und sich der Schaumstoff an unnachgiebigen Strukturen abstützen kann. Die Energieaufnahme erfolgt jeweils über die Deformation der Schaumstoffelemente.

Die Deformationseigenschaften hängen dabei stark von der Lokalisierung der Verformungen ab. Bei Blechen und Schalen handelt es sich dabei in erster Linie um großflächig verteilte Dehnung, Biegung oder Beulung der Bauelemente und Faltenbildung durch aus geometrischen Gründen örtlich konzentrierte Biegemomente, weniger um Nachgiebigkeiten durch Volumenänderung oder plastische Verformungen direkt am Ort der Kräfteinleitung:

Dehnung, Biegung, Faltenbildung am Blech bewirken:

- Dehnung - Kraft über Material verteilt
- Biegung - Biegemoment über Material verteilt
- Falten - Biegemoment konzentriert sich örtlich, z. B. an momentan schwächster Stelle gegen Biegung

Während bei Dehnung und Biegung der gesamten Bauteile die Kraft mit der Verformung meist linear ansteigt, läßt sich durch günstige Gestaltung die Bildung einer Vielzahl von Falten oder das Wandern einzelner Falten anregen, wodurch

die Verformungskraft über große Wege auf einem Niveau gehalten werden kann. Stahlblech zeichnet sich hier durch ein sehr gutes plastisches Verhalten aus, während Schalenelemente aus vielen Kunststoffen die starken örtlichen Verformungen an den Falten nicht ohne Risse oder Sprödbbruch überstehen, wobei sich das Verhalten mit zunehmender Geschwindigkeit und/oder sinkender Temperatur weiter verschlechtert. Bild 123 zeigt einen Versuchsträger mit einem schalenförmigen Frontteil aus PVC; eine PP-Schale blieb bis 7,5 km/h unbeschädigt. Amorphe Thermoplaste wie das PVC verhalten sich bei derartigen Belastungen ungünstiger als teilkristalline Werkstoffe [111].



Bild 123: Deformationselement aus tiefgezogener PVC-Schale am Versuchsfahrzeug nach Barrierenaufprall mit 6 km/h.

Ein großer Nachteil derartiger Energieabsorptionselemente für den Fußgängerschutz ist die Abhängigkeit von Richtung und Art der Krafteinleitung. Zum einen muß ein unerwünschtes Ausknicken verhindert werden, zum anderen bei Kontakt mit Körperteilen das Entstehen hoher Flächenpressungen vermieden werden.

Bei Energieabsorptionselementen aus Schaumstoffen oder Wabenkonstruktionen verteilen sich die eingeleiteten Kräfte nicht über ein flächig ausgedehntes Bauteil, sondern über eine Vielzahl von Poren oder Waben, die jeweils nur geringen Kräften standhalten, in der Summe jedoch in der Wirkung auf den verzögerten Körperschwerpunkt die Energie über ein Volumen verteilt ebenso abbauen können wie Bleche. Hier sind jedoch die Flächenpressungen geringer, da das Material örtlich leicht nachgibt, und ein Ausknicken kann bei Schaumstoffkörpern ohne Aushöhlungen oder ungeeignete Höhen-Breiten-Verhältnisse nicht auftreten. Dabei ist auch die Richtungsabhängigkeit der Krafteinleitung deutlich niedriger.

Das Verhalten von Schaumstoffen oder Waben beim Aufprall eines Körpers kann etwa wie folgt charakterisiert werden:

Viele Poren / Waben verformen sich,
 reißen auf oder brechen,
 verdrängen die eingeschlossene Luft,

zeigen einen deutlich stärkeren Kraftanstieg, sobald die einzelnen Wandungen direkt aufeinander zu liegen kommen.

Waben werden meist in Sandwich-Bauteilen, also in Plattenform verwendet. Nach dem derzeitigen Stand der Technik sind sie für die Anwendung im Pkw zu teuer, so daß sie hier nicht weiter betrachtet werden sollen.

Verwendet man für den Schaumstoff ein mehr elastisches Material, werden sich am Ort der Krafteinleitung die einzelnen Poren sehr stark verformen und Zugkräfte auf die benachbarten Bereiche ausüben. Mit zunehmender Kraft steigt entsprechend die Verformung, d. h. die Eindringung eines Körpers in das Schaumstoffteil, proportional an. Dadurch treten bei relativ geringen abzubauenen Energien entsprechend geringe Kräfte auf; bei hohen abzubauenen Energien ist dies aber zunächst ebenso (ohne Berücksichtigung einer denkbaren Geschwindigkeitsabhängigkeit).

Dadurch kann über den Verformungsweg weniger Energie abgebaut werden als theoretisch möglich, wenn eine bestimmte Maximalkraft schnell erreicht und über die gesamte Eindringung auf diesem Niveau gehalten werden kann.

Die Eigenschaften elastischer Schaumstoffe sind:

Die Deformationskennung zeigt zunächst annähernd linearen Anstieg,

zeigt bei Erreichen der Blocklänge einen starken Kraftanstieg,

nicht direkt beaufschlagte Poren tragen mit zur Energieaufnahme bei,

die Wegausnutzung ist schlecht, die Energieaufnahme nur ungefähr halb so groß wie theoretisch möglich.

Bei spröden Werkstoffen werden die Poren auf einem bestimmten Kraftniveau nachgeben. Der Körper kann eindringen, bis seine kinetische Energie über die Vielzahl der gebrochenen Wandungen abgebaut ist. Die benachbarten Bereiche beeinflussen die auftretenden Kräfte nicht, da diese wegen der brechenden spröden Poren nicht übertragen werden können. Eine derartige Kennung ist für ein Polster günstiger, da bei gleicher Energieumwandlung und gleichem Verformungsweg die maximal auftretende Kraft geringer ist. Müssen allerdings nur relativ geringe Energien abgebaut werden, treten auch bei kleinen Verformungen die gleichen hohen Kräfte auf und der Schaum wirkt unangemessen hart. Ebenfalls geringer ist die Geschwindigkeitsabhängigkeit, da die in den Poren eingeschlossene Luft nicht mehr komprimiert werden kann, sobald diese aufgebrochen sind. Allerdings besteht die Gefahr des Auseinanderbrechens des Schaumkörpers wie bei massiven spröden Körpern.

Spröder Schaumstoff zeigt folgendes Verhalten:

Die Deformationskräfte hängen nicht proportional von der Eindringung ab,

nicht direkt beaufschlagte Poren tragen wenig zur Energieaufnahme bei,

auch bei geringen Belastungen treten vergleichsweise hohe Kräfte auf,

die Wegausnutzung ist gut, die Spitzenkräfte sind geringer.

In der Praxis wird sich bei den harten, spröden Schäumen die Irreversibilität auch kleiner Verformungen als unerwünscht erweisen, da dadurch das Aussehen der Oberfläche beeinträchtigt wird. Die sogenannten halbharten Schaumstoffe sind hier günstiger. Wegen ihrer höheren Steifigkeit müssen sie jedoch eine geringere Dichte haben als elastische Mischungen und erreichen nicht die Oberflächenqualität dieser dichter Werkstoffe. Bei Außenanwendungen empfehlen sich Integralschaumsysteme, bei denen die Dichte nach außen hin ansteigt, oder ein Mehrschichtenaufbau.

Bei der Scheibenrahmenpolsterung des UNI-CAR ist versucht worden, durch eine Oberflächenschicht aus dem sprödem Material Glas und einem Kern aus relativ elastischem PUR-Schaum eine akzeptable Deformationskennung zu erreichen; damit sollte ein oberflächenbündiger Einbau der Scheibe trotz Polsterung der A-Pfosten ermöglicht werden. Bei einem Aufprall steigt die Kraft zunächst schnell an, da die Scheibe Kräfte auf eine große Fläche des Schaumstoffes verteilt und selbst nur relativ wenig nachgibt. Beim Bruch der Scheibe ändern sich die Verhältnisse schlagartig, da die Kraft nun nur auf eine vergleichsweise kleine Fläche wirkt und dadurch abfällt. Jetzt erfolgt wieder der bekannte lineare Anstieg, aber schon auf höherem Niveau, wodurch der zur Verfügung stehende Weg etwas besser ausgenutzt wird.

Die in den Versuchen verwendeten VSG-Scheiben von 4,0 mm und 5,3 mm Dicke beeinflussen die ermittelten Deformationskennungen (Bild 124) gegenüber Versuchen ohne Scheibe insgesamt aber nur gering. Generell ergaben dabei die 5,3 mm starken Scheiben bei sonst gleichen Bedingungen (Geschwindigkeit, Profil, Raumgewicht des Schaums) etwas niedrigere Beschleunigungswerte als die 4,0 mm starken Scheiben (Versuchsanordnung siehe Bild 111).

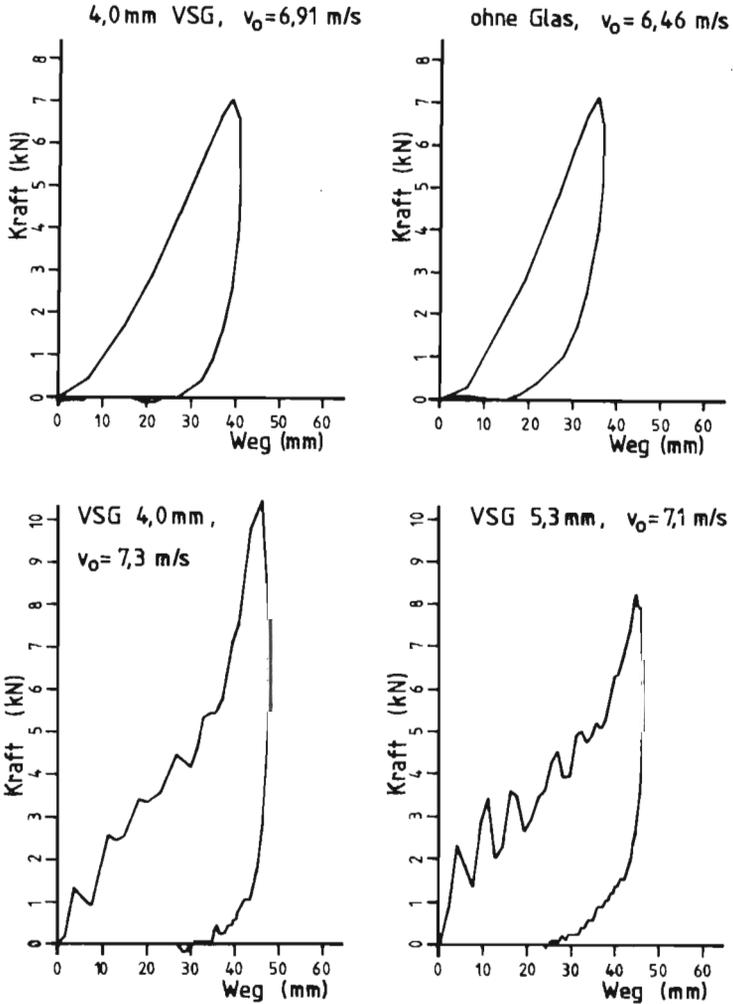


Bild 124: Deformationskennungen der Scheibenrahmenpolster mit und ohne Verbundglasscheiben (Sekuriflex); oben: ohne und 4 mm VSG (Abtastrate 1000 Hz); unten: mit 4 und 5,3 mm (Abtastrate 4000 Hz).

2.4.3.3 Meßtechnische Probleme

Bei der Durchführung der Versuchsreihen wurden einige Probleme deutlich, die wegen der außerordentlich kurzen Dauer der zu messenden Vorgänge besondere Bedeutung hatten. Als kritisch für die Ermittlung genauer Deformationskennungen stellten sich die Zeitauflösung, die Synchronität von Kraft- und Wegaufzeichnung bei den extremen Geschwindigkeitsänderungen und die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung heraus.

Anstoß für eine weitergehende Überprüfung der Meßkette auf bisher unerkannte Fehlerquellen waren teilweise sehr große Deformationswege, die in verschiedenen Fällen größer waren als die Dicke der Versuchsteile. Eine Schwierigkeit liegt auch in der Trennung der Verformungen von Versuchsteil und Prüfkörper. Dieses Problem kann nur durch Montage des Aufnehmers unmittelbar hinter der Kontaktfläche von Prüfkörper zu Versuchsteil oder durch möglichst hohe Steifigkeit des Bereichs zwischen Kontaktfläche und Aufnehmer gelöst werden.

- Zeitauflösung

Die Zeitauflösung hängt von den Grenzfrequenzen der verwendeten Filter und den möglichen Abtastraten bei der Meßwertaufnahme ab. Bei zu geringen Abtastraten können z. B. die Spitzen der Beschleunigungssignale zwischen zwei Tastpunkten liegen und dadurch der Zeitpunkt des Maximums sowie die absolute Höhe verfälscht werden, was zu einer schlechten Abbildung der Kennungen am Umkehrpunkt führt.

Die Abtastrate bei den Komponentenversuchen für das UNI-CAR betrug rechnerbedingt 1000 Hz. Um eine bessere Auflösung der Meßdaten zu erreichen, wurde bei einer Reihe von Versuchen ein Speicheroszilloskop parallelgeschaltet.

Durch anschließendes Überspielen auf den Rechner mit vierfacher Zeitdehnung wurde die Abtastfrequenz auf 4000 Hz erhöht. Die Verwendung des in die Meßkette zwischengeschalteten Speicheroszilloskops ergab eine deutlich bessere Auflösung der Beschleunigungsschriebe. So konnte nun ein charakteristischer erster Einbruch in dem a-t-Verlauf als Brechen der Scheibe gedeutet werden. Ebenso wurde ein deutlich erkennbares Abschneiden der Beschleunigungsspitzen, wie bei den direkt aufgenommen Meßsignalen oft geschehen, nicht mehr festgestellt. Höhere Filter- und Abtastfrequenzen beeinflussten die Form des Signals trotz der prinzipiell besseren Auflösung nicht mehr erkennbar, da die Reproduzierbarkeit Grenzen setzte, siehe Bild 125. Eine Abtastfrequenz von 4000 Hz ist demzufolge ausreichend.

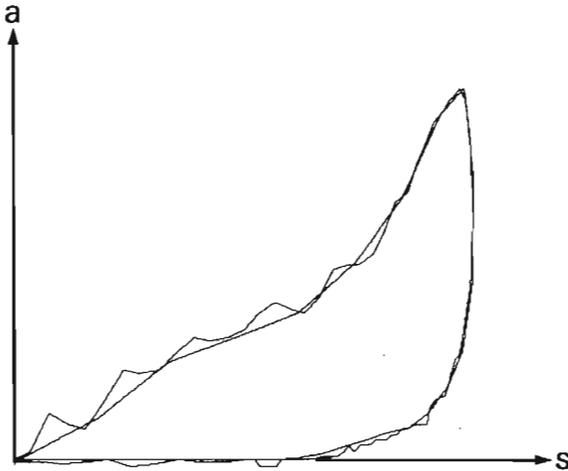


Bild 125: Deformationskennung desselben Versuchsteils; Meßsignale mit 1000 Hz und 4000 Hz Abtastung aufgezeichnet.

Es ergaben sich somit meist etwas höhere Maximalbeschleunigungen bei der 4000 Hz-Aufzeichnung. Die Abweichung bei den Spitzenbeschleunigungen betrug maximal 30 g, was eine relative Abweichung von 10 % bedeutet. Dennoch konnte bei den meisten Versuchen eine gute Übereinstimmung der Deformationskennungen beobachtet werden; lediglich bei markanten Beschneidungen der Beschleunigungsspitzen (durch zufällige Abtastung kurz davor und danach) im Bereich des Nulldurchgangs der Geschwindigkeit gab es größere Differenzen.

Eine Untersuchung [112] zu den Einflüssen der Filterung auf die errechneten HIC-Werte ergab, daß bis hinab zu ca. 100 Hz bei starker Flankensteilheit keine wesentlichen Veränderungen dieser bewerteten Größe auftreten. Damit würde von dieser Seite her einer Abtastrate von 1000 Hz nichts entgegenstehen.

- Synchronität der Weg- und Zeit-Verläufe

Einen sehr starken Einfluß auf die berechnete Energieaufnahme hat die Synchronität der Weg- und Zeitverläufe. Eine zeitliche Verschiebung der Kurven gegeneinander schon in der Größenordnung einer Integrationssschrittweite von 1 ms hat bei der kurzen Dauer der Impulse und der starken Änderungen von Beschleunigung und Geschwindigkeit einen außerordentlichen Einfluß auf die aufgenommene Arbeit. Bild 126 zeigt einige Rechenbeispiele von simulierten Weg-Zeit-Verläufen und die Auswirkungen von zeitlichen Verschiebungen zwischen Beschleunigung und Weg um einen Integrationssschritt.

Bei Fehlern in der Umrechnung von gemessenen Spannungen in Beschleunigungen und ebenfalls gemessenen Wegen sind die Auswirkungen auf die proportionale Energieaufnahme gering, da sich zwar die absoluten Größen, nicht aber die Verhältnisse ändern. Jeder Fehler, der sich wie eine Maßstabsän-

derung äußert, kann sich nicht im Anteil der aufgenommenen Energie niederschlagen; wird die Kennung jedoch verzerrt, indem sich die Form des Kurvenzuges ändert, weicht die Berechnung sofort stark ab. Das kann z. B. geschehen, wenn die Eingangsgeschwindigkeit ungenau gemessen wird, da dann der Umkehrpunkt und damit der Vorzeichenwechsel sich auf der Zeitachse verschiebt.

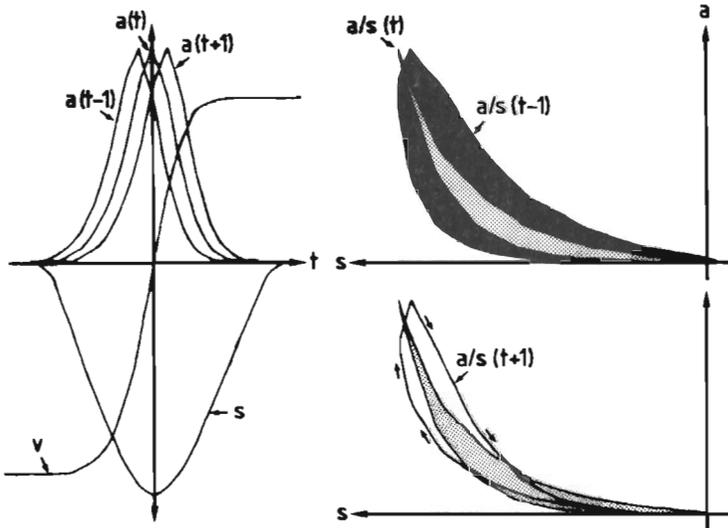


Bild 126: Simulierte Deformationskennungen bei nicht synchroner Aufzeichnung von Kraft und Weg.

Die häufig übliche Praxis der Ermittlung der Energieaufnahme über die Integration der Beschleunigung ohne eigene Messung des Verformungsweges erwies sich somit wegen der starken Auswirkungen auch nur geringer Fehler als ein ungeeignetes Verfahren.

Aus den genannten Gründen wurde für Komponentenversuche an der Fallgewichtsanlage ein optoelektronisches berührungsloses Wegmeßgerät entwickelt. Die starken Erschütterungen der Anlage beim Aufprall des Versuchsschlittens auf die Prüfkörper, die unvermeidlichen Toleranzen in den Führungen und die hohen erwarteten Beschleunigungen ließen keine sich mitbewegenden oder auf gleichbleibenden Abstand zwischen Meßfühler und Bezugsfläche angewiesenen Meßvorrichtungen zu. Auch für digitale Abtastungen mittels Leseköpfen und Kodierstreifen wurde keine befriedigende Lösung gefunden. Bild 127 zeigt schematisch den Aufbau des optoelektronischen Weggebers.

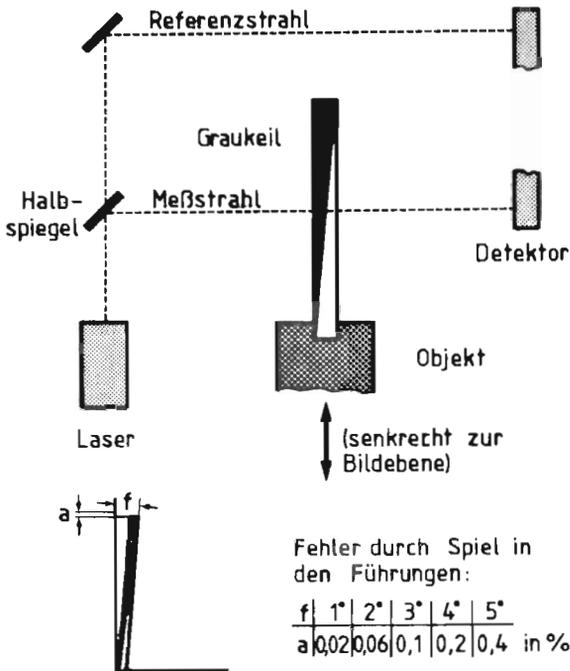


Bild 127: Schema des Laser-Graukeil-Weggebers.

Ein Laserstrahl fällt dabei durch einen Film mit sich kontinuierlich ändernder Schwärzung auf einen Photosensor. Verschiebt man den Film oder Graukeil (den gleichen Effekt hat auch ein keilförmig geschliffener, getönter Glasstreifen), ändert sich in Abhängigkeit davon der Widerstand der Photozelle. Ein logarithmischer Verstärker, der die lineare Dichteänderung des Films wegen des logarithmischen Transmissionsgradverlaufs in einen linearen Spannungsverlauf überträgt und mittels eines zweiten Strahls Umgebungseinflüsse kompensiert, leitet das Meßsignal den Aufzeichnungsgeräten zu. Schaltbilder der Anlage werden in Bild 128 und 129 gezeigt, eine damit aufgenommene Kennung in Bild 130.

Die gespeicherten Beschleunigungsverläufe, von denen Meßwerte für den Maximalweg vorlagen, ermittelt über eine einfache Kratzvorrichtung, wurden versuchsweise mit einem Rechenprogramm soweit verändert, daß Maximalweg und Maximalbeschleunigung zeitlich möglichst eng zusammentrafen. Diesem Vorgehen lag die Überlegung zugrunde, daß im Moment der Bewegungsumkehr und damit auch unmittelbar davor und danach alle Geschwindigkeitseinflüsse, d. h. Dämpfung, ausgeschaltet sind. Das Material müßte sich nach Vollzug der plastischen Verformung allein im elastischen Bereich befinden und sich kurzzeitig wie eine ideale Feder verhalten.

Die Berechnungen ergaben stets kürzere Verformungswege, meist etwas unter den gemessenen, bei Variation von Beschleunigungsverlauf und Anfangsgeschwindigkeit mittels eines Korrekturfaktors und größere Wege bei Variation des Zeitfaktors über die einzugebende Integrations-schrittweite. Die Faktoren waren dabei jeweils in etwa gleich groß, meist in der Größenordnung von 25 %. Die aufgenommene Energie wurde jeweils halbiert bei guter Übereinstimmung der Werte. Diese Erkenntnisse bestätigen die Notwendigkeit der separaten Messung von Kraft bzw. Beschleunigung, Geschwindigkeit und Weg, da nur so derartige Fehlerquellen erkannt werden können.

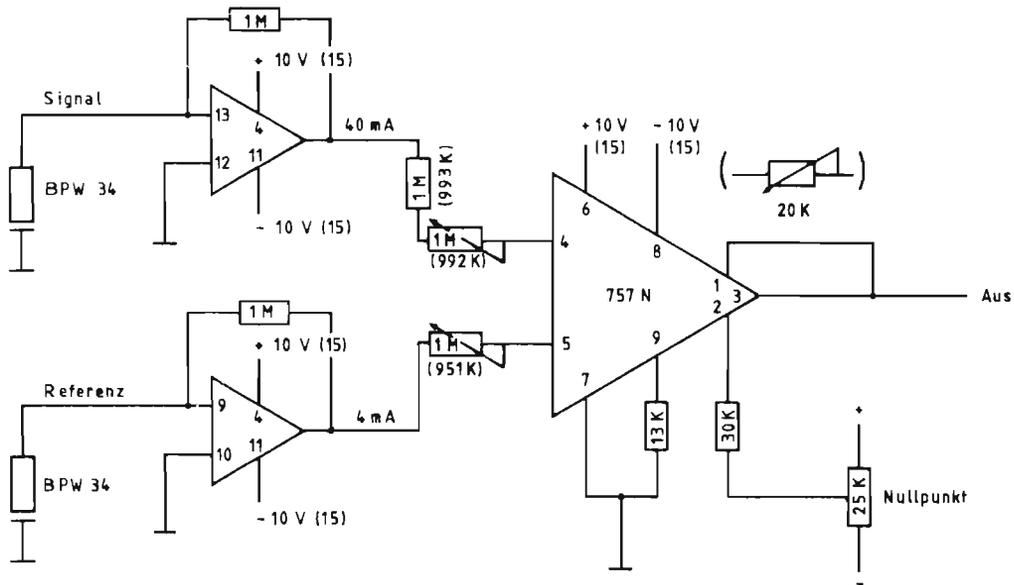


Bild 128: Beschaltung des Laser-Graukeil-Weggebers mit Photodioden und logarithmischem Verstärker.

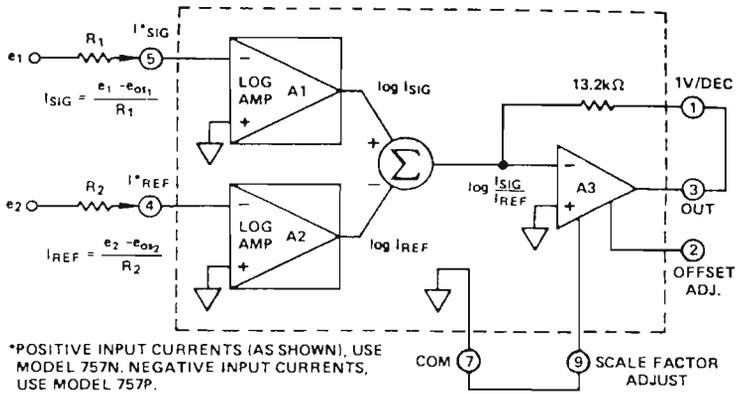


Bild 129: Funktionsdiagramm des logarithmischen Verstärkers [1].

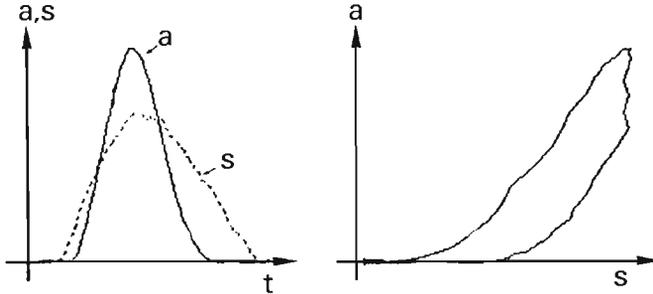


Bild 130: Verlauf von Beschleunigung und Weg bei synchroner Aufzeichnung mit dem Graukeil-Weggeber.

(Einige weitere optoelektronische Wegmeßverfahren mit ähnlicher Funktionsweise werden z. B. in [362] beschrieben.)

A 2 BILDERVERZEICHNIS

		Seite
Bild	1: Fußgängerauffangvorrichtung, gefunden in einer Patentschrift von 1932.	14
Bild	2: IVS-Beitrag IRVW III, 1984.	17
Bild	3: Audi Forschungs-Pkw "Auto 2000".	21
Bild	4: Daimler-Benz Forschungs-Pkw "Auto 2000".	21
Bild	5: Forschungs-Pkw UNI-CAR der Hochschul-arbeitsgemeinschaft.	22
Bild	6: Volkswagen Forschungs-Pkw "Auto 2000".	22
Bild	7: Eingeklebtes Sandwich-Dach des Audi-Forschungs-Pkw aus Kunststoff.	23
Bild	8: Kunststoffhinterachse des VW-Forschungs-Pkw "Auto 2000", 1981.	25
Bild	9: Beispiel aufwendiger Substitution an einem Großserienfahrzeug: Stoßfänger des Mercedes 190.	27
Bild	10: FIAT VSS.	30
Bild	11: Minicars RSV.	30
Bild	12: Peugeot Vera.	32
Bild	13: Kunststoff-Frontteil des Calspan RSV.	32
Bild	14: Volvo LCP.	35
Bild	15: Anteile der verschiedenen Kunststoffe in den Pkw-Baugruppen, über der Zeit sowie am Gesamtverbrauch in Westeuropa.	44
Bild	16: Entwicklung des Verbrauchs an Kunststoffen in der Bundesrepublik Deutschland.	45
Bild	17: Vergleich der Zugfestigkeitsbereiche wichtiger Werkstoffgruppen.	58
Bild	18: GFK-Bodengruppe des Audi-Forschungs-Pkw.	59
Bild	19: Selbsttragende Karosserien aus Aluminium beim Mercedes 300 SL aus den 50er Jahren und einer Studie des Porsche 928 von 1981.	61
Bild	20: Korrosionsschutz und Materialverfestigung durch Tauchen der Rohkarosserie in Zink.	64

	Seite
Bild 21: Vergleich von Personenwagen mit Stahl- und Kunststoffkarosserie.	68
Bild 22: Die Rahmenbauweise des Pontiac Fiero; oben die tragende Stahlstruktur, unten die äußeren Karosserieteile aus verschiedenen Kunststoffen.	69
Bild 23: Gewicht von Sandwich-Konstruktionen gleicher Steifigkeit bei variiertem Dimensionierung.	72
Bild 24: Aluminiumkarosserieteile beim Porsche 928 im Vergleich zu einer Stahlausführung.	74
Bild 25: Gewichtsvergleich von Glas- und Kunststoffscheiben.	78
Bild 26: Kunststoffheckscheibe des Daimler Benz Forschungs-Pkw "Auto 2000".	79
Bild 27: Vergleich charakteristischer Eigenschaften von Glas und Kunststoffscheiben.	81
Bild 28: Aluminium-Querlenker des Forschungs-Pkw UNI-CAR.	88
Bild 29: Kunststoffrad des VW-Forschungs-PKW.	90
Bild 30: Keramischer Partikelfiltereinsatz für Dieselmotor; oben links neu, rechts beladen mit Ruß, unten Schnitt durch Ein- und Auslaßkanäle.	99
Bild 31: Vergleich der Gewichte typischer Personenwagenmodelle von früher und heute.	100
Bild 32: Verteilung des Fahrzeuggewichts auf die verschiedenen Baugruppen.	104
Bild 33: Werkstoffanteile am Pkw in Deutschland, den USA, und Japan laut Expertenumfrage von 1980.	107
Bild 34: Entwicklung der Werkstoffanteile am Pkw in den USA, in Deutschland und in Japan in den letzten Jahren.	108
Bild 35: Entwicklung des Einsatzes von Aluminium und Kunststoffen über der Zeit.	109
Bild 36: Verfahren der Kunststoffverarbeitung.	111
Bild 37: Gegenüberstellung von High-Solid-, Wasser- und Pulverlacken.	121

	Seite
Bild 38: Kenntnisstand verschiedener Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen.	124
Bild 39: Übersicht über die wichtigsten Verstärkungsarten von Faserverbundwerkstoffen.	125
Bild 40: Verarbeitungsverfahren für die faserverstärkten Kunststoffe.	126
Bild 41: Automatisierbare Fertigungsverfahren für GFK-Blattfedern.	130
Bild 42: GFK-Blattfeder der GM-Corvette ab 1981.	131
Bild 43: Typische Eigenschaften und Preise von GFK, CFK und Federstahl.	132
Bild 44: Gewichte verschiedener Motorenteile aus Faserverbundwerkstoff und Metall.	134
Bild 45: Anwendungstemperaturbereiche der Werkstoffe.	137
Bild 46: Kriterien für den Einsatz von Kunststoffen in Kraftfahrzeugen.	141
Bild 47: Typische Gewichtseinsparungen bei Substitution von Metall durch Kunststoff.	143
Bild 48: Relative Gewichte von Bauteilen gleicher Steifigkeit aus verschiedenen Werkstoffen.	144
Bild 49: Bewertete relative Gewichte von Bauteilen gleicher Steifigkeit aus verschiedenen Werkstoffen.	146
Bild 50: Gewichte von Bauteilen aus verschiedenen Werkstoffen bei gleicher Biegesteifigkeit.	150
Bild 51: Vergleich der Produktionskosten zwischen Stahl- und GFK-Karosserien.	153
Bild 52: Werkzeugkosten für Kotflügel, Tür und Haube aus Stahl oder Kunststoff.	154
Bild 53: Beispiele für relative Materialkosten.	155
Bild 54: Geschätzte Abgabepreise von Karosserieteilen aus verschiedenen Werkstoffen im Verhältnis zu Stahl.	156
Bild 55: Zunahme der Vorschriften zur Fahrzeugsicherheit.	160

	Seite
Bild 56: Fahrzeug mit Ganz-Aluminium-Karosserie nach Crash-Test.	164
Bild 57: Kunststoff-Lkw nach Crash-Test an der TU Berlin.	166
Bild 58: Ablauf eines Crash-Tests mit einem Kunststoff-Lkw.	167
Bild 59: Schwachpunkte des Kunststoffaufbaus beim Crash-Test.	168
Bild 60: Tatsächliche Materialzusammensetzung einer mit Aluminiumblechen gefertigten Pkw-Tür.	173
Bild 61: Schema eines Pyrolyseverfahrens zur Verwertung von Altreifen.	176
Bild 62: Energieeinsparung durch Leichtbauwerkstoffe über der Laufstrecke.	180
Bild 63: Energieeinsparung bei Teilen aus Kunststoff statt Metall.	181
Bild 64: Energieaufwand bei verschiedenen Werkstoffen; Vergleichsbasis Gewicht und Vergleichsbasis Volumen.	182
Bild 65: Relativer Energieaufwand der Werkstoffe bei unterschiedlicher Wichtung der Steifigkeit.	183
Bild 66: Prozeßkette eines Aluminiumbauteils.	184
Bild 67: Entwicklung des durchschnittlichen Aluminiumanteils im amerikanischen Pkw.	203
Bild 68: Derzeitiger und erwarteter Aluminiumeinsatz in Fahrzeugen.	203
Bild 69: Aluminiumeinsatz im Pkw.	204
Bild 70: Aluminiumverbrauch in Pkw.	204
Bild 71: Entwicklung der Bevölkerungsstruktur in der Prognose bis zum Jahr 2000.	206
Bild 72: Schätzung der Werkstoffanteile.	209
Bild 73: Materialanteile bei fünf verschiedenen Konzepten im Vergleich zu einem Basisfahrzeug.	210

	Seite
Bild 74: Entwicklung der Materialzusammensetzung zukünftiger Personenkraftwagen nach Expertenbefragung.	211
Bild 75: Geschätzter Kunststoffverbrauch für Karosserieaußenteile 1987 und 1992.	213
Bild 76: Rahmen- oder "Bird-Cage"-Bauweise der Pkw-Karosserie am Beispiel des Fiat VSS.	216
Bild 77: Preisentwicklung ausgewählter Rohstoffe.	219
Bild 78: Schätzung von Gewicht und Kosten verschiedener Motorhaubenkonzepte.	220
Bild 79: Entwicklung der Energiepreise.	221
Bild 80: Entwurf einer Großraumlimousine in Rahmenbauweise mit "Hang-On"-Außenteilen.	232
Bild 81: UNI-CAR Schnittzeichnung.	287
Bild 82: UNI-CAR bei der Vorstellung und in Erprobung.	288
Bild 83: Frontkontur des UNI-CAR und vergleichbare Konturen.	289
Bild 84: Ablauf eines Fußgängerversuchs mit dem UNI-CAR.	290
Bild 85: Hochgewölbte Haubenvorderkante nach Kollision mit einem Fußgängermodell.	292
Bild 86: Fußgängersicherheitsfahrzeug von 1978.	295
Bild 87: Schnitt durch den Vorderwagen des UNI-CAR.	297
Bild 88: Schnitt durch das Soft-Face.	297
Bild 89: Low-Speed-Versuch mit UNI-CAR-Vorderwagen.	298
Bild 90: Kratzfeste Beschichtung einer Scheinwerferabdeckscheibe aus PC am UNI-CAR nach einem Fußgängerversuch.	300
Bild 91: Versuchsmuster einer heizbaren Scheinwerferabdeckscheibe aus bedampftem Polycarbonat.	301
Bild 92: Geöffnetes Kunststoffwerkzeug für das Softface.	302

	Seite
Bild 93: Entnahme eines mit Halbhartschaum hinterfüllten Soft-Face-Rohlings aus dem Werkzeug.	303
Bild 94: Motorhaube mit GFK-Träger.	305
Bild 95: Motorhaube mit Aluminiumgerüst.	305
Bild 96: Außenspiegel des UNI-CAR mit Integralschaumhaut.	308
Bild 97: Aerodynamisch günstiges Design der Scheibenrahmenpolsterung beim UNI-CAR im Vergleich zu dem älteren Fußgängerschutzfahrzeug.	309
Bild 98: Frontscheiben- und Dachrahmenpolsterung.	310
Bild 99: Schnitt durch den A-Pfosten.	310
Bild 100: Schnitt durch die vordere Dachkante.	311
Bild 101: A-Pfosten nach Kopfaufprall eines Radfahrers.	312
Bild 102: Erster Entwurf des A-Pfostens aus der Lastenheftphase des UNI-CAR.	314
Bild 103: Vorversuch mit geklebter VSG-Scheibe auf Vorsatzrahmen und PUR-Integralschaumstoffstreifen.	316
Bild 104: Crash-Test entsprechend FMVSS 212 mit eingeklebtem Windschutzscheibenrahmen aus PUR-Integralschaum mit nicht angeschallten Dummies.	316
Bild 105: Scheibenrahmenpolster nach Versuch mit 50 km/h gemäß FMVSS 212; Dummies nicht angegurtet.	317
Bild 106: Schnitt durch den Dachrahmen.	318
Bild 107: Versuch zur Dachkantenpolsterung mit Zweiradfahrerdummy.	319
Bild 108: Frühe Entwicklungsstufe des Dachrahmens aus der Lastenheftphase.	320
Bild 109: Konturabweichungen Soft-Nose / Haube.	322
Bild 110: Aufbau der Fallgewichtsanlage.	326
Bild 111: Modell des Scheibenrahmens unter dem Fallgewicht.	328

	Seite
Bild 112: Absorbierte Energie verschiedener Frontscheibenrahmenpolster in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit.	330
Bild 113: Deformationskennung der Windschutzscheibenrahmenpolsterung unten im Vorversuch.	331
Bild 114: Head-Injury-Criterion in Abhängigkeit vom Raumgewicht des als Scheibenrahmenpolster verwendeten Integralschaums.	332
Bild 115: Kopfaufprallgeschwindigkeit bei verschiedenen Fahrzeugtypen über der Kollisionsgeschwindigkeit.	334
Bild 116: Head-Injury-Criterion in Abhängigkeit von der Aufprallgeschwindigkeit auf verschiedene Scheibenrahmen.	336
Bild 117: Head-Injury-Criterion in Abhängigkeit der Aufprallgeschwindigkeit bei verschiedenen Motorhaubenversionen.	337
Bild 118: Versuchsmodelle für Motorhauben aus verschiedenen PUR-Einstellungen.	339
Bild 119: Maximalbeschleunigungen bei gleicher kinetischer Energie.	343
Bild 120: Kraftanstieg bei verschiedenen Aufprallgeschwindigkeiten.	344
Bild 121: Temperaturen im Fahrzeuginnenraum.	345
Bild 122: Unlackierter Integralschaumstoßfänger mit starken Witterungsschäden nach langjähriger Gebrauchsdauer.	347
Bild 123: Deformationselement aus tiefgezogener PVC-Schale am Versuchsfahrzeug nach Barrierenaufprall mit 6 km/h.	349
Bild 124: Deformationskennungen der Scheibenrahmenpolster mit und ohne Verbundglasscheiben; ohne und 4 mm VSG; mit 4 und 5,3 mm.	353
Bild 125: Deformationskennung desselben Versuchsteils; Meßsignale mit 1000 Hz und 4000 Hz Abtastung aufgezeichnet.	355
Bild 126: Simulierte Deformationskennungen bei nicht synchroner Aufzeichnung von Kraft und Weg.	357
Bild 127: Schema des Laser-Graukeil-Weggebers.	358

	Seite
Bild 128: Beschaltung des Laser-Grau-keil-Weggebers mit Photodioden und logarithmischem Verstärker.	360
Bild 129: Funktionsdiagramm des logarithmischen Verstärkers.	361
Bild 130: Verlauf von Beschleunigung und Weg bei synchroner Aufzeichnung mit dem Grau-keil-Weggeber.	361
Bild 131: Materialanteile bei heutigen Pkw; Gewichtsanteile in %, Durchschnitt und Standardabweichung.	380
Bild 132: Zukünftiger Einsatz von Industrierobotern.	381
Bild 133: Materialzusammensetzung zukünftiger Personenkraftwagen.	382
Bild 134: Abschätzung des Gewichts zukünftiger Pkw in verschiedenen Ländern.	383
Bild 135: Relative Gewichte von Bauteilen gleicher Steifigkeit aus verschiedenen Werkstoffen; Berechnung nach Plattentheorie, Wanddicke t variabel.	384
Bild 136: Bewertete relative Gewichte von Bauteilen gleicher Steifigkeit aus verschiedenen Werkstoffen; Wanddicke t variabel, Form nach Lastannahme.	385
Bild 137: Energieaufwand der Werkstoffe im Vergleich zu Stahl.	386
Bild 138: Relativer Energieaufwand der Werkstoffe bei verschiedenener Wichtung der Steifigkeit.	387
Bild 139: Energieaufwand für verschiedene Materialien, in kWh/kg, teilweise umgerechnet aus den Quellen.	388
Bild 140: Entwicklung des GFK-Verbrauchs von 1960 bis 1980 in der Bundesrepublik Deutschland.	389
Bild 141: Materialanteile in Europa, den USA und weltweit.	390
Bild 142: Materialanteile, Gewicht und Kosten bei verschiedenen Sportwagenkarosserien.	390

	Seite
Bild 143: Materialzusammensetzung von Pkws bei unterschiedlich bevorzugten Werkstoffen.	391
Bild 144: Kunststoff-Bedarf pro Pkw in Westeuropa und den USA.	391
Bild 145: Verarbeitung von Schaumstoffen.	392
Bild 146: Übersicht über die Faserverbundwerkstoffe.	393
Bild 147: Gegenüberstellung der mechanischen Eigenschaften gebräuchlicher Werkstoffe im Fahrzeugbau.	394
Bild 148: Kenndatenvergleich für verschiedene Stoßfängerwerkstoffe.	394
Bild 149: Physikalische Kennwerte von Komponenten von Faserverbundwerkstoffen; Fasern.	395
Bild 150: Physikalische Kennwerte von Komponenten von Faserverbundwerkstoffen; Harze.	396
Bild 151: Vergleich des Lösungsmittelgehaltes verschiedener Lacksysteme.	397
Bild 152: Vergleichende Bewertung von Stoßstangenwerkstoffen.	398
Bild 153: Kraftstoffkosten und Amortisationszeit bei verschiedenen Kosten für die Gewichtsverminderung.	398
Bild 154: Erzeugerpreise gewerblicher Produkte.	399
Bild 155: Entwicklung der Erzeugerpreise im Straßenfahrzeugbau und bei wichtigen Vorerzeugnissen.	400
Bild 156: Entwicklung der Rohstoffpreise für verschiedene Werkstoffe.	401
Bild 157: Energieinhalt der Werkstoffe.	401
Bild 158: Energiebilanz-Scenarios mit und ohne sekundäre Gewichtseinsparungen.	402
Bild 159: Gegenüberstellung verschiedener Prognosen über den Pkw-Bestand in Deutschland mit der tatsächlichen Entwicklung.	403
Bild 160: Entwicklung des Pkw-Bestandes bei unterschiedlichen Szenarien.	404

(Leere Kästen: Konventionell/keine Angabe/nicht zutreffend.)

Fahrzeugteil, Baugruppe	UNI-CAR	Audi Fo-Auto	Daimler Benz Fo-Auto	Volkswagen Fo-Auto
01 Fahrzeugauslegung allgemein	Mittelklasse, 4 Plätze Frontantrieb Tragstruktur Stahl, Anbauteile AL, PU, GFK	Raumangebot obere Klasse, 5 Plätze, Frontantrieb Tragstruktur Stahl, Dach, Bodengruppe, Anbauteile neue Werkstoffe	Obere Klasse, 5 Plätze, Heckantrieb selbstragende Stahlbauweise	Mittelklasse-Kompaktfahrzeug 4 Plätze Frontantrieb Tragstruktur Stahlblech, Anbauteile Kunststoff
02 Maße, Gewichte, Fahrleistungen	Länge:4,65m; Breite:1,98m; Leergew.: 1300 kg, zul.Gesamtgewicht: 1825 kg 0-100: 13 s; v _{max} 190 km/h	Länge:4,76m; Breite 1,79m Leergewicht:1179 kg zul.Gesamtgewicht:1679 kg 0-100: 12 s; v _{max} 180 km/h	Länge 5,1m; Breite 1,82m Leergewicht 1600 kg zul. Gesamtgewicht:2100 kg 0-100: 12s; v _{max} 200 km/h	Länge 4m; Breite 1,67m Leergewicht 780 kg zul. Gesamtgewicht:1180 kg
03 Kostenrahmen, Lebensdauer	entsprechend Mittelklasse		entsprechend Oberklasse	Über 10 Jahre oder 140000 km
11 Motor, Antriebsaggregate	Motorblock GG, Zylinderkopf Aluminium, ATL konv.	Motorblock Al mit eingeschrumpften GG-Buchsen	Motorblock u. Zylinderkopf: Aluminium; GG-Laufbuchsen; keramische Auslasskanalverkleidung	Motorblock u. Zylinderkopf: Aluminium, Aluminium-Laufbuchsen (Nilasilbeschichtung)
12 Steuerung und Regelung, Stellglieder	konventionell		El. Gaspedal	
16 Kraftstoffbehälter, -leitungen	vorgesehen HD-PE, Prototypen aus Kostengründen Stahlblech		Kunststofftank	
17 Einrichtungen zur Minderung von Umweltbelastungen	Dieselmotor, Schallkapsel Unterseite Motorhaube Moltopren-Weichschaum		Dieselmotor, Schallkapsel	Motorraumkapsel PUR-Schaum
18 Kühlsystem	Aluminium-Wasserkühler mit Kunststoff-Wasserkästen		Aluminium-Wasserkühler	
19 Abgasanlage	konventionell		zur Geräuschminderung verstärkt	
23 Getriebe	LM-Gehäuse		LM-Gehäuse	Gehäuse Schaltgetriebe AL, Gehäuse Automatik Mg
26 Wellen, Gelenke	konventionell		Kardanwelle kohlefaserverstärkter Kunststoff	
31 Vorderachse	Doppelquerlenkerachse aus AL (GALSI7Mg wa, Sandguß), Pendelstütze u. Stabilisator-schenkel AL Radträger GS Cr Mo 4	Aluminiumschwengelager	wie S-Klasse, Hydropneumatik	Schwengelager mit Federbeinhalterohr Aluminiumguß

Fahrzeugteil, Baugruppe	UNI-CAR	Audi Fo-Auto	Daimler Benz Fo-Auto	Volkswagen Fo-Auto
32 Lenkung	Spurstange rechts Al, (Al Mg Sil F31), links Stahl, Lenkswischenstange Al Servoventilgehäuse Al		Aramid-Wellrohr zwischen Lenkrad und Lenkgetriebe	
33 Hinterachse	Koppellenkerachse aus Stahl		wie S-Klasse	aus GFK, Anschlusssteile Al
34 Bremsen	konventionell		hydr. Bremskraftverstärkung	
35 Servoelemente, Energiespeicher	konventionell Stellmotoren Al-Gehäuse			
36 Räder und Bereifung	mehrteilige LM-Räder: Außenteil/Felgenstern Mg, gegossen; Innenteil/Felgenbett Al, gedrückt; Blende Al		Felgen Aluminiumblech, Notrad Textilgürtelreifen Tragreifen wie Serie	Räder Vinylsterharz mit 65% Glasfaseranteil
37 Federung, Dämpfung	vorn: Progressive Kegelstumpfeder aus Stahl, ob. Federsteller Al mit Gummieinlage, Dämpfergehäuse Al, hinten: Gas-Feder-Dämpfer-Elemente mit Gummi-Rollbölgeln		Federbeine Al	
41 Karosserie, Struktur Sicherheitselemente	vorgesehen HSLA-Stahl, Prototypen aus Kostengründen konv. Stahlele	Holme, Pfosten, Träger: Stahl Dach: Plattensandwich GFK-Schalen mit Al- Wabenkern Bodengruppe: Deckschicht GFK Kern PU-Hartschaum	Selbstragende Stahlbauweise auch mit hochfesten Blechen, A-Skulenverkleidung PU	Tragstruktur Stahlele, Anbauteile Kunststoff
42 Karosserie, Außenhaut, feste Teile	Softnose, Haubenpolsterung aus PUR Bayflex/Bayfill.	Kotflügel Al, geschraubt und geklebt	Softnose, Kotflügel vorn: PUR-RIM, 20 % GF, PUR-EA-Stoßabsorber	Vorderfront, Heckabschluß GFK-SMC Träger, Außenhaut PUR
43 Karosserie, Klappen, Hauben, Türen	Haubenunterbau GFK oder Al Türen und Heckklappe aus Al Türverstärkungen Al Scharnierverbund Stahl Heckklappe Al	Fronthaube: Al-Schalen/Wabenkern aus Phenolharz getränktem Papier, Heckklappe: Epoxidharzgetränkte Aramidfasermatten, Türen: Al, Seitenaufprallschutz HSLA	Türen u. Motorhaube Al-Blech, Heckklappe Acrylglas mit CFK-Rahmen	Fronthaube Al, Heckklappe Kunststoff Türen Stahlele, Radhausschalen Kunststoff
44 Karosserie, Stoßfänger	Softnose und Heck Haut elast. PUR-RIM (Bayflex), Kern PUR-halbbart (Bayfill)		Stoßfänger PU-Schaum Träger hinten CFK Träger vorn Al	Träger Frontverkleidung GF-UP

Fahrzeugteil, Baugruppe	UNI-CAR	Audi Fo-Auto	Daimler Benz Fo-Auto	Volkswagen Fo-Auto
45 Scheiben	Frontscheibe VSG (Sekuriflex) Hecktürscheibe (ESG) Seitenscheiben ESG mit Sekurifolie (VSG 5,3 mm, ESG 3 mm)		außer Frontscheibe Acrylglas beschichtet, eingeklebt Frontscheibe Sekuriflex	Frontscheibe Sekuriflex, Heckscheibe Glas, Tüldreiecksfenster, hintere Seitenscheiben Polycarbonat Kratzfest silikatbeschichtet
51 Innenraumgestaltung, Ausstattung,	PUR-Schaumpolster auf Al-Träger		Schaumpolster in Türen	
52 Sitze	Gestell Stahl, Polster PUR u. PS, Bezug im Colancco- Verfahren vorgeformt		Sitzschalen GFK, Holme CFK, Federkernpolster	Schale Polyamid 6, 30 % GF, Hebel u. a. dito, Vollschaumpolster PUR
53 Bedienelemente	Material konventionell			
54 Rückhaltesysteme	konventionell, Gurtstrammer		Air-Bag, Gurtstrammer	
55 Innenraum, Sicherheits- elemente	Polster PUR		Türpolster	Schalttafelgehäuse Spritzguß
61 Allgemeine Elektrik	konventionelle Kabelbäume, Isolierung elektronenvernetzt, Multiplexanlage nur im Heck		Multiplexverkabelung	
62 Instrumente	quasianaloge LCD-Displays		quasianaloge LCD-Displays	
63 Leuchten, Signalgebung	Abdeckung vor Scheinwerfer- schacht im Softface PC oder PMMA, kratzfest beschichtet	Streuscheiben aus PC	Scheinwerferstreuscheiben PMMA	
64 Belüftung, Heiz- und Klimaanlagen	konventionell		Wärmeröhre (Heatpipes) für Innenraumklimatisierung	
71 Ausrüstung Motor und Fahrgestell, Befestigungsteile, Lager	konventionell	Dämpfung der Motorlagerung elektronisch an Motordrehzahl anpassbar	konventionell	
72 Ausrüstung Karosserie, Mechanik, Schösser, Zierteile	Ramschutzleisten rundum PUR-RRIM		konventionell	Regenleisten Gummi, Heckspoiler glasfaserver- stärkter Spritzguß
91 Farbgebung, Lack	PUR-Lack auf PUR und Stahl		konventionell	PUR-Lack
92 Korrosionsschutz	konventionell		Vorderkotflügel PUR	

Fahrzeugteil, Baugruppe	FIAT VSS	Peugeot Vera	Pininfarina / Audi Quattro	Minicare RSV
01 Fahrzeugauslegung allgemein	Stahlgerippe entsprechend FIAT Ritmo, Ritmo-Mechanik, Anbauteile alternative Werkstoffe, variable Karosserie	Basis Peugeot 305, Ziel Energieersparnis durch Leichtbau, verbesserte Motoren und Aerodynamik	Design- und Konzeptstudie auf Fahrwerk Audi Quattro	Stahlblechstruktur schaumgefüllt, Außenhautteile auswechselbar, Heckmotor, Flügeltüren
02 Maße, Gewichte, Fahrleistungen	Ritmo-Klasse, Karosserie 20% leichter	entspr. 305, Fahrzeug 190 kg leichter, (Vera 02 mit Turbodiesel 145 kg)	Gew. 1300 kg, Länge 4,14 m Breite 1,56 m, Höhe 1,265 m	untere Mittelklasse
03 Kostenrahmen, Lebensdauer	Fertigung in Baugruppen, 5 h Einsparung bei Montage Lebensdauer 20 Jahre	Herstellung teurer als 305, Energiebilanzausgleich nach 6000 km Laufleistung	Herstellung teurer als Serien-Fz., mit diesen Werkstoffen heute unmöglich	Karosseriestruktur ca. 40% teurer, Fahrzeug dadurch ca. 10% teurer
11 Motor, Antriebsaggregate	entspr. Ritmo	Leichtmetallmotor, Ventildeckel Kunststoff (STX)	entspricht Audi Quattro	Honda Accord
12 Steuerung und Regelung, Stellglieder	entspr. Ritmo	entspr. 305	entspricht Audi Quattro	
13 Kraftstoffaufbereitung, Vergaser, Filter, Ansaugrohre	entspr. Ritmo	Vergasergehäuse Magnesium	entspricht Audi Quattro	
16 Kraftstoffbehälter, -leitungen	Tank PE	entspr. 305	85 l Kunststofftank	PUR-Haut, schaumgefüllt
17 Einrichtungen zur Minderung von Umweltbelastungen				
18 Kühlsystem	entspr. Ritmo	entspr. 305	entspricht Audi Quattro	entspricht Honda Accord
19 Abgasanlage	entspr. Ritmo	Krümmen Nirosta-Stahl	entspricht Audi Quattro	entspricht Honda Accord
23 Getriebe	entspr. Ritmo	entspr. 305	entspricht Audi Quattro	entspricht Honda Accord
26 Wellen, Gelenke	entspr. Ritmo	entspr. 305, teilweise gewichtsoptimiert	entspricht Audi Quattro	entspricht Honda Accord
31 Vorderachse	entspr. Ritmo	entspr. 305 teilweise gewichtsoptimiert	entspricht Audi Quattro	Fiat X1/9

Fahrzeugteil, Baugruppe	FIAT VSS	Peugeot Vera	Pininfarina / Audi Quattro	Minicars RSV
32 Lenkung	entspr. Ritmo	PU-Zahnstange Spurstangen Stahl gewichts- optimiert	entspricht Audi Quattro	
33 Hinterachse	entspr. Ritmo	konventionell, gewichtsoptimiert	entspricht Audi Quattro	Fiat XI/9
34 Bremsen	entspr. Ritmo	Hauptbremszylinder Aluminium	entspricht Audi Quattro	Fiat XI/9 und ABS
35 Servoelemente, Energie- speicher	entspr. Ritmo		entspricht Audi Quattro	
36 Räder und Bereifung	entspr. Ritmo	Räder Glas- und Kohlefaser- verstärktes Epoxidharz, Reifen Syntetikharz	neues Design	LM, pannensichere Reifen
37 Federung, Dämpfung	entspr. Ritmo	konventionell, gewichtsoptimiert	entspricht Audi Quattro	Fiat XI/9
41 Karosserie - Struktur, innere Bereiche, Sicherheitszonen	Fahrgastzelle Stahlblech, verzinkt, vordere und hintere Abschnitte HSLA-Stahl, Kofferraumboden PC, Überrollbügel St-Blech	hochfester Stahl HLE 34, 40	Bodengruppe Audi Quattro Stoßflächen vorn u. hinten Kevlar-Sandwich	Stahlblech, Hohlprofile PUR- schaumgefüllt, Pfosten und Träger HSLA
42 Karosserie - Außenhaut, feste Teile	Frontteil PC, Dach glasfaser- verstärkter Polyesterschaum, Kotflügel SMC (GF-UP), Äußere Flankenteile SMC, Innere Flankenteile PC, Heckteil PC	vorderer Kotflügel ABS Radkästen PP	Dach und Seitenwände Alu- minium Kotflügel vorn St/PP/ST-La- minat.	Alu- oder GFK-Oberfläche, PUR-Schaumfüllungen, demontierbare Außenteile
43 Karosserie - Klappen, Hauben, Türen	Motorhaube glasfaserver- stärkter Polyesterschaum, Heckklappe und Türen SMC, Türverstärkung HSLA-Stahl	Türen alternativ GF-UP / Al., Motorhaube und Kofferraum- deckel GF-UP	Türen Metall-Kunststoffflam- inat Stahl/PP/Stahl 0,2/0,6/0,2 mm, Heckscheibenrahmen CFK	Türen Alu verstärkt mit schaumgefülltem Träger, Hauben und demontierbare Außenteile GFK-PUR-Sandwich
44 Karosserie - Stoßfänger	Stoßfänger und Querträger PC	Stoßfänger PUR	Stoßfänger Sandwich Kevlar/Honigwaben/Kevlar Waben:Aramidpapier oder Alu	Stoßfänger PUR-Integralschaum mit Federstahleinlage
45 Scheiben		Front und Seite Glas, Heckscheibe PC	Front und Seite Glas, Heckfenster PC	Mylar

Fahrzeugteil, Baugruppe	FIAT VSS	Peugeot Vera	Pininfarina / Audi Quartz	Minicars RSV
51 Innenraumgestaltung, Ausstattung,	Armaturenbrett mod. Polyphenyl	entspr. 305	Sitz und Türverkleidungen aus "Fallschirmgewebe"	
52 Sitze		Vordersitzrahmen GF-PP	Sitzrahmen CFK (Epoxid)	Kopfstützen Mylar/PVB
53 Bedienelemente		Pedallagerblock Kunststoff (STX), Pedale Aluminium		
54 Rückhaltesysteme			konventionell	
55 Innenraum, Sicherheitselemente				Schaumpolster PUR
61 Allgemeine Elektrik	konventionell	NC-Batterie Lichtmaschine u. Starter konventionell, gewichtsoptimiert	konventionell	
62 Instrumente			elektrische Anzeigen	elektronisch incl. Anzeige
63 Leuchten, Signalgebung	konventionell, montierbar in Kunststoffbaugruppe	Scheinwerfer PC	elliptische Reflektoren	konventionell
64 Bellüftung, Heiz- und Klimaanlage	Kunststoffbaugruppe	entspr. 305	Audi	konventionell
71 Ausrüstung Motor und Fahrgestell, Befestigungsteile, Lager	entspr. Ritmo	Werkstoffe konventionell, gewichtsoptimiert	Audi	konventionell (Honda Accord, Fiat XL/9)
72 Ausrüstung Karosserie, Mechanik, Schlösser, Zierteile		Türöffner GF-Acetatharz	Audi	konventionell
91 Farbgebung, Lack	separat lackierte Baugruppen			
92 Korrosionsschutz	Verzinkte St-Blechteile Kunststoff-Außenhaut	entspr. 305	Verzinkte St-Blechteile	Hohlräume PUR-gefüllt

Fahrzeugteil, Baugruppe	Calspan RSV	Audi Quattro Rallye	VW Passat Serie 1982	Porsche 995
01 Fahrzeugauslegung allgemein	RSV auf Simca 1308-Basis ausgelegt entsprechend Programm des NHTSA	Reine Sportversion, begrenzte Haltbarkeit, keine Alltags-tauglichkeit notwendig	Mittelklassefahrzeug, 5 Plätze Tragstruktur Stahl	Wie Porsche 928, jedoch 4 Sitze Entspricht BMFT-Auto 2000
02 Maße, Gewichte, Fahrleistungen	Länge 4,52 m, Gewicht 1215 kg, Motor 1,7 l	Basis Audi Quattro, aber leichter und schneller		Gewicht 1250 - 1290 kg Länge 4,52 m, 0 - 100 km/h: 10 s; 200 km/h
03 Kostenrahmen, Lebensdauer	10 Jahre	Kosten und Lebensdauer nicht wichtig		Lebensdauerpotential 17-18 J.
11 Motor, Antriebsaggregate		Zahnriemenschutz Aramid-Hand-laminat		Ganz-Aluminium, Otto-Motor 2,2 l 4-Ventil-Motor 3 l 8-Zylinder-Motor
12 Steuerung und Regelung, Stellglieder				Motor-Getriebe-Zentralelekt.
13 Kraftstoffaufbereitung, Vergaser, Filter, Ansaugrohre		Ansaugrohre CFK (Epoxidharz), Luftfiltergehäuse Aramid/C-FK		
16 Kraftstoffbehälter, -leitungen		Tank Aramid-Laminat		
17 Einrichtungen zur Minderung von Umweltbelastungen			Schallisolierung Motorhaube: PUR-Schwerschicht, Schalldämmung Spritzwand: EVA, PUR-Schaum	
18 Kühlsystem		Luftführungsteile Aramid / C-FK Kühlerhütze, Lüfterträger Aramid/C-FK		Wie Porsche 928
19 Abgasanlage				Wie Porsche 928
23 Getriebe				Doppelkupplungsgetriebe
26 Wellen, Gelenke		Kardanwelle ev. CFK		Wie Porsche 928
31 Vorderachse		entspricht Quattro		Gußteile Aluminium

Fahrzeugteil, Baugruppe	Calspan PSV	Audi Quattro Rallye	VW Passat Serie 1982	Porsche 995
32 Lenkung		entspricht Quattro		Wie Porsche 928
33 Hinterachse		Gelenkwellenschutz Gummi mit Aramid-Gewebe-Halter		Gußteile Aluminium
34 Bremsen		entsprechend Rallye-Anforderungen		Wie Porsche 928
35 Servoelemente, Energiespeicher		entsprechend Rallye-Anforderungen		
36 Räder und Bereifung		entsprechend Rallye-Anforderungen		Aluminium
37 Federung, Dämpfung		entsprechend Rallye-Anforderungen		
41 Karosserie, Struktur Sicherheitselemente	Träger und Verstärkungen HSLA wo notwendig, nicht generell	Auffahr-, Ölwanenschutz Aramid-Handlaminat/Sandwich mit Stahlnetzzeinlage	Stahl	Transaxle-Rahmen Stahl, feuerverzinkt, Projekt Alternativ Ganz-Aluminium-Karosserie
42 Karosserie, Außenhaut, feste Teile	Dach u.a. Sinca (Stahl)	Heckspoiler Aramid/Sandwich	Stahlblech, Spoiler, Ziergrill ABS	Al-Mg-Si-Legierung, aushärtbar
43 Karosserie, Klappen, Hauben, Türen	Motorhaube u. Heckklappe Alu, Türen Stahl (Sinca)	Front- und Heckklappe, Türen, Kotflügel und Seitenteile Aramid Handlaminat, teilweise mit C-Faser verstärkt	Stahlblech Dichtungen EPDM	Al-Mg-Si-Legierung, aushärtbar, Planke hochfester Stahl
44 Karosserie, Stoßfänger	vorn und hinten PUR-Haut, PUR-EA-schaume füllt; vorn Softface, Befestigungsteil Stahl	Aramidfaser Epoxidharz mit Stahlgewindeinsätzen	PP / EPDM	Mikrolegierter Stahl, PUR-Haut
45 Scheiben		Seiten-, Tür-, Heckscheiben aus PC	Glas, Scheibendichtungen EPDM	
51 Innenraumgestaltung, Ausstattung,		abgemagert	Türinnen-,Seitenwandverkleidung: hm-PP,PVC-Folie PUR-hinterachstum; Armaturenbrett Instrumententräger: ABS/PVC-Folie,HF.	Tür-Innen-Polster PUR, Dachrahmenpolster PUR

Fahrzeugteil, Baugruppe	Calepan RSV	Audi Quattro Rallye	VW Passat Serie 1982	Porsche 995
52 Sitze		entspr. Sportanforderungen		Rahmen mikrolegierter Stahl
53 Bedienelemente		entspr. Sportanforderungen		
54 Rückhaltesysteme		entspr. Sportanforderungen		
55 Innenraum, Sicherheits- elemente	Tür- und Kniepolster Alu- waben	entspr. Sportanforderungen	A-, B-, C-Säulenverkleidung: HF, ABS/PVC-Folie PUR-hinter- schäumt	
61 Allgemeine Elektrik		entspr. Sportanforderungen		Dezentrales Multiplex, Kupferleiter
62 Instrumente		entspr. Sportanforderungen		
63 Leuchten, Signalgebung		entspr. Sportanforderungen	Blinker, Nebelscheinwerfer, Rückleuchten: Gehäuse: ABS, Fenster: PMMA.	
64 Bellüftung, Heiz- und Klimaanlagen		entspr. Sportanforderungen	Heizungs-, Lüftungskanäle: PE oder PP	wie 928
71 Ausrüstung Motor und Fahrgestell, Befestigungsteile, Lager		entspr. Sportanforderungen		wie 928
72 Ausrüstung Karosserie, Mechanik, Schlösser, Zierteile	Vermeidung von Chrom	entspr. Sportanforderungen	Außenspiegel ABS/Zinkdruckguß Regenrinnenzierleiste CAB, Embleme ABS, Zierleisten PVC, Beschläge PA	wie 928
91 Farbgebung, Lack		entspr. Sportanforderungen		wie 928
92 Korrosionsschutz		entfällt		wie 928

Quelle	[2] [227]	[114]	[2] USA	[109] USA	[13] USA	[2]	[124] Japan	[141]	[158]	[141] Japan	[109] USA	[37] [213] [218]	[156]	[196]	ø	±			
Jahr	1973	1973	1974	1974	1976	1978	1978	1979	1980	1980	1980	1980	1980	1981					
Stahl	59,7	60,5	58,3	59,6	61,5	63	64,6	67,7	60	76,7	72,1	54	58,4	58	61,5	5,9			
Eisen	14,6	15,8	15,4	16,1	16,8		12,5		14,5				16	9,0	15	14,6	2,3		
Gummi			5,2	5,0			5,6				5,0	3		3	4,5	1,2			
Glas	11,7	10,5	2,5	2,5		3	2,4	18	11,5	15,3	2,5			3	2,7	0,3			
Lack																			
Schmierst.																			
Blei	1,4	1,3		0,7							0,8		20		1,1	0,4			
Zink, Zinn	1,4	1,5	0,9	0,6	2,2	0,2	2,7		4		0,5					1,0	0,5		
Kupfer	1,4	1,4	0,6	0,7							0,6					0,94	0,4		
Aluminium	3,0	3,0	2,2	1,9	2,3	2,3	3,8	3,2	3,5	3,3	3,6	4	4,9	4	3,2	0,8			
Kunststoff	6,7	6,0	4,0	3,4	3,9	4,8	4,9	11,1	6,5	4,7	5,9	6	7,7	6	5,8	1,9			
Holz						0,7													
Sonstige			10,7		13,1	17,1	3,5				9,0	17			13,1	4,6			

Bild 131: Materialanteile bei heutigen Pkw; Gewichtsanteile in %, Durchschnitt und Standardabweichung (Ohne Länderangabe: Deutschland).

Eingesetzte Roboter	Jahr	Italien	Japan	USA	Deutschland
Punkt-Schweißen	1980	26,7 ‰	44,8 ‰	10,0 ‰	24,4 ‰
	1990	72,7 ‰	77,5 ‰	35,0 ‰	72,1 ‰
	2000	84,0 ‰	89,7 ‰	62,0 ‰	85,4 ‰
Lichtbogen-Schweißen	1980	16,0 ‰	15,7 ‰	0,0 ‰	8,7 ‰
	1990	55,0 ‰	55,9 ‰	45,0 ‰	52,6 ‰
	2000	62,3 ‰	73,7 ‰	77,0 ‰	73,6 ‰
Beschichten, Abdichten	1980	18,7 ‰	11,1 ‰	17,0 ‰	21,8 ‰
	1990	56,7 ‰	51,9 ‰	55,0 ‰	69,4 ‰
	2000	72,0 ‰	70,2 ‰	72,0 ‰	84,0 ‰
Material-Handhabung	1980	5,3 ‰	17,9 ‰	12,0 ‰	11,0 ‰
	1990	40,7 ‰	48,1 ‰	35,0 ‰	46,7 ‰
	2000	53,0 ‰	63,5 ‰	40,0 ‰	64,1 ‰
Zusammenbau	1980	3,0 ‰	4,7 ‰	4,0 ‰	6,1 ‰
	1990	37,3 ‰	29,4 ‰	25,0 ‰	35,0 ‰
	2000	58,0 ‰	47,5 ‰	45,0 ‰	56,5 ‰
Messen und Kontrollieren	1980	1,7 ‰	8,0 ‰	15,0 ‰	6,7 ‰
	1990	22,7 ‰	39,2 ‰	35,0 ‰	34,5 ‰
	2000	36,3 ‰	56,6 ‰	55,0 ‰	53,3 ‰
Motoren-Fertigung	1980	2,0 ‰	12,8 ‰	25,0 ‰	32,5 ‰
	1990	22,3 ‰	42,5 ‰	50,0 ‰	61,1 ‰
	2000	34,3 ‰	60,5 ‰	75,0 ‰	81,3 ‰
Zulieferer	1980	2,7 ‰	8,0 ‰	0,0 ‰	8,0 ‰
	1990	21,7 ‰	36,8 ‰	17,0 ‰	42,1 ‰
	2000	28,7 ‰	54,0 ‰	60,0 ‰	62,2 ‰

Bild 132: Zukünftiger Einsatz von Industrierobotern [212].

Werkstoffe	Jahr	Italien	Japan	Schweden	USA	Deutschland
Stahl incl. HSLA	1980	59,5 %	61,0 %	57,0 %	58,0 %	64,1 %
	1990	56,5 %	56,4 %	46,3 %	58,0 %	59,3 %
	2000	51,5 %	51,0 %	39,4 %	55,0 %	53,7 %
Eisen	1980	10,0 %	9,6 %	21,8 %	15,0 %	10,0 %
	1990	8,5 %	8,1 %	15,4 %	11,0 %	8,3 %
	2000	7,0 %	6,8 %	12,0 %	9,0 %	6,7 %
Aluminium	1980	4,0 %	3,0 %	3,5 %	5,0 %	3,6 %
	1990	6,0 %	5,1 %	7,8 %	9,0 %	6,1 %
	2000	8,5 %	6,5 %	12,5 %	11,0 %	9,1 %
Kunststoff (nicht- tragend)	1980	7,5 %	5,2 %	6,2 %	4,0 %	6,8 %
	1990	8,5 %	8,2 %	9,1 %	5,0 %	9,2 %
	2000	9,5 %	10,7 %	10,3 %	5,0 %	10,8 %
Kunststoff (tragend)	1980	0,0 %	0,0 %	0,7 %	2,0 %	2,3 %
	1990	4,0 %	1,6 %	9,1 %	8,0 %	5,0 %
	2000	8,0 %	4,0 %	10,3 %	12,0 %	8,6 %
Glas	1980	6,0 %	3,5 %	5,3 %	3,0 %	4,1 %
	1990	4,5 %	3,6 %	5,7 %	2,0 %	4,1 %
	2000	4,0 %	3,7 %	5,8 %	2,0 %	3,7 %
Gummi	1980	7,0 %	4,8 %	4,6 %	4,0 %	5,4 %
	1990	6,0 %	5,0 %	5,3 %	2,0 %	5,1 %
	2000	5,5 %	5,0 %	5,4 %	3,0 %	4,8 %
Andere	1980	6,0 %	12,9 %	0,7 %	9,0 %	3,6 %
	1990	6,0 %	12,0 %	0,7 %	5,0 %	3,0 %
	2000	6,0 %	12,3 %	0,7 %	3,0 %	3,0 %

Bild 133: Materialzusammensetzung zukünftiger Personenkraftwagen
(Prozentangaben bezogen auf Materialgewicht) [212].

Leergewicht	Jahr	Italien	Japan	Schweden	USA	Deutschland
unter 400 kg	1980	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,3 %
	1990	0,0 %	1,3 %	0,1 %	0,0 %	0,6 %
	2000	0,0 %	2,7 %	0,3 %	0,0 %	5,1 %
401 - 600 kg	1980	13,7 %	6,2 %	0,4 %	0,0 %	3,2 %
	1990	10,3 %	8,4 %	1,3 %	0,0 %	5,1 %
	2000	8,7 %	9,8 %	2,4 %	2,0 %	7,2 %
601 - 800 kg	1980	33,7 %	13,9 %	5,1 %	0,0 %	19,0 %
	1990	37,0 %	17,9 %	10,8 %	2,0 %	24,6 %
	2000	40,0 %	22,4 %	15,4 %	5,0 %	30,1 %
801 -1100 kg	1980	40,3 %	55,9 %	37,6 %	10,0 %	44,1 %
	1990	42,7 %	52,5 %	43,5 %	18,0 %	44,0 %
	2000	44,0 %	47,4 %	49,4 %	25,0 %	38,5 %
1101-1500 kg	1980	9,7 %	23,9 %	51,7 %	42,0 %	26,0 %
	1990	8,0 %	19,8 %	40,5 %	60,0 %	19,3 %
	2000	6,0 %	17,3 %	29,7 %	58,0 %	15,1 %
über 1500 kg	1980	2,7 %	0,1 %	5,2 %	48,0 %	6,6 %
	1990	2,0 %	0,1 %	3,8 %	20,0 %	6,8 %
	2000	1,3 %	0,1 %	2,9 %	10,2 %	4,6 %

Bild 134: Abschätzung des Gewichts zukünftiger Pkw in verschiedenen Ländern [212].

	E-Modul (N/mm ²)	Spez. Gew. (kg/dm ³)	Gewicht gl. Dehnsteif.	Gewicht gl. Biegesteif.
Stahl	210 000	7,8	1	1
Beryllium	290 280	1,8	0,17	0,21
CFK UD	190 000	1,7	0,24	0,23
Titan	105 200	4,5	1,1	0,73
CFK	100 000	1,7	0,46	0,28
Zink	94 000	7,1	2,1	1,2
Aluminium	71 000	2,7	1,0	0,50
Glas	70 000	2,4	0,94	0,45
Magnesium	45 150	1,7	1,0	0,37
GFK UD	38 000	1,8	1,3	0,41
AFK (Zug)	27 000	1,4	1,4	0,36
SMC	10 000	1,5	4,0	0,53
Phenolharz m. Baumw.	8 500	1,3	4,2	0,50
PA 6.6 30 % Glas	7 500	1,4	5,0	0,55
PP 40 % Gl.	5 500	1,2	5,9	0,52
PU-RRIM, 30 % GK	5 000	1,3	7,0	0,58
PP-GM 30	4 600	1,2	7,0	0,55
PA-GM 30	4 500	1,3	7,8	0,60
ABS	4 000	1,1	7,4	0,53
PVC	3 200	1,9	15,8	0,97
PMMA	3 000	1,2	10,7	0,63
PC	2 500	1,2	13,0	0,67
PBTB + PC	2 400	1,2	13,5	0,68
PA 6	2 400	1,3	14,6	0,74
PC/PBT	2 000	1,2	16,1	0,73
PU-RRIM, 15 % GK	1 700	1,1	17,4	0,70
PA 6 mod.	900	1,1	32,9	0,87
EPDM 30 % GK	830	1,1	35,7	0,89
PU RIM	700	1,1	42,3	0,94

Bild 135: Relative Gewichte von Bauteilen gleicher Steifigkeit aus verschiedenen Werkstoffen; Berechnung nach Plattentheorie, Wanddicke t variabel. (E-Modul und spezifisches Gewicht nach Angaben aus [1], [40], [42], [113], [135], [138], [159], [163], [166], [172], [263], [348], [353], [354], [355], [356], [357]).

	50 % Dehng. 50 % Bieg.	20 % Dehng. 80 % Bieg.	Steifgkt. prop. E _{1,5}	Steifgkt. prop. E ₂
Stahl	1	1	1	1
Beryllium	0,19	0,20	0,19	0,20
CFK UD	0,23	0,23	0,23	0,23
Titan	0,95	0,82	0,92	0,82
CFK	0,37	0,31	0,36	0,32
Zink	1,6	1,4	1,6	1,4
Aluminium	0,76	0,60	0,71	0,60
Glas	0,70	0,55	0,65	0,54
Magnesium	0,70	0,51	0,62	0,48
GFK UD	0,84	0,58	0,72	0,54
AFK (Zug)	0,88	0,56	0,70	0,50
SMC	2,3	1,2	1,5	0,88
Phenolharz m. Baumw.	2,4	1,2	1,5	0,85
PA 6,6, 30 % Glas	2,8	1,4	1,7	0,95
PP 40 % Gl.	3,2	1,6	1,7	0,95
PU-RRIM, 30 % GK	3,8	1,9	2,0	1,1
PP-GM 30	3,8	1,8	2,0	1,0
PA-GM 30	4,2	2,0	2,2	1,1
ABS	3,4	1,9	2,0	1,0
PVC	8,4	3,9	3,9	2,0
PMMA	5,7	2,6	2,6	1,3
PC	6,8	3,1	2,9	1,4
PBTB + PC	7,1	3,2	3,0	1,4
PA 6	7,7	3,5	3,3	1,6
PC/PBT	8,4	3,8	3,4	1,6
PU-RRIM, 15 % GK	9,1	4,1	3,5	1,6
PA 6 mod.	16,9	7,3	5,3	2,1
EPDM 30 % GK	18,3	7,9	5,6	2,2
PU RIM	21,6	9,2	6,3	2,4

Bild 136: Bewertete relative Gewichte von Bauteilen gleicher Steifigkeit aus verschiedenen Werkstoffen; Wanddicke t variabel, Form nach Lastannahme. (E-Modul und spezifisches Gewicht nach Angaben aus [1], [40], [42], [113], [135], [138], [159], [163], [166], [172], [263], [348], [353], [354], [355], [356], [357]).

	Spez. Gew. (kg/dm ³)	Energieauf. (kWh/kg)	Energieauf. im Vergl. zu Stahl	Energieauf. (kWh/cm ³)	Energieauf. im Vergl. zu Stahl
Stahl	7,8	9,6	1	0,75	1
Kupfer	8,9	26,0	2,7	2,33	3,1
Guß Eisen	7,8	10,0	1,0	0,78	1,0
Zink	7,1	18,5	1,9	1,32	1,8
Aluminium	2,7	58,0	6,0	1,57	2,1
Glas	2,4	12,0	1,3	0,29	0,4
Magnesium	1,7	113,0	11,8	1,97	2,6
SMC	1,5	20,0	2,1	0,30	0,4
Phenolharz m. Baumw.	1,3	25,6	2,7	0,34	0,5
PA 6.6, 30 % Glas	1,4	47,0	4,9	0,66	0,9
PP 40 % Gl.	1,2	25,0	2,6	0,30	0,4
PP-GM 30	1,2	30,0	3,1	0,36	0,5
PA-GM 30	1,3	51,5	5,4	0,67	0,9
ABS	1,1	25,0	2,6	0,28	0,4
PVC	1,9	13,0	1,4	0,24	0,3
PMMA	1,2	22,0	2,3	0,26	0,4
PC	1,2	41,0	4,3	0,49	0,7
PBTB + PC	1,2	27,0	2,8	0,32	0,4
PA 6	1,3	41,0	4,3	0,53	0,7
PU-RRIM, 15 % GK	1,1	9,0	0,9	0,10	0,1

Bild 137: Energieaufwand der Werkstoffe im Vergleich zu Stahl; (berechnet nach Angaben aus [2], [114], [146], [215], [217], [223], [242], [251], [309], [313], [338] [359] und bis [361]).

	Volumen bei Stfzt. prop. E-Modul	Energieaufw. Stfzt. prop. E-Modul	Volumen bei Stfzt. prop. g/2	Energieaufw. Stfzt. prop. g/2	Volumen bei Stfzt. prop. g/3	Energieaufw. Stfzt. prop. g/3
Stahl	1	1	1	1	1	1
Kupfer	1,68	5,23	1,30	4,03	1,19	3,70
Gußeisen	1,75	1,82	1,32	1,38	1,21	1,26
Zink	2,23	3,94	1,49	2,64	1,31	2,31
Aluminium	2,96	6,19	1,72	3,60	1,44	3,00
Glas	3,00	1,18	1,73	0,68	1,44	0,57
Magnesium	4,65	12,21	2,16	5,66	1,67	4,38
SMC	21,00	8,41	4,58	1,84	2,76	1,11
Phenolharz m. Baumw.	24,71	11,23	4,97	2,26	2,91	1,32
PA 6.6 30 % Glas	28,00	24,60	5,29	4,65	3,04	2,67
PP 40 % Gl.	38,18	15,30	6,18	2,48	3,37	1,35
PP-GH 30	45,65	21,95	6,76	3,25	3,57	1,72
PA-GH 30	46,67	41,72	6,83	6,11	3,60	3,22
ABS	52,50	19,28	7,25	2,66	3,74	1,38
PVC	65,63	21,42	8,10	2,64	4,03	1,32
PMMA	70,00	24,47	8,37	2,93	4,12	1,44
PC	84,00	55,19	9,17	6,02	4,38	2,88
PBTB + PC	87,50	37,86	9,35	4,05	4,44	1,92
PA 6	87,50	62,28	9,35	6,66	4,44	3,16
PU-RRIM, 15 % GK	123,53	16,33	11,11	1,47	4,98	0,66

Bild 138: Relativer Energieaufwand der Werkstoffe bei verschiedenener Wichtung der Steifigkeit; (berechnet nach Angaben aus [2], [114], [146], [215], [217], [223], [242], [251], [309], [358], [359], [360], [361]).

Quelle	[2]	[37] [360]	[114]	[146] [223]	[215]	[217]	[242]	[251]	[309] [358] [359]	[361]	Mittelwert
Stahl	9	11	9	11		14	8	12	10	12	10
Gußeisen	7		7							17	10
Aluminium	50	52	50	64		56	68		55	72	58
Alu-Guß	21		22							17	20
Magnesium		100		104	135						113
Zink	27		17	16					14	17	18
Kupfer	28		28	14						22	26
Blei	28		14							28	23
Glas				12						12	12
Kunststoff	15		8							25	16
PMMA				16	28						22
PVC			17	10	10					14	13
Phenolharz						40		12	26		26
SMC						22	23		14		20
PA 6.6, 30 % Glas					34	62	50		39		47
PP	17	49	17	15	22	22	30				25
PP, 30 % Glas					21		39				30
PA 6.6		58		38	50				54		50
ABS				22	28						25
PC		49			33	42					41
PBTB				21	33						27
PA 6				40	43			40			41
PU-RRIM, 15 % Glas	9		9								9

Bild 139: Energieaufwand für verschiedene Materialien, in kWh/kg, teilweise umgerechnet aus den Quellen.

A 4 ZUSAMMENSTELLUNG EINER AUSWAHL VON ERGEBNISSEN
DER LITERATURANALYSE

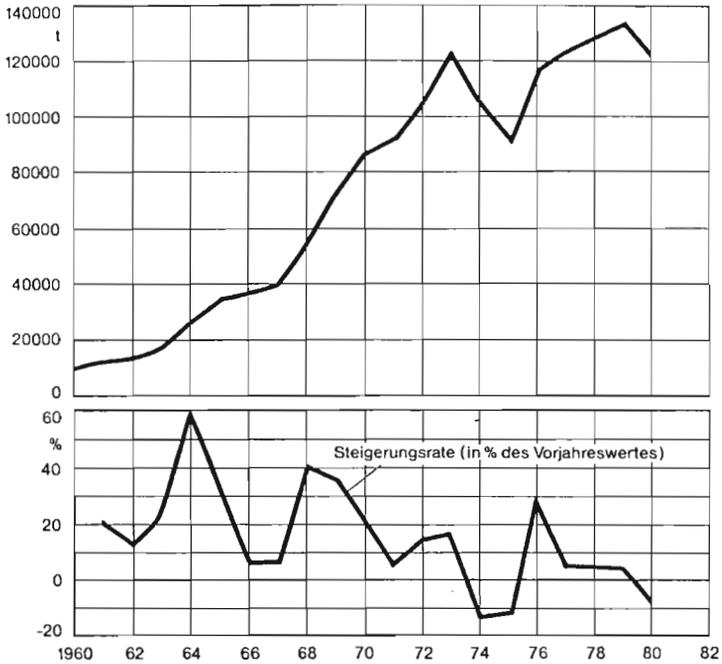


Bild 140: Entwicklung des GfK-Verbrauchs von 1960 bis 1980 in der Bundesrepublik Deutschland [308].

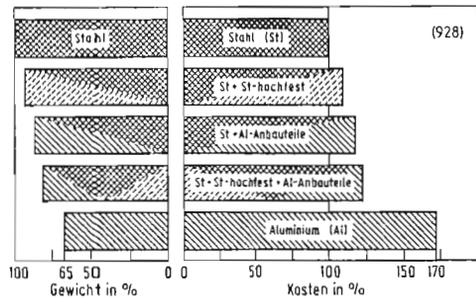
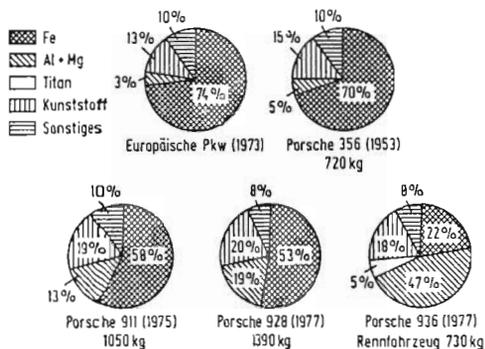


Bild 141: Materialanteile in Europa, den USA und weltweit [214].

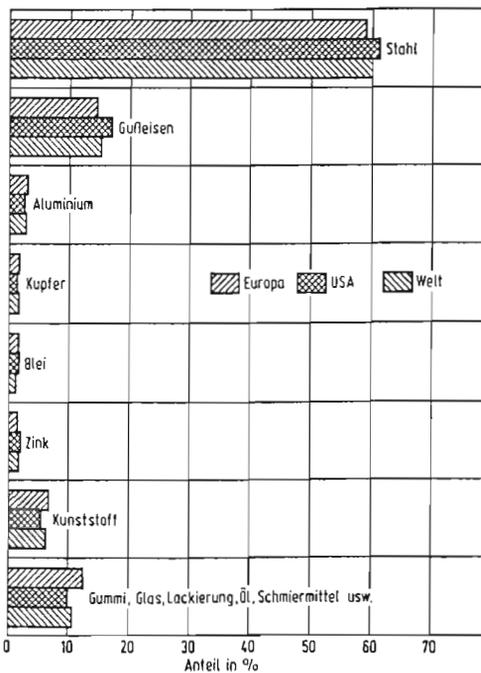


Bild 142: Materialanteile, Gewicht und Kosten bei verschiedenen Sportwagenkarosserien [147].

	bevorzugter Leichtbauwerkstoff			
	Basisfahrzeug	hochf. Stahl	Kunststoff	Aluminium
Hochfester Stahl	25 kg	440 kg	25 kg	25 kg
Anderer Stahl	620 kg	105 kg	170 kg	60 kg
Zusammenbauteile, überwiegend Eisen	75 kg	70 kg	60 kg	45 kg
Gußeisen	110 kg	95 kg	80 kg	20 kg
Kunststoffe	95 kg	95 kg	300 kg	95 kg
Aluminiumbleche	20 kg	20 kg	20 kg	211 kg
Aluminiumguß	40 kg	40 kg	40 kg	60 kg
Anderer	245 kg	230 kg	215 kg	190 kg
Zusammen ca.	1200 kg	1100 kg	900 kg	700 kg

Bild 143: Materialzusammensetzung von Pkws bei unterschiedlich bevorzugten Werkstoffen [156].

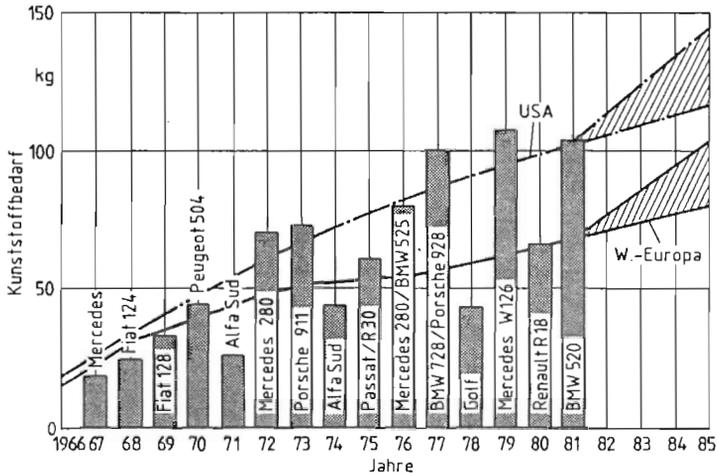
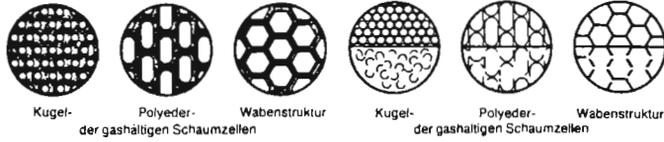


Bild 144: Kunststoff-Bedarf pro Pkw in Westeuropa und den USA [223].

Schaumstoffe



a) geschlossenzellige („unechte“)

b) offenzellige („echte“)

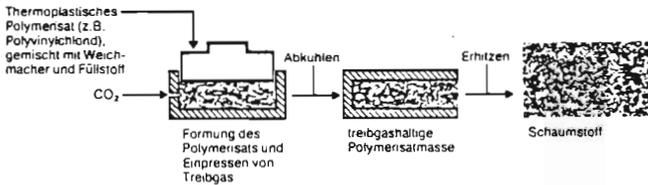
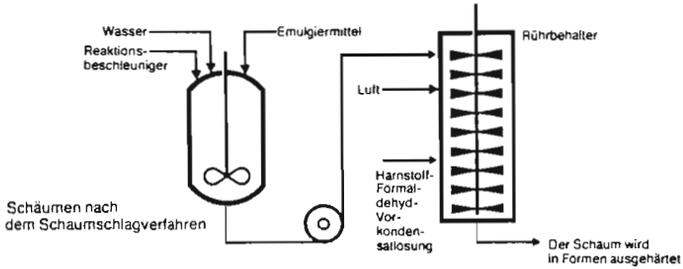
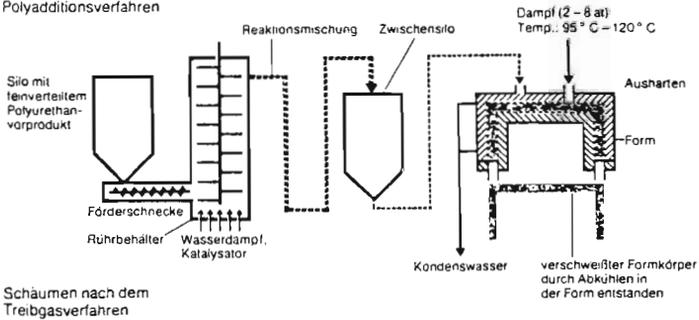
Schäumen nach dem
Polyadditionsverfahren

Bild 145: Verarbeitung von Schaumstoffen [232].

	Handlaminiervorverfahren	Faserspritzverfahren	Vakuumpverfahren	Injektionsverfahren	Vakuuminjektionsverfahren	Nußpreßverfahren	Warmpreßverfahren mit Harzmatte	Warmpreßverfahren mit Preßmasse	Spritzen von Formmassen
Anwendung	kleine Serien und großflächige Teile	kleine Serien und großflächige Teile	kleine Serien und großflächige Teile	kleine bis mittlere Serien	kleine bis mittlere Serien	mittlere Serien	große Serien	große Serien	große Serien
Bauformen	offen, ein- oder mehrteilig	offen, ein- oder mehrteilig	geschlossen, zweiteilig	geschlossen, zweiteilig	geschlossen, zweiteilig	geschlossen, zweiteilig	geschlossen, zwei- oder mehrteilig	geschlossen, zwei- oder mehrteilig	geschlossen, zwei- oder mehrteilig
Werkstoff der Verstärkungsart	Holz GFK Matten Gewebe Roving	Holz CFK Roving	GFK Metall Matten Gewebe	GFK Metall Matten Vorformlinge aus Roving Gewebe	GFK Metall Matten Vorformlinge aus Roving Gewebe	GFK Stahl Matten Vorformlinge aus Roving Gewebe	Stahl vergütet Matten Roving	Stahl vergütet Textilglas geschnitten	Stahl vergütet Textilglas geschnitten
Verarbeitungstemperatur °C	18 bis 60	18 bis 60	18 bis 60	18 bis 60	18 bis 60	18 bis 120	140 bis 150	140 bis 150	140 bis 150
Arbeitsdruck N/mm ²	-	-	bis 0,1	0,3 bis 0,5	bis 0,1	0,5 bis 1,0	5 bis 15	5 bis 15	10 bis 40
glatte Oberfläche möglich	einsseitig	einsseitig	einsseitig oder beidseitig	beidseitig	beidseitig	beidseitig	allseitig	allseitig	allseitig
Oberflächenschicht möglich	ja	ja	ja	ja	ja	bedingt	nein	nein	nein
Wanddickenunterschiede möglich	ja	ja	ja	bedingt	bedingt	bedingt	ja	ja	ja
Verstärkungsrippen möglich	ja	ja	ja	ja	ja	bedingt	ja	ja	ja
Hinstreckmöglichkeiten möglich	bei geteilten Formen	bei geteilten Formen	bei geteilten Formen	bei geteilten Formen	bei geteilten Formen	nein	ja	ja	ja
empfohlene Mindestinnenradien mm	10	10	10	10	10	5	1	1	1
empfohlene Seitenneigung	1 : 25 bis 1 : 50	1 : 25 bis 1 : 50	1 : 25 bis 1 : 50	1 : 25 bis 1 : 50	1 : 25 bis 1 : 50	GFK bis 1 : 50 Stahl bis 1 : 50	1 : 50 bis 1 : 100	1 : 50 bis 1 : 100	1 : 50 bis 1 : 100
Einbettungen möglich	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Taktzeiten (Richtwerte)	30 min bis zu mehreren Tagen	30 min bis zu mehreren Tagen	30 min bis zu 4 Stunden	10 bis 60 min	20 min bis zu 2 Stunden	3 bis 15 min	2 bis 6 min	20 sec bis 2 min	20 sec. bis 1 min
Bestäuben erforderlich	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nur Grat	nur Grat	nur Grat
Reproduzierbarkeit	ausreichend	ausreichend	mittel	gut	mittel	gut	gut	gut	gut
Investitionen	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch	hoch
Arbeitsaufwand	hoch	hoch	hoch	mittel	mittel	mittel	gering	gering	gering

Bild 146: Übersicht über die Faserverbundwerkstoffe [230].

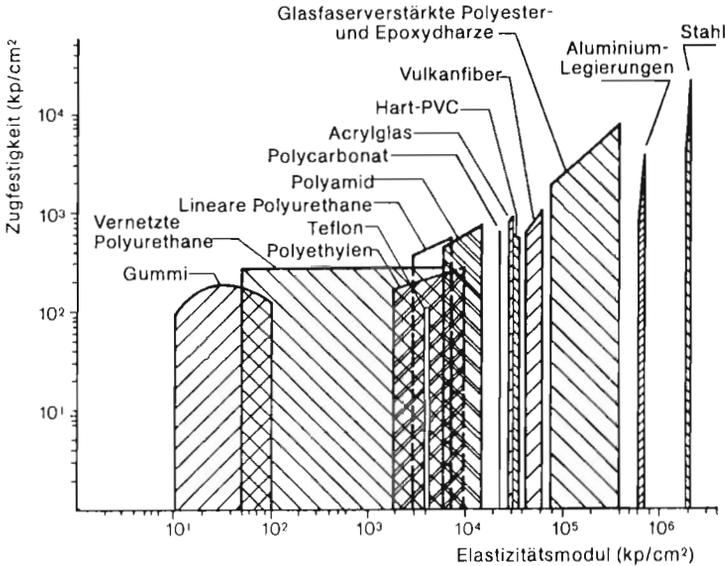


Bild 147: Gegenüberstellung der mechanischen Eigenschaften gebräuchlicher Werkstoffe im Fahrzeugbau ([20], Bayer AG).

	SMC	RIM	RRIM 20 % GF	PA 6 30 % GF	PC	AL	Stahl
Dichte g/cm ³	1,85	1,08	1,25	1,35	1,16	2,70	7,80
Bauteilwanddicke bei Gewichtsgleichheit mit SMC (mm)	2,00	3,40	3,00	2,70	3,20	1,40	0,50
Rel. Biegesteifigkeit bei Gewichtsgleichheit mit SMC	1,00	0,17	0,37	0,61	0,92	2,40	0,30
Rel. Preisvergleich SMC = 1	1,00	1,06	1,11	0,48	0,49	1,43	0,70

Bild 148: Kenndatenvergleich für verschiedene Stoßfängerwerkstoffe [42].

Physikalische Eigenschaft	Einheit	Fasertypen							
		X-Glas-faser	S-Glas-faser	E-Glas-faser	Kevlar Kunstfaser	Borfaser	Kohlenstoff-faser hochfest	Kohlenstoff-faser hochsteif	Kohlenstofffaser ultra hochsteif
Dichte ρ	g/cm ³	2,49	2,49	2,55	1,46	2,5 - 2,7	1,9	2,0	2,0-2,1
Zugfestigkeit σ_B (in Faser- richtung)	N/mm ²	7000	4800	3000	3500 - 4200	1900 - 3700	2400	2000	2000
E-Modul (in Faser- richtung)	N/mm ²	125000	90000	73500	~ 160000	420000 - 450000	240000 - 280000	340000 - 400000	400000 - 550000
Bruchdehnung ϵ_B (in Faser- richtung)	%	5,5	5,2	4,5	~ 2,0	0,4	0,9 - 1,1	0,4 - 0,6	0,3-0,5
Reißlänge σ_B / γ	km	280	190	120	240 - 285	72 - 142	210	100	100 - 120
Dehnlänge E / γ	km	5030	3600	2885	11000	16100 - 17300	12500	17000 - 20000	20000 - 27000
Faserdurchmesser	μ	~ 10	~ 10	3 - 13	—	100	~ 8	~ 7,5	~ 9
Schmelzpunkt	°C	—	~ 1000	840	—	2300	—	—	—

Bild 149: Physikalische Kennwerte von Komponenten von Faserverbundwerkstoffen; Fasern [366].

Physikalische Eigenschaft	Einheit	Harzsystem				
		Polyester	Phenol	Epoxid	Epoxi-Novolack	Polyimid
Dichte ρ	g/cm ³	1,10 - 1,46	1,30 - 1,32	1,15 - 1,35	1,15 - 1,35	1,35 - 1,45
Biegefestigkeit σ_B	N/mm ²	80 - 150	77 - 120	60 - 180	60 - 80	~ 100
Druckfestigkeit σ_B	N/mm ²	90 - 180	85 - 105	10 - 200	90 - 200	> 170
Zugfestigkeit σ_B	N/mm ²	35 - 92	42 - 63	40 - 140	40 - 140	~ 75
Bruchdehnung ϵ_B	%	2 - 4	1,5 - 2,0	2 - 10	2 - 10	1 - 7
Zug-E-Modul E	N/mm ²	1500 - 2000	2800 - 3500	3000 - 4500	3000 - 4500	—
Biege-E-Modul E _b	N/mm ²	2000 - 4500	—	—	—	320
Wärmeformbeständigkeit nach Martens	°C	40 - 130	200 - 250	40 - 180	160 - 300	280 - 450
Viskosität η des ungehärteten Harzes bei RT	cp	300 - 1800	—	100 - 2000	—	—
Wasseraufnahme bei RT	Gew. %	0,15 - 0,60	0,3 - 0,4	0,3 - 0,45	—	—
Härteschrumpf	Vol. %	7 - 12	—	1 - 4	1 - 4	~ 0,32

Bild 150: Physikalische Kennwerte von Komponenten von Faserverbundwerkstoffen; Harze [366].

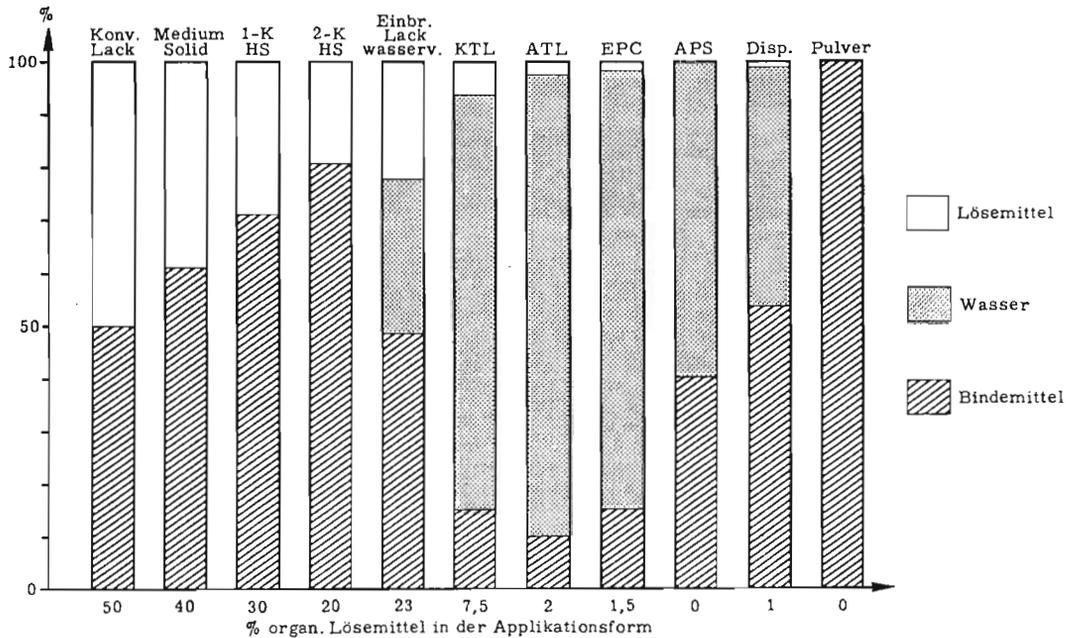


Bild 151: Vergleich des Lösungsmittelgehaltes verschiedener Lackssysteme [239].

Bewertung: 1=schlecht bis 5=gut					
	G F K	Alum.- Strang.	Alum.- K.-Guss	Alum.- Blech	Stahl- Blech
Gewicht	4	3	3	5	1
Kosten	5	3	2	1	4
Formgebung	5	1	5	1	2
Oberfläche	4	5	1	5	5
Entwicklungsaufwand	4	3	5	2	3
Langzeitverhalten	5	5	5	5	3
Schutz vor Beschädigung	3	5	4	4	3
	(30)	(25)	(25)	(23)	(21)

Summen nur als Anhalt

Bild 152: Vergleichende Bewertung von Stoßstangenwerkstoffen [260].

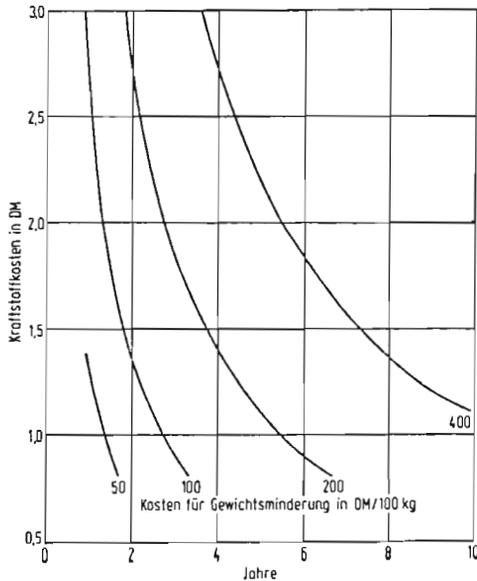


Bild 153: Kraftstoffkosten und Amortisationszeit bei verschiedenen Kosten für die Gewichtsverminderung [214].

Jahr	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982
Feinblech	761	879	882	892	924	984	1001	1113
Roh Eisen	495	475	475	465	460	480	480	490
Aluminium	2500	2604	2850	2900	2780	3339	3260	3708
Blei	1018	1124	1437	1320	2207	1645	1649	1322
Zink	1830	1796	1375	1187	1361	1385	1922	1808

Bild 154: Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (Metalle, Preise in DM/Tonne, Auszug aus [364]).

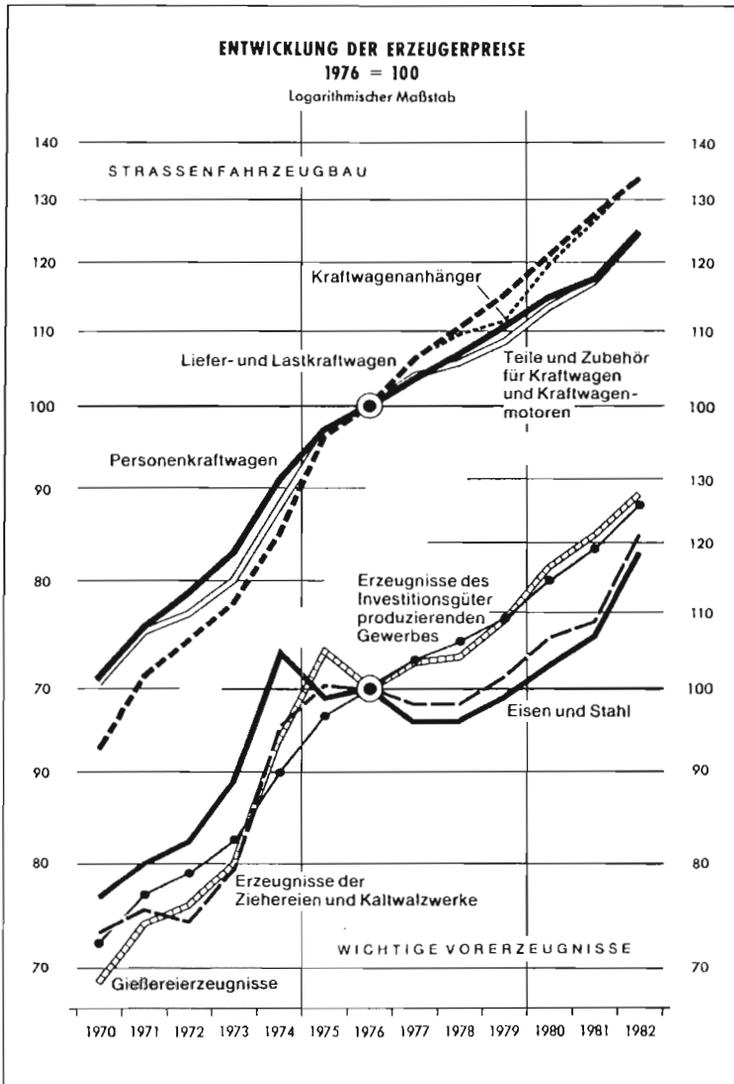


Bild 155: Entwicklung der Erzeugerpreise im Straßenfahrzeugbau und bei wichtigen Vorerzeugnissen [364].

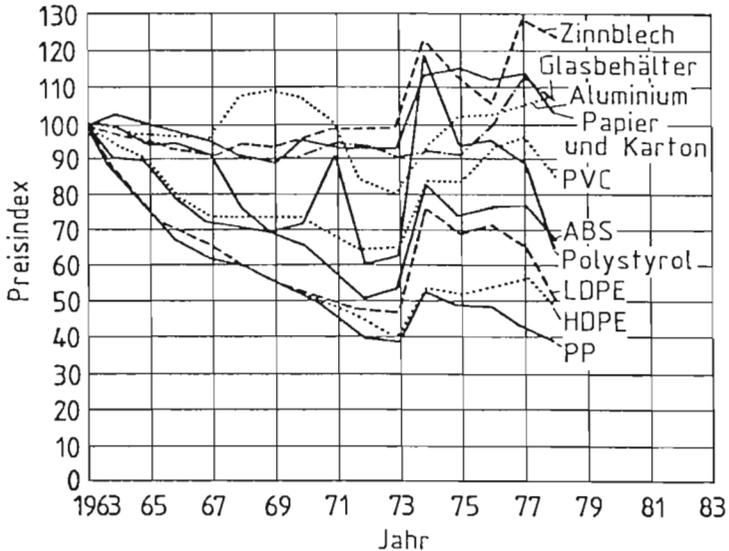


Bild 156: Entwicklung der Rohstoffpreise für verschiedene Werkstoffe ([215], ähnlich [217]).

Werkstoff	Aufwand für Energie (in J/cm ³) für den Rohstoff das fertige Formteil	
Weich-PE	45	50
PP	40	70
Hart-PE	45	80
PS	50	110
PVC	45	130
ABS	50	140
Acrylate	70	180
PC	80	200
PBTP	100	205
PA 66	100	230
PA 6	70	240
PPO mod.	100	260
POM	110	330
Stahl	-	340
Zink-Druckguß*	-	370
Alu-Druckguß*	-	490
Messing	-	490
Magnesium*	-	530
Kupfer*	-	550

* berücksichtigte Quoten an Rückführmaterial:

Magnesium 20 % Zink 5 %
 Aluminium 46 % Kupfer 30 %

Bild 157: Energieinhalt der Werkstoffe [158].

Ohne Mit
sekundäre Gewichtseinsparungen

(A) Btu/lb x 10³

HSS ersetzt konventionellen Stahl	71,2	127,5
Aluminiumblech ersetzt Stahl	-20,5	35,7
Kunststoffe ersetzen Stahl	25,1	81,4
Aluminiumguß ersetzt Eisen	22,1	78,3

(B) Äquivalente Kraftstoffeinsparung in gal/lb

HSS ersetzt konventionellen Stahl	0,57	1,02
Aluminiumblech ersetzt Stahl	-0,16	0,29
Kunststoffe ersetzen Stahl	0,20	0,65
Aluminiumguß ersetzt Eisen	0,18	0,63

(C) Materialsubstitutionskosten in \$/lb

HSS ersetzt konventionellen Stahl	-0,25	-0,25
Aluminiumblech ersetzt Stahl	-1,75	-1,75
Kunststoffe ersetzen Stahl	-0,50	-0,50
Aluminiumguß ersetzt Eisen	-0,80	-0,80

(D) Kosteneinsparung in \$/lb

HSS ersetzt konventionellen Stahl	0,25	0,95
Aluminiumblech ersetzt Stahl	-1,25	-0,55
Kunststoffe ersetzen Stahl	0,00	0,70
Aluminiumguß ersetzt Eisen	0,30	0,40

Bild 158: Energiebilanz-Szenarios mit und ohne sekundäre Gewichtseinsparungen (Übersetzt aus [257]).

Bestand in Millionen

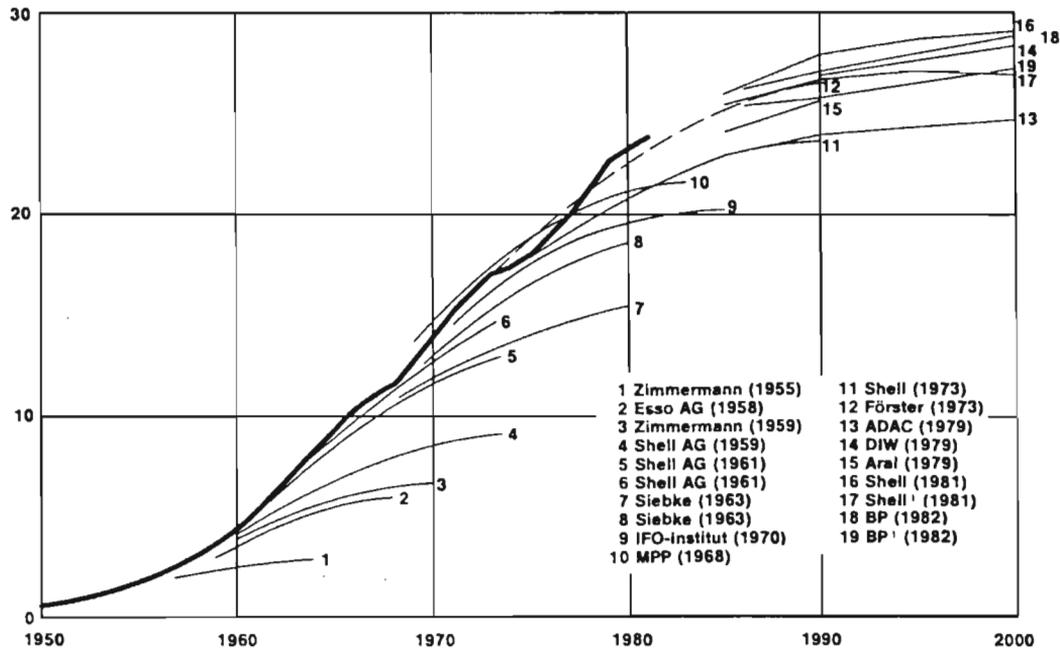
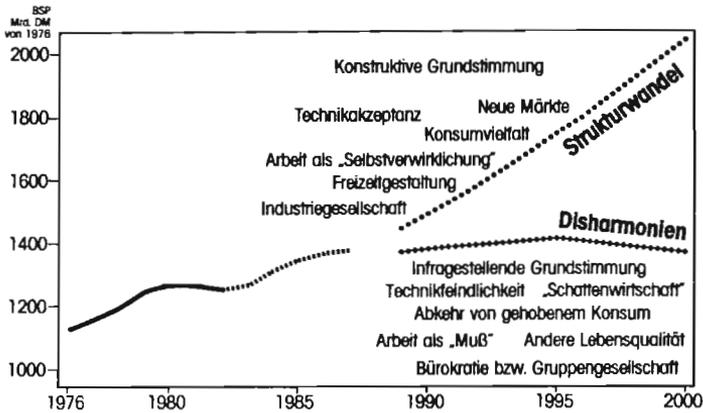


Bild 159: Gegenüberstellung verschiedener Prognosen über den Pkw-Bestand in der Bundesrepublik Deutschland mit der tatsächlichen Entwicklung [365].



Langfristprognose beim Szenario „Strukturwandel“

(in 1000)	PKW-Bestand zum 31. 12.	Erwachsene Bevölkerung	PKW je 1000 Erwachsene	Gesamte Wohn- bevölkerung	PKW je 1000 Einwohner
1980	23.249	47.443	490	61.658	377
1985	26.257	48.948	536	60.917	431
1990	29.171	49.090	594	60.064	486
1995	29.808	48.023	621	59.003	505
2000	29.890	46.877	638	57.462	520

Langfristprognose beim Szenario „Disharmonien“

(in 1000)	PKW-Bestand zum 31. 12.	Erwachsene Bevölkerung	PKW je 1000 Erwachsene	Gesamte Wohn- bevölkerung	PKW je 1000 Einwohner
1980	23.249	47.443	490	61.658	377
1985	25.894	48.948	529	60.917	425
1990	27.892	49.090	568	60.064	464
1995	28.419	48.023	592	59.003	482
1998	28.473	47.314	602	58.140	490
2000	28.461	46.877	607	57.462	495

Bild 160: Entwicklung des Pkw-Bestandes bei unterschiedlichen Szenarien [303].

