

Europäische Akademie

zur Erforschung von Folgen
wissenschaftlich-technischer Entwicklungen
Bad Neuenahr-Ahrweiler GmbH

Direktor:

Professor Dr. Carl Friedrich Gethmann

**TECHNIKFOLGENBEURTEILUNG
DER ERFORSCHUNG
UND ENTWICKLUNG NEUER MATERIALIEN.
PERSPEKTIVEN IN DER VERKEHRSTECHNIK**

ENDBERICHT ZUM VORPROJEKT

von der
Arbeitsgruppe Neue Materialien
Januar 1997

Europäische Akademie

zur Erforschung von Folgen
wissenschaftlich-technischer Entwicklungen
Bad Neuenahr-Ahrweiler GmbH

Direktor:

Professor Dr. Carl Friedrich Gethmann

**TECHNIKFOLGENBEURTEILUNG
DER ERFORSCHUNG
UND ENTWICKLUNG NEUER MATERIALIEN.
PERSPEKTIVEN IN DER VERKEHRSTECHNIK**

ENDBERICHT ZUM VORPROJEKT

DLR Vertragsnummer 8 310 4045

von der

Arbeitsgruppe Neue Materialien

Januar 1997

Die Schriften der „Grauen Reihe“ umfassen aktuelle Materialien und Dokumentationen, die von den Wissenschaftlern der **Europäischen Akademie** zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen Bad Neuenahr-Ahrweiler GmbH laufend erarbeitet werden. Die Publikationen der „Grauen Reihe“ werden als Manuskripte gedruckt und erscheinen im Selbstverlag der **Europäischen Akademie**. Sie können über die **Europäische Akademie** auf schriftliche Anfrage hin bezogen werden.

Herausgeber:

Europäische Akademie
zur Erforschung von Folgen
wissenschaftlich-technischer Entwicklungen
Bad Neuenahr-Ahrweiler GmbH
Postfach 14 60, D-53459 Bad Neuenahr-Ahrweiler
Telefon: ++49 - (0)2641 - 7543 - 00, Telefax -20

Direktor:

Professor Dr. Carl Friedrich Gethmann (V.i.S.d.P.)

Redaktion:

Dr. Stephan Lingner

Druck:

Druckerei Martin Warlich, Bad Neuenahr-Ahrweiler

Europäische Akademie

zur Erforschung von Folgen
wissenschaftlich-technischer Entwicklungen
Bad Neuenahr-Ahrweiler GmbH

Direktor:

Professor Dr. Carl Friedrich Gethmann

Arbeitsgruppe Neue Materialien

Professor Dr.-Ing. H. Harig,

Universität Bremen und Faserinstitut Bremen e.V.
(Vorsitzender)

Dr. rer. nat. A. Grunwald,

Europäische Akademie Bad Neuenahr-Ahrweiler GmbH

Professor Dr. rer. nat. W.A. Kaysser,

Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V.
(DLR), Institut für Werkstoff-Forschung, Köln

Professor Dr.-Ing. R. Renz,

Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für recyclinggerechte
Konstruktion/Entfertigung

Professor Dr. rer. nat. G. Schmid,

Universität Essen, Institut für Anorganische Chemie

Projektleiter:

Dipl.-Ing. C.J. Langenbach,

Europäische Akademie Bad Neuenahr-Ahrweiler GmbH

Vorbemerkung

Der hiermit vorgelegte Bericht stellt das Ergebnis eines Forschungsprojekts dar, mit dem der Bundesminister für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen PLI 1447A die Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) beauftragt hat und für das der Unterzeichnete als Unterauftragnehmer (Vertragsnummer 8 310 4045) die Verantwortung übernommen hat. Das Projekt wurde in der Zeit vom 01.12.1995 bis zum 31.12.1996 bearbeitet. Das Projekt war als ein Anlaufprojekt für die seinerzeit im Aufbau befindliche und am 13.03.1996 gegründete Europäische Akademie zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen Bad Neuenahr-Ahrweiler GmbH geplant; es wurde ab dem 01.05.1996 im Rahmen der Europäischen Akademie durchgeführt. Es liegt auf der Hand, daß eine Bearbeitungszeit von 13 Monaten nicht zu umfassenden handfesten Forschungsergebnissen führen kann. Von vornherein war das Projekt als ein Vorprojekt zu einem Hauptprojekt konzipiert, für das es vor allem eine Sichtung der Probleme und eine konkrete Ausformulierung der Fragestellungen erbringen sollte.

Entsprechend der Arbeitskonzeption der Europäischen Akademie Bad Neuenahr-Ahrweiler wurde das Projekt fachlich von einer interdisziplinären Arbeitsgruppe unter Leitung von Professor Dr.-Ing. H. Harig (Faserinstitut Bremen e.V. und Universität Bremen) bearbeitet. Seitens der Europäischen Akademie hat Herr Dipl.-Ing. C.J. Langenbach die Projektleitung übernommen. Ich danke der Arbeitsgruppe für die engagierte Teilnahme an der interdisziplinären Arbeit, die bekanntlich leicht gefordert aber nur mit großem Aufwand an Zeit und Geduld realisiert werden kann.

Die rasche Umsetzung der Ergebnisse von Forschungs- und Entwicklungsleistungen in den Materialwissenschaften bietet die Chance, zukunftssträchtige Technikfelder zu besetzen, und neue oder verbesserte Produkte zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit ganzer Industriezweige zu entwickeln. Neue Materialien sind auch Bedin-

gung für die Verbesserung der Umweltverträglichkeit vieler technischer Produkte. Die Materialwissenschaft ist daher eine Schlüsseldisziplin für eine umweltfreundliche Produktion, die Arbeitsplätze erhält und schafft. Ich hoffe, daß der vorliegende Endbericht des Vorprojekts einen Grundstein für eine konstruktive Diskussion über die Perspektiven der Materialwissenschaft legen und zugleich Ansatzpunkte für weitere interdisziplinäre Untersuchungen zu dem Problembereich bieten kann.

Bad Neuenahr-Ahrweiler, Januar 1997

Professor Dr. phil. Carl Friedrich Gethmann

Vorwort der Arbeitsgruppe

In der Gründungsphase der Europäischen Akademie wurde das Vorprojekt „*Technikfolgenbeurteilung der Erforschung und Entwicklung neuer Materialien*“ begonnen. Es widmete sich der Bestandsaufnahme gegenwärtiger Materialinnovationen und ihrer Bedeutung für die Gesellschaft. Innovationen sind für den Bestand und das zukünftige Wachstum von Volkswirtschaften unabdingbar. Ungeachtet der dominierenden unternehmerischen Handlungsfaktoren der Gegenwart bleibt festzuhalten, daß unter dem Primat der Leistungssteigerung bei Produktsystemen, damit auch der Wettbewerbsfähigkeit der Industrie, der „Schlüsselfaktor Material“ systembestimmend bleibt.

Die von der Europäischen Akademie einberufene Arbeitsgruppe „*Neue Materialien*“ diskutierte Auswirkungen von Entwicklungen auf dem Gebiet der Materialwissenschaft unter Einbeziehung dazugehöriger Fertigungsverfahren. Das Ziel der Arbeit war es, die Fragestellungen exemplarisch auf die Verkehrstechnik zu beziehen und absehbare Entwicklungsfolgen aufzuzeigen. Mit der Aufgabe waren die Professoren Dr. Helmuth Harig (Bremen) als Vorsitzender, Dr. Wolfgang A. Kaysser (Köln), Dr. Rainer Renz (Kaiserslautern), Dr. Günter Schmid (Essen) sowie Herr Dr. Armin Grunwald (Bad Neuenahr-Ahrweiler) betraut.

Im Juni 1996 fand das Kick-Off Meeting der Arbeitsgruppe statt, auf dem durch Vorträge und Diskussionen eine wissenschaftliche Bestandsaufnahme und eine Eingrenzung des Themas durchgeführt wurde. Referenten dieses Treffens waren Dr. H.-G. Nüsser (DLR Köln), Professor Dr. W. A. Kaysser (DLR Köln), Dipl.-Ing. H.-G. Haldenwanger (Audi AG), Dr. R. Schmidberger (Daimler-Benz AG) sowie Professor Dr.-Ing. E. Hornbogen (Universität Bochum).

Zur Erstellung des vorliegenden Endberichtes des Vorprojektes haben die Arbeitsgruppenmitglieder sogenannte „Saattexte“ geschrieben, die im Verlauf von 9 Arbeitsgruppensitzungen in einem iterativen Verfahren diskutiert und anschließend neu entworfen wurden. Auf diese

Weise entstand schließlich der gemeinsam verfaßte und beschlossene Text. Hierbei wurde in der wissenschaftlichen Arbeitsgruppe folgende Aufgabenverteilung für die Erarbeitung der Saattexte einschließlich der Endfassung des Berichts vereinbart:

Gesamtkoordination, Einleitung, Materialien (Zuarbeit),
Schienengebundener Verkehr, Gesamtbilanz / Ausblick: Harig

Methodische Basis, Bedeutung neuer Materialien in
Technik und Gesellschaft: Grunwald

Stand und Tendenzen,
Langfristige Entwicklungstendenzen: Schmid

Materialien (Zuarbeit), Straßenverkehr, Recycling: Renz

Materialien (Zuarbeit), Luftverkehr: Kaysser

Die Zusammenstellungen in der Vorstudie konnten in der knapp einjährigen Bearbeitungszeit nur bestimmte Schlüsselgebiete umfassen. Die Ergebnisse des vorliegenden Berichtes werden in ein umfassenderes Memorandum einfließen, das im Rahmen des sich anschließenden, zweijährigen Hauptprojektes zu erstellen ist.

Besonderen Dank schulden wir den Herren Dr. A. Grün, Dipl.-Ing. J. Müssig, Dipl.-Phys. K.-M. Nigge M.E.S. und Dipl.-Chem. T. Sawitowski für ihre sorgfältigen Recherchen und wissenschaftlichen Beiträge zu dem Manuskript, die sie während ihrer Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiter an den verschiedenen Instituten und Forschungsstätten der Arbeitsgruppenmitglieder durchführten. Weiterhin danken wir Herrn Dipl.-Ing. C.J. Langenbach von der Europäischen Akademie für seine wissenschaftlichen Beiträge, die gewissenhafte redaktionelle Arbeit und die Tätigkeit als Projektleiter der Arbeitsgruppe.

Nicht zuletzt danken wir der Europäischen Akademie zur Erforschung von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen Bad Neuenahr-Ahrweiler für das Ermöglichen der in dieser Studie dokumentierten interdisziplinären Arbeit, die vielfältige technische Unterstützung und ihre Gastfreundschaft in ihren Räumen.

Bad Neuenahr-Ahrweiler, Januar 1997

Die Mitglieder der Arbeitsgruppe „Neue Materialien“

INHALTSVERZEICHNIS

Vorbemerkung	7
Vorwort der Arbeitsgruppe	9
Zusammenfassung/Abstract	21
1 Einleitung	23
2 Methodische Basis	27
2.1 Begriffe und Unterscheidungen	27
2.1.1 Begründen und Rechtfertigen	27
2.1.2 Prognose	30
2.1.3 Methodischer Ansatz	34
2.2 Prognosen	42
2.2.1 Modelle als Basis für Prognosen in der Materialentwicklung	43
2.2.2 Materialeinsatz in Verkehrssystemen	48
2.3 Multikriterielle Bewertung von Materialien	51
3 Bedeutung neuer Materialien in Technik und Gesellschaft	60
3.1 Zur Wahrnehmung der Bedeutung neuer Materialien	61
3.2 Ökonomische Bedeutung	62
3.2.1 Volkswirtschaftliche Bedeutung	63
3.2.2 Wirtschaftspolitische Bedeutung	63
3.3 Bedeutung für Umweltfragen	64
3.4 Bedeutung in der Lebenswelt	67
3.5 Leitbilder zukünftiger Technikentwicklungen	69

4	Materialien	73
4.1	Klassifizierung	73
4.2	Gegenwärtige Entwicklungen	78
4.2.1	Metallische Werkstoffe	78
4.2.2	Nichtmetallische Anorganische Werkstoffe	81
4.2.2.1	Halbleiter	81
	Halbleiter in der Mikroelektronik – Halbleiter in der Optoelektronik – Halbleiter in der Mikromechanik	
4.2.2.2	Keramische Werkstoffe	84
4.2.2.3	Gläser	86
	A) Sol-Gel-Verfahren zur Herstellung oxidi- scher Gläser – B) Herstellung und Eigen- schaften nicht-oxidischer Gläser	
4.2.3	Organische Werkstoffe	90
4.2.3.1	Naturbelassene Stoffe und abgewandelte Naturstoffe	90
	Holz – Naturkautschuk – Stärke –Pflanzliche Naturfasern	
4.2.3.2	Synthetische Werkstoffe	100
	Kontrollierte Polymerisation – Mehrphasige Werkstoffe – Weitere Entwicklungs- gesichtspunkte	
4.2.4	Verbundwerkstoffe / Stoffverbunde	101
4.2.4.1	Metallmatrix-Verbundwerkstoffe	102
4.2.4.2	Keramik/Glasmatrix-Verbundwerkstoffe	105
4.2.4.3	Schichtverbundwerkstoffe	107
4.3	Langfristige Entwicklungstendenzen	108
4.3.1	Einleitung	108
4.3.2	Konstruktionswerkstoffe	110
4.3.2.1	Keramiken	110
4.3.2.2	Metalle und Legierungen	110
4.3.2.3	Nanokomposite	111
4.3.3	Funktionswerkstoffe	112
4.3.3.1	Beschichtungs- und Strukturierungsverfahren	112
4.3.3.2	Optische Funktionswerkstoffe	114

4.3.3.3	Grenzflächenwirksame Funktionswerkstoffe Adhäsionssteigerung – Adhäsionsverringering	115
4.3.3.4	Sensoren, Detektoren und Katalysatoren	116
4.3.3.5	Sonstige	116
5	Gegenwärtiger Materialeinsatz in Verkehrssystemen	118
5.1	Straßenverkehr / Automobil	118
5.1.1	Einleitung	118
5.1.2	Allgemeine Entwicklungsziele und deren Konkretisierung	120
5.1.3	Baugruppenspezifischer Werkstoffeinsatz	122
5.1.3.1	Motor und Antrieb Pkw-Dieselmotoren – Pkw-Otto-Motoren – Kurbelgehäuse	122
5.1.3.2	Werkstoffzusammensetzung von Personenkraftwagen Fe-Werkstoffe – Al-Legierungen – Magnesium – Kunststoffe: A) Fahrzeuginnenraum, B) Motorraum, C) Karosserie, D) Frontend	125
5.1.4	Gewichtsentwicklung	130
5.2	Schienengebundener Verkehr	134
5.2.1	Einleitung	134
5.2.2	Personentransport	135
5.2.2.1	Fernverkehr Massereduzierung durch Leichtbau: A) Entwicklungsstand im Bereich der Fahr- zeugkästen, B) Entwicklungsstand im Bereich der Laufwerke, C) Entwicklungsstand im Bereich des Fahrzeugwageninnenbaus	135
5.2.2.2	Nahverkehr S-Bahnsystem in Stahlleichtbauweise – U-Bahnsystem in Aluminiumleichtbauweise	143
5.2.3	Gütertransport Kombinierter Verkehr Schiene / Straße: A) System LaSa, B) PKW-Verladesystem	149

5.3	Luftverkehr	154
5.3.1	Übersicht	154
5.3.1.1	Motivator Kosten-Leistungs-Verhältnis	154
5.3.1.2	Motivator Sicherheit	156
5.3.1.3	Motivator Umweltverträglichkeit	156
5.3.1.4	Evolutionäre und revolutionäre Entwicklungen	157
5.3.2	Technologietransferpotential	157
5.3.3	Derzeitiger Werkstoffeinsatz	158
5.3.3.1	Zellen	158
5.3.3.2	Antriebe	161
5.4	Recycling am Beispiel von Personenkraftwagen	164
5.4.1	Einleitung	164
5.4.2	Automobilrecycling	164
5.4.2.1	Shreddertechnologie	164
5.4.2.2	Totalzerlegung	167
5.4.2.3	Produktrecycling	167
5.4.2.4	Langzeitauto	167
5.4.2.5	Umwelt- und recyclinggerechte Produktgestaltung des Automobils	168
5.4.2.6	Recyclingverhalten von Werkstoff- gruppen und ausgewählten Bauteilen Recycling von Polymerwerkstoffen – Recycling von Faserverbundwerkstoffen – Reifenrecycling – Recycling von Elasto- meren – Dämmstoffe – Recycling von Glas – Recycling von Elektrik/ Elektronik – Recycling von Metallen	170
5.4.2.7	Neue Fahrzeugkonzepte	175
5.4.2.8	Allgemeine Bemerkung	176
6	Gesamtbilanz / Ausblick	177
	Zitierte Literatur	180

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2-1: Schematischer Verlauf einer wissenschaftlich-technischen Entwicklung	44
Abb. 2-2: Entwicklung des Anteils von Kunststoffanwendungen im Automobilbau	45
Abb. 2-3: Sigmoiden oder S-Kurve in allgemeiner Darstellung	47
Abb. 4-1: Einteilung der technischen Materialien	74
Abb. 4-2: Die durch chemische / physikalische Verfahren abgewandelte Substanz Holz	91
Abb. 4-3: Industrielle Verwendung von Stärke	94
Abb. 4-4: Übersicht über die Naturfasern	96
Abb. 4-5: Festigkeiten ausgewählter pflanzlicher Naturfasern	97
Abb. 4-6: Zugfestigkeit bezogen auf die Bauteildichte	99
Abb. 4-7: Diagramm zur Bedeutung von nanostrukturierten Konstruktionswerkstoffen	111
Abb. 4-8: Diagramm zur Bedeutung der Beschichtungs- und Strukturierungsverfahren	114
Abb. 4-9: Diagramm zur Bedeutung funktionaler Werkstoffe	117
Abb. 5-1: Automobilentwicklung - Beispiele für quantitative und qualitative Zunahme der Anforderungen	121
Abb. 5-2: Beispiele für die sicherheits- und komfortbedingte Erhöhung der Pkw-Fahrzeugmasse während der letzten 20 Jahre	131
Abb. 5-3: Neues Technikgesamtkonzept unter Berücksichtigung von Gewichtsziel und Kosten	131

Abb. 5-4: Einteilung des Schienenverkehrs	134
Abb. 5-5: Verteilung der Masse auf die Hauptkomponenten verschiedener Reisezugwagen des Fernverkehrs unterschiedlicher Generationen	136
Abb. 5-6: Vergleich der Massen von Rohbauten in Stahl- und Aluminiumbauweise für Reisezugwagen des Fernverkehrs	138
Abb. 5-7: Verteilung der Masse des Drehgestells MD 530 für den ICE-Mittelwagen	141
Abb. 5-8: Verteilung des Güterverkehrs in Deutschland 1995	152
Abb. 5-9: Werkstoffanteile von PKW	168

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 4-1: Thermische Eigenschaften einiger Chalkogenidgläser	89
Tab. 5-1: Anforderungen an Werkstoffe	122
Tab. 5-2: Einfluß von Sicherheit und Komfort auf das Fahrzeuggewicht	132
Tab. 5-3: Gewichtsreduzierung im Motoren- und Antriebsbereich	133
Tab. 5-4: Vergleich der alten und neuen S-Bahnzüge ET 275 und ET 480 der Berliner Verkehrsbetriebe	144
Tab. 5-5: Bewertungstabelle des Herstellers zum Vergleich Stahl Aluminium am Beispiel der alten und neuen S-Bahnzüge ET 275 und ET 480 der Berliner Verkehrsbetriebe	146
Tab. 5-6: Rückgewinnungsquoten der Metalle	165
Tab. 5-7: Verunreinigungen der metallischen Fraktionen nach dem Shredder	166

Zusammenfassung

In vielen Bereichen der Technik hat die Materialwissenschaft aufgrund ihrer herausragenden Entwicklungen große Bedeutung. Das gilt auch für Verkehrssysteme. Der vorliegende Bericht gibt nicht nur einen Einblick in den gegenwärtigen Stand der Materialwissenschaft, sondern er befaßt sich auch mit der Frage, wie mögliche Materialentwicklungen auf ihre erwartbare Eignung zur Lösung gegenwärtiger gesellschaftlicher Probleme untersucht werden können.

Bei der Fragestellung des gegenwärtigen Materialeinsatzes in Verkehrssystemen wird auf die materialspezifischen Probleme im Straßenverkehr, im schienengebundenen Verkehr, im Luftverkehr und beim Recycling eingegangen. Die von den Mitgliedern der Arbeitsgruppe begonnenen Zusammenstellungen konnten in der knapp einjährigen Vorprojektphase nur bestimmte Schlüsselgebiete umfassen. Eingehendere Untersuchungen zu den angesprochenen Themen und zu weiteren vorgesehenen Fragestellungen sollen im Rahmen des sich anschließenden Hauptprojektes durchgeführt werden.

Abstract

In many areas of technology, materials science plays an important role due its outstanding developments. This applies to transport systems as well. In addition to an insight into the state-of-the-art of materials science, this report deals with the question of how the contribution of possible new developments of materials to the solution of societal problems can be examined.

With regards to the current use of materials in transport systems, issues of road, rail and air traffic as well as recycling are considered. The studies conducted by the members of the working group during the initial phase of the project of about one year were focused on specific key areas. More detailed studies regarding these as well as further issues are to be carried out in the subsequent main phase of the project.

1 Einleitung

Neue Produkte werden ganz wesentlich durch Material-Variationen oder gar Material-Neuentwicklungen bestimmt. Die neuen Materialien sind nicht nur durch den Rohstoff an sich gekennzeichnet, sondern im besonderen durch deren Struktur nach der Fertigung. Für die Materialwissenschaft eröffnen sich hier erhebliche Innovationsstufen. In die Entwicklung neuer Materialien sind verschiedene Disziplinen der Natur- und Ingenieurwissenschaften eingebunden. Sie leiten ihre Forschungsziele teilweise aus einem Bedarf anderer Disziplinen ab, z.B. des Maschinenbaus, der Energietechnik, der Verkehrstechnik, der Mikroelektronik oder der Luft- und Raumfahrt.

Die in den verschiedenen Disziplinen vorgeschlagenen Leitthemen stellen immer größere, neue Forderungen an die zukünftigen Strukturen, Bauweisen und Werkstoffe. Durch ständige Neu- und Weiterentwicklung der Materialien schafft die Materialwissenschaft Lösungen hierfür, und Hand in Hand erfolgt damit eine immer raschere Entwicklung neuer und Weiterentwicklung bekannter Fertigungsverfahren.

Bei der Wahl der Materialien sind zunächst die Anforderungen an das betreffende System oft im Spannungsfeld zwischen Umweltverträglichkeit, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit hinsichtlich Funktion, Beanspruchung und Lebensdauer zu berücksichtigen, anschließend die Forderungen der Herstellung, Verarbeitung, Fertigung und Entsorgung und oft auch noch die Frage der Gewinnung. Für gewöhnlich kann man sich hierbei auf die bereits vorliegenden Erfahrungen stützen und übliche Materialien mit bekannten Qualitäten verwenden. Erst wenn der Stand der Technik nicht ausreicht, also wenn neue Erkenntnisse, neue Anforderungen, neue Engpässe, neue Preisverhältnisse auftreten, oder wenn mehrere Materialien in Konkurrenz treten, wird die Erforschung und Entwicklung neuer Materialien und deren Folgen zu einer Herausforderung.

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) hat im Jahre 1994 einen Bericht „Neue Werkstoffe“ dem Ausschuß für Bildung, Wissenschaft, Forschung, Technologie und Technikfolgenabschätzung vorgelegt (Socher et.al. 1994). Die Studie hatte als eine Aufgabe, einen generellen Überblick über die wirtschaftlichen Entwicklungspotentiale sowie die sozial- und umweltpolitische Relevanz der Materialwissenschaften in Deutschland und Europa zu geben. Weiterhin wurden anhand von branchen- und produktbezogenen Beispielen die Chancen und Risiken neuer Entwicklungen auf dem Materialsektor für die deutsche Industrie verdeutlicht und der Versuch unternommen, Anregungen für die Verbesserungen der staatlich geförderten Materialforschung abzuleiten. Der Bericht des TAB, der sich auf eine Reihe von Gutachten stützt, stellt eine gute Bestandsaufnahme der deutschen (weniger der europäischen) Situation dar. Er unterstreicht die Bedeutung der Werkstoffentwicklung für die künftige Entwicklung des Wirtschaftsstandortes Deutschland.

In dem TAB-Bericht und den zugrundeliegende Quellen sowie in bisherigen Arbeiten zu neuen Materialien fällt auf, daß durchweg eine Orientierung an Stoffen oder Stoffgruppen erfolgte, die sich oft bis in das Inhaltsverzeichnis hinein wiederfindet. So naheliegend dies für eine Bestandsaufnahme sein mag, weil die entsprechende Klassifikation geeignet ist, die betroffenen Institutionen (Forschungseinrichtungen, Industriezweige) zu klassifizieren, ist dieser Ansatz nicht ohne Probleme. Denn diese als Ausgangsbasis verwendete Einteilung führt dazu, daß die Hauptfragestellung lautet, was mit den neuen Materialien machbar ist und inwieweit dies wünschenswert ist. Wenn die Betrachtung ausschließlich auf diese Fragerichtung eingegrenzt wird, kann jedoch leicht die normativ orientierte Frage nach den Funktionen, die die neuen Materialien erfüllen *sollen*, um bestimmte gesellschaftlich relevante Zwecke zu erreichen, aus dem Blick geraten (an die sich natürlich die Frage nach der Machbarkeit und dem Entwicklungsaufwand anschließt).

In rationaler Politikberatung sind jedoch sowohl deskriptiv wie auch normativ orientierte Sichtweisen in komplementärer Weise erforder-

lich (s. Kapitel 2.1). Die normativ orientierte Sicht ist unabdingbar, um der Politik Gestaltungsräume zu eröffnen und die Gefahr zu bannen, daß die Politik sich in der Fortschreibung des Bestehenden und der Realisierung des Machbaren erschöpft. Dies ist besonders wichtig für die neuen Materialien, weil diese „Wurzeln“ der Technik-Entwicklung in vielen anderen Bereichen bilden und technikpolitische Entscheidungen in diesem Bereich tiefgreifende Auswirkungen auf andere Bereiche haben können. Die Arbeitsgruppe sieht in dieser Frage Defizite in den bisherigen Arbeiten zu neuen Materialien.

In einer Bestandsaufnahme werden für den Untersuchungsgegenstand „Neue Materialien“ zunächst der Stand innovativer Anwendungsmöglichkeiten und deren absehbare Tendenzen aufgezeigt. Als methodische Basis wird dazu eine komplementäre Nutzung einer explorativen und zielorientierten Herangehensweise vorgeschlagen. Die Exploration des vernünftigerweise erwartbaren Möglichen in der Materialentwicklung bildet den ersten Schritt. Im zweiten Schritt werden aus dem Bereich des Möglichen bestimmte Aspekte der Materialentwicklung zielorientiert auf ihre erwartbare Eignung zur Lösung gegenwärtiger Probleme in der Verkehrstechnik untersucht.

Die Verkehrstechnik bildet einen guten Anschauungsbereich, um exemplarisch das Vorgehen bei der Technikfolgenbeurteilung der Erforschung und Entwicklung neuer Materialien anzuwenden. Denn der Verkehr mit seinen positiven und negativen Aspekten ist nach wie vor einer der zentralen Diskussionsbereiche der europäischen Industriegesellschaft (s. Task Force „Flugzeug der neuen Generation“, „Auto von morgen“ oder „Zug und Bahnsysteme der Zukunft“; in: Europäische Union 1996). Mit Mobilitätsmanagement wird versucht, Konzepte zu erarbeiten, um das nach wie vor ungebrochene Verkehrswachstum zu lenken. Hinter dem Begriff des Mobilitätsmanagements stehen nicht nur regulative Mechanismen, sondern auch innovative Techniken, die erforderlich sind, um die Systeme des Straßen-, Schienen- und Luftverkehrs zu verbessern. Der Materialwissenschaft könnte dabei mit der Entwicklung neuer Materialien und Verfahren ein zentraler Forschungsschwerpunkt zukommen.

Der methodische Umgang mit Zukunftsaspekten ist ein wesentlicher Bestandteil der Untersuchung, da die vorliegenden Fragestellungen sich nicht auf den Horizont der unmittelbar bevorstehenden Zukunft beschränken, sondern den Rahmen mittelfristiger, sich auf etwa 10 bis 20 Jahre erstreckender Entwicklungen antizipierend reflektieren wollen. Zur Bewertung möglicher Entwicklungsfolgen wird eine Bewertung von Materialien anhand eines qualitativen Kriterienkatalogs etabliert, der erlauben soll, ein „optimales“ neues Material hinsichtlich verschiedener Ziele zu klassifizieren.

Die Fähigkeiten und Entwicklungstendenzen des herausragenden Komplexes *Neue Materialien* waren immer schon ein wesentliches Merkmal für die technologische Leistungsfähigkeit einer Volkswirtschaft. Die umfassende Themenanalyse zeigt – ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben - die überschaubaren und potentiellen Entwicklungstendenzen der zukünftigen Materialwissenschaft auf. Neue Materialien werden die Grundlagen von Schlüsseltechnologien der näheren und fernerer Zukunft sein. Die Materialforschung ist deshalb ein vorrangiges Feld für Investitionen und eine Grundlage technischer Entwicklungen für die Zukunft. Die bisherigen Ergebnisse, die durch eine enge Zusammenarbeit zwischen Industrie, außeruniversitären und universitären materialwissenschaftlichen Forschungseinrichtungen erbracht worden sind, haben den erstklassigen nationalen und internationalen Ruf der Materialforschung in Deutschland begründet.

2 Methodische Basis

Erkennen und Beurteilen von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen sind vor erhebliche methodische Probleme gestellt, die zu vielerlei Kontroversen Anlaß gegeben haben (z.B. DLR 1993, Kap. 2; Grunwald/Sax 1994, Grunwald 1996b). Diese Probleme sind einerseits kognitiver Art, wenn es um die Frage der begründeten Einschätzung zukünftiger Entwicklungen geht, andererseits von ethischem Gewicht, wenn die Beurteilung von Wünschbarkeit oder Akzeptabilität von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen im Mittelpunkt steht. In dieser Situation ist es erforderlich, den zugrundegelegten methodischen Ansatz offenzulegen, um die Resultate nachvollziehbar und damit auch der Kritik zugänglich zu machen.

2.1 Begriffe und Unterscheidungen

Besondere Probleme im rationalen Umgang mit Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen bereitet die trans-subjektive Einschätzung und Beurteilung dieser Folgen. Diesbezügliche Empfehlungen an Gesellschaft und Politik müssen auf *begründetem* Wissen beruhen und in ihren normativen Aspekten *gerechtfertigt* werden. Begründungs- und Rechtfertigungsrationaltät bilden daher zentrale Elemente der methodischen Basis (2.1.1). Besondere Bedeutung haben Prognosebegriff und die Möglichkeiten von Prognosebegründungen (2.1.2). Im Umgang mit dem Zukunftsaspekt in der Technikfolgenbeurteilung stellt sich sodann vor allem die Frage nach eher finalen (zielorientierten) oder nach eher explorativen (prognostischen) Verfahren (2.1.3).

2.1.1 Begründen und Rechtfertigen

Begründete Überlegungen über die Setzung von Zwecken und Einführung von Mitteln in zukünftiger Technik- oder Forschungspolitik setzen ein Beratungsverfahren voraus, dessen Zweck darin besteht,

vorgetragene Begründungen kritisch zu prüfen und Dissense argumentativ zu beseitigen. Unter Beratung versteht man einen Diskurs, dessen Zweck es ist, eine *vernünftige Gemeinsamkeit* zu erreichen (Lorenzen 1987, S. 161 ff.). Beratungen in der Technikfolgenbeurteilung gliedern sich in *technische* und *praktische*. In technischen Beratung geht es um *begründete* Empfehlungen über die Wahl von Mitteln zu einem bereits festgelegten Zweck. In praktischen Beratungen ist die *gerechtfertigte* Setzung eines Zwecks bzw. Herbeiführung eines Zustands Thema. Aufgrund vielfältiger Beziehungen zwischen Zwecken und Mitteln gehört die technische Beratung über die Mittel im Grunde zum Bestand der praktischen Beratung im weitesten Sinne.

Eine Beratung über den rationalen Umgang mit Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen ist mit verschiedenen Schwierigkeiten verbunden: Zum ersten genügt nicht jede faktische Beratung den zugrundegelegten Rationalitätskriterien (dazu s.u.). Zum zweiten können nicht alle Betroffenen Beratende sein; es ist nämlich in vielen Fällen organisatorisch unmöglich, sie zur Beratung hinzuzuziehen. Zum dritten sind oftmals nicht alle Beratenden Betroffene. Diese Schwierigkeiten werden dadurch überwunden, daß das Prinzip der Verallgemeinerbarkeit – das sogenannte *Vernunftprinzip* – als Basis anerkannt wird; durch dieses wird gefordert, keine bloß subjektiven (im Sinne von willkürlichen oder beliebigen) Meinungen als Argumente zu verwenden. Das Vernunftprinzip (Lorenzen/Schwemmer 1975) erfordert, Partikularitäten zu negieren und Inter- (Trans)subjektivität anzuerkennen. Wenn dies anerkannt wird, sind die Ergebnisse der Beratung offenkundig auch von nicht an der Beratung Beteiligten anzuerkennen. Auf diese methodisch gesicherte Weise gewinnen die Ergebnisse der Beratung argumentative Kraft über die Gruppe der Beratenden hinaus (vgl. Lorenzen/Schwemmer 1975, Kap. 2).

Empfehlungen und Stellungnahmen im Umkreis gesellschaftsrelevanter Fragestellungen der Erforschung und Entwicklung neuer Materialien (z.B. forschungspolitischer Art) werden als Resultat eines inter-

disziplinären Entscheidungsprozesses innerhalb der Beratungen der Arbeitsgruppe unter (idealer) Anerkennung des Vernunftprinzips und der Regeln wissenschaftlichen Argumentierens verstanden. Eine Entscheidungssituation liegt immer dann vor, wenn ein Auswahlproblem besteht, d.h. wenn die entsprechende Situation alternativenfähig ist. Eine Entscheidung stellt ein Urteil dar, in dem eine Option aus einer Optionenmenge relativ zu einem Entscheidungskriterium ausgezeichnet wird. Eine *rationale* Entscheidung besteht in der Auswahl einer Option aufgrund von *Gründen*, welche den durch das Vernunftprinzip formulierten Anforderungen genügen. Dies ist ersichtlich nur dann sinnvoll, wenn die Auswahl unter einer *Richtigkeitsdifferenz* steht (Kersting 1992, S. 24), d.h. wenn die Optionen in Bezug auf ihre Angemessenheit relativ zu dem in Frage stehenden Problem unterschieden werden können. Darüber entscheidet die Kombination von Entscheidungskriterien und den Eigenschaften der Optionen. Folge der Entscheidung ist, daß die nicht ausgewählten Optionen verworfen werden, d.h. daß diese nicht, zumindest nicht in der konkreten Situation Eingang in die Empfehlungen finden.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, daß Situationen auftreten, in denen nicht *gerechtfertigt* entschieden werden kann, sei es aus Informationsmangel, aufgrund nicht gelingender Vergleiche zwischen Optionen, aufgrund von Zielkonflikten oder einer in dem jeweils gewählten Kalkül uneindeutigen Lage. Wenn eine Entscheidung ohne erkennbare Rechtfertigung erfolgt, heiße sie *dezisionistisch*: wenn keine Gründe für die Wahl einer bestimmten Option sprechen, bliebe nur im Sinne eines *dezisionistischen Restes*, die Entscheidung dem Zufall zu überlassen und zu würfeln oder „persönliche Gründe, die die Entscheidung verständlich machen und uns manchmal viel über die Person verraten ... [ins Spiel zu bringen]“ (Kersting 1992, S. 34). Dies ist die einzige reale Situation, in der man von Dezisionismus und von rein subjektiv-willkürlichen Entscheidungen und Bewertungen reden kann. Rechtfertigungen heben ansonsten Entscheidungen aus dem Willkürlich-Subjektiven heraus, weil sie die Entscheidung nachvollziehbar und transparent machen: die Subjektivität wird durch das Vernunftprinzip der *trans-subjektiven* Verallgemeinerbarkeit über-

wunden: verallgemeinerbare Argumente beanspruchen Geltung über das Subjekt hinaus. Rationaler Argumentation in diesem Sinne zugänglich sind sowohl Entscheidungen über die Geltung von Behauptungen, z.B. über zukünftige Entwicklungen in der Erforschung neuer Materialien (Begründungsrationalität, Gethmann 1979), wie auch über die Berechtigung von Aufforderungen, z.B. im vorliegenden Fall die Rationalität forschungspolitischer Empfehlungen (Rechtfertigungsrationalität, Gethmann 1982).

Auch gerechtfertigte Entscheidungen sind jedoch nicht *absolut objektiv* im Sinne einer Unabhängigkeit von zugrundeliegenden unterstellten Basisannahmen. Denn Begründungen und Rechtfertigungen, die die Trans-Subjektivität verbürgen, sind selbst nie losgelöste Argumente, sondern stets bezogen auf anerkannte Einverständnisse: In Begründungs- und Rechtfertigungsdiskursen als gültig festgestellte Behauptungen oder Aufforderungen sind selbst immer als gültig relativ zu einem *prädiskursiven Einverständnis* zu verstehen.¹ Die argumentativen Wenn-Dann-Ketten der Begründungen enden daher nicht in einer Letztbegründung, auch nicht in der bloßen Subjektivität des Entscheiders, sondern in dem als gemeinsam anerkannten prädiskursiven Einverständnis (Gethmann 1979, Grunwald 1997a). Damit die Resultate der vorliegenden Studie einschließlich der Empfehlungen möglichst allgemeine Zustimmung finden, ist es also geraten, die prädiskursiv gemachten Annahmen allgemein zustimmungsfähig zu halten.

2.1.2 Prognose

Definition: *Eine Prognose (Vorhersage) stellt eine begründete Aussage über erwartbare zukünftige Sachverhalte dar.*

Nach dieser Definition ist entscheidendes Merkmal von Prognosen, daß das Eintreten zukünftiger Sachverhalte relativ zu einem (immer

¹ So werden z.B. in einer naturwissenschaftlichen Entscheidungssituation zwischen zwei Theorien zumindest die Elemente der zugrundeliegenden Meßtheorie als gemeinsame prädiskursive Basis vorausgesetzt.

gegenwärtigen) Wissen *erwartet* werden kann. Diese Relativierung hebt diesen (konstruktivistischen, vgl. Lorenzen 1987) Prognosebegriff von einem am naturwissenschaftlichen Gesetzesbegriff orientierten Prognosebegriff ab (vgl. Knapp 1978, Stegmüller 1983, Grunwald 1997b/c).

Die genannte Definition enthält vor allem drei Bestimmungsmomente, die im folgenden näher zu bestimmen sind: den Zukunftsbezug, die Begründung und ihren Handlungsbezug.

Zukunftsbezug

Prognosen stellen eine Relation zwischen Zuständen oder Ereignissen Z zu (im einfachsten Fall zwei) verschiedenen Zeiten t_1 und t_2 her (sei t_1 früher als t_2), wobei die gegenwärtige Zeit mit t_1 bezeichnet sei. Der Zukunftsaspekt der Prognose besteht in einer Verknüpfung von $Z(t_1)$ mit $Z(t_2)$, in der das Zeitintervall $[t_1, t_2]$ überbrückt wird. Diese Überbrückung erfolgt für *Vorhersagen* derart, daß von $Z(t_1)$ auf den zukünftigen Zustand $Z(t_2)$ geschlossen wird. In dieser *prädiktiven* Betrachtungsweise bestimmt ein gegebener Zustand den nächsten, indem sukzessive aus den zu einer Zeit gegebenen Parameterwerten die (alle oder einige) Parameterwerte des zeitlich folgenden Zustandes abgeleitet werden. Vorhersagen werden daher auch als *extrapolierend* (Knapp 1978) oder *explorativ* (Ayres 1971, S. 41) bezeichnet. Im Falle einer zeitumgekehrten Schlußweise, daß nämlich von einem Zustand zur späteren Zeit auf den zur früheren rückgeschlossen wird, z.B. um den früheren als notwendige Bedingung zur Erreichung des späteren zu erweisen, wird von einer *Retrodiktion* gesprochen.

Begründung

Mit Prognosen als *begründeten* Aussagen wird ein trans-subjektiver Geltungsanspruch erhoben. Nicht begründete Vorhersagen heißen Prophezeiungen. Prognosen sind *bedingte* Aussagen: Jede wissenschaftliche Prognose hängt von Bedingungen ab, die im Wenn-Anteil einer entsprechenden Wenn-dann-Formulierung angegeben werden müssen. Die Begründung von Prognosen erfolgt immer relativ zu einem Wissen, oftmals einem Gesetzeswissen über zeitliche Verläufe.

So wird z.B. die Prognose über die nächste in Europa sichtbare Sonnenfinsternis relativ zum Wissensbestand im Aussagensystem „Bahnmechanik des Systems Erde-Sonne-Mond“ begründet. Relativ zu einem Wissen ist es geboten, das Eintreffen der Prognose *zu erwarten* (Lorenzen 1987). Diese Erwartungsgebottenheit (Begründung) impliziert nicht den Erfolg der Prognose. Rationalität und Erfolg von Prognosen treten auseinander.

Die Einlösung des Geltungsanspruches erfolgt durch ein *prädiktives Argument*, welches den Bezug zwischen dem prognostizierten singulären Sachverhalt und einer allgemeinen Regel herstellt, die diesen Schluß erlaubt. Dabei kann es sich, dies ist das gängige Verständnis von Prognosen in den Naturwissenschaften, um *Verlaufsgesetze* handeln, deren Gesetzmäßigkeit in der Reproduzierbarkeit eines Vorganges, Zustandes oder Ereignisses unter angebbaren Bedingungen besteht. Die Begründung verlaufsgesetzbasierter Prognosen erfolgt deduktiv unter Angabe der allgemeinen Gesetze und der konkreten (kontingenten) Randbedingungen (der jeweiligen Ausgangssituation), so daß die Ableitung der Prognose ein eindeutiger logischer Schluß ist (deduktiv-nomologischer Schluß, vgl. Hempel/Oppenheim 1948, Hempel 1965, Stegmüller 1983).² Andere Begründungsmechanismen (vgl. Zimmerli 1982, Grunwald 1997b) sind Trendextrapolationen, in denen Annahmen über die Beständigkeit festgestellter Trends gemacht werden, und die Berufung auf Expertenwissen (Delphi-Prognosen).

Die Abhängigkeit der Prognosen von einem Wissen und von der Art der Begründungsverfahren läßt sich als eine *Modellabhängigkeit* von Prognosen erfassen. Prognosen sind begründet (und damit gültig als eine Handlungsorientierung) immer relativ zu abgegrenzten Modellen des Wissens (z.B. das Newtonsche Gravitationsmodell in der Astronomie oder das S-Kurven-Modell in der Technikentwicklung, vgl.

² In diesem Zusammenhang verdient die These von der Strukturisomorphie von wissenschaftlichen Erklärungen und Prognosen Erwähnung. Vgl. dazu Stegmüller 1983, Küttner 1989, Grunwald 1997b/c.

Kap. 2.2). Ihre intersubjektive Geltung hängt damit von der Rechtfertigbarkeit der Wahl des zugrundeliegenden Modells ab.

Handlungsbezug

Prognosen sind in Handlungskontexte eingebettet. Aufstellung und Mitteilung von Prognosen greifen selbst in Ereignis- und Handlungszusammenhänge ein. Besonders deutlich wird dies an den Mechanismen der ‚self-fulfilling‘ und ‚self-destroying prophecy‘ (Knapp 1978, Watzlawick 1989). Das Aufstellen von Prognosen kann sogar unter primär diesem Aspekt erfolgen, nämlich als Aufforderung zum Handeln, damit der prognostizierte Effekt eintritt oder gerade nicht eintritt (man denke an die Prognosen zum sogenannten Treibhauseffekt). Prognosen stellen Handlungsorientierungen dar, indem nämlich das Prognostizierte Eingang in anstehende Entscheidungen finden. Prognosen sagen nicht, wie die Zukunft sein wird, sondern stellen *Planungs- und Entscheidungsgrößen* dar, mit deren Hilfe die Zukunft gestaltet wird (in diesem Sinne auch Renn 1996, Grunwald 1997b).

In der Technikfolgenabschätzung (TA) wird oft von einem Prognosedilemma geredet (z.B. Bechmann 1994). Die Früherkennung von Technikfolgen wird zwar gewünscht, weil dann die Entwicklungen noch mit wenig Aufwand beeinflußt werden können, sie ist aber wegen schwierigster Prognoseprobleme kaum möglich. Wenn Prognosen von Technikfolgen dagegen zwanglos möglich sind, ist jedoch meist die Entwicklung bereits so weit fortgeschritten, daß Modifikationen nur mit hohem Aufwand oder gar nicht möglich sind. Diesem Prognosedilemma liegt jedoch ein unreflektierter Prognosebegriff zugrunde. Wenn Prognosen, wie oben ausgeführt, durch ihre Erwartungsgebottenheit charakterisiert sind, wenn sie also keine Aussagen über die Zukunft, sondern Aussagen darstellen, die relativ zu gegenwärtigem Wissen gebieten, das Eintreten bestimmter zukünftiger Sachverhalte zu erwarten, verliert das sogenannte Prognosedilemma seine Spitze (Grunwald 1994). Wenn es nicht Aufgabe von Prognose ist, „die Zukunft zu erkennen“, sondern unseren gestaltenden Umgang mit der Zukunft zu optimieren (in gleichem Sinne auch

Renn 1996, S. 46f.), ist das Prognosedilemma kein Dilemma, sondern drückt nur die triviale Tatsache aus, daß das Wissen über mögliche oder wahrscheinliche Technikfolgen und -potentiale mit der Zeit (d.h. dem Entwicklungsstand) zunimmt, die Modifizierbarkeit konkreter technischer Entwicklungen auf Systemebene jedoch ab. Für Prognosen als Planungsgrößen und Entscheidungshilfen stellt sich dann die Frage nach ihrer Verlässlichkeit und dem Risiko, das mit von ihnen abhängig gemachten Entscheidungen verbunden ist.

2.1.3 *Methodischer Ansatz*

Bisherige Arbeiten der Technikfolgenbeurteilung von Entwicklung und Einsatz neuer Materialien und entsprechender Fertigungsverfahren wurden durchweg auf der Basis von Klassifizierungen nach Stoffen oder Stoffgruppen durchgeführt. Letztere lassen sich oft bis in das Inhaltsverzeichnis der entsprechenden Texte hinein wiederfinden (Kretschmer/Kohlhoff 1995, Socher et.al. 1994, Wissenschaftsrat 1996). Dieses Vorgehen ist für eine Bestandsaufnahme zunächst naheliegend, weil mit der entsprechenden Klassifikation oft auch die betroffenen Institutionen (Lehrstühle, Forschungseinrichtungen, Industriezweige) klassifiziert werden können, insofern diese, was in der Regel der Fall ist, auf bestimmte Stoffe oder Stoffgruppen spezialisiert sind. Gleichwohl ist dieser Ansatz im Hinblick auf zukünftige Entwicklungen nicht ohne Probleme, da er eine Verengung der Fragestellung daraufhin nahelegt, was in Zukunft mit dem Einsatz neuer Materialien möglich ist und was die mutmaßlichen Folgen sein werden. So berechtigt letztere Frage ist (einen Beitrag zur Beantwortung will auch die vorliegende Studie liefern, vgl. Kap. 4), sollte die Betrachtung nicht *ausschließlich* darauf eingegrenzt werden. Denn in diesem Fall kann leicht die zielorientierte (finale) Frage nach den Funktionen, die neue Materialien zukünftig erfüllen *sollen*, um bestimmte gesellschaftlich relevante Zwecke zu erreichen, aus dem Blick geraten. Um die methodische Differenz beider Ansätze zu verdeutlichen, sei folgende Unterscheidung vorgeschlagen:

Unter einem *explorativen Ansatz* wird verstanden, die zum jeweiligen Gegenwartspunkt erkennbaren Entwicklungslinien und Trends in die Zukunft zu extrapolieren (Begriffsbildung in Anlehnung an die explorativen Prognosen, vgl. Knapp 1978).

Unter einem *finalen Ansatz* sei dagegen verstanden, von Zielsetzungen für zukünftige Sachverhalte auszugehen und die Frage zu stellen, was heute getan werden müsse, um diese Ziele zu erreichen.

Die Unterscheidung in explorative und finale Ansätze ist durch die unterschiedliche Blickrichtung relativ zur Zeitachse bestimmt: *prä-diktiv* von der Gegenwart durch Fortschreibung in die Zukunft gerichtet oder von antizipierter (gewünschter) Zukunft *retrodiktiv* auf die Gegenwart rückschließend. Die explorative Frage ist also „Was *wird* gemäß heutigem Wissen *sein*, was ist für die Zukunft vernünftigerweise *erwartbar*?“, die finale Frage „Was ist zu tun, damit bestimmte Entwicklungen in der gewünschten Richtung verlaufen?“. In rationaler Beratung gesellschaftlicher Gruppen oder Systeme in Fragen der technischen Entwicklung ist die Verwendung beider Ansätze erforderlich. Für den explorativen bedarf dies kaum einer Begründung, da die frühzeitige Kenntnis der Potentiale von neuen Techniken erforderlich ist, um ex ante überhaupt über positive oder negative Folgen von Forschung, Entwicklung und Einsatz reden und das Wissen über diese in Entscheidungsprozesse einbeziehen zu können. Die Früherkennung der Potentiale ist nur explorativ, durch begründete Annahmen über zukünftig zu erwartende Entwicklungen auf der Basis des gegenwärtigen Wissens möglich. Die finale Sicht hingegen ist unabdingbar, um Exekutive und Legislative Gestaltungsspielräume im Hinblick auf die Verfolgung von gesellschaftlichen Zielen zu eröffnen, z.B. durch gezielte Forschungsförderung. In der Beschränkung auf ein exploratives Verständnis der Technikfolgenbeurteilung liegt die Gefahr, daß die Forschungs- und Technikpolitik sich in der extrapolierenden Fortschreibung des Bestehenden oder der Realisierung des Machbaren erschöpft bzw. den explorativ erkennbaren Trends nur passiv hinterherläuft – bestenfalls versuchend, vermutete oder bereits eingetretene Negativfolgen zu kompensieren. Diese Gefahr betrifft

insbesondere auch die Beurteilung von Chancen und Risiken der Entwicklung und des Einsatzes neuer Materialien, weil diese die „Wurzeln“ der Technikentwicklung in vielen anderen Bereichen bilden und technikpolitische Entscheidungen in diesem Bereich tiefgreifende Auswirkungen auf andere Bereiche haben. Eine zumindest *auch* zielorientierte Betrachtung der Materialentwicklung ist erforderlich, weil bereits durch die Auswahl von Materialien und den zugehörigen Fertigungsverfahren wichtige Vorentscheidungen über Technikfolgen getroffen werden, die sich erst im operationellen Einsatz der entsprechenden Systeme oder Endprodukte zeigen. Dann aber ist eine eventuell aufgrund von Konflikten dieser Technikfolgen mit gesellschaftlichen Zielen erforderliche Modifikation mit erheblich höheren Kosten verbunden (wenn überhaupt noch sinnvoll möglich) als wenn der korrigierende Eingriff bereits im Entwicklungsstadium erfolgt wäre. Es ist also auch ein Gebot der politischen und ökonomischen Klugheit, ab initio finale Ansätze nicht aus dem Auge zu verlieren.

Aus diesen Gründen wird die komplementäre Nutzung beider Ansätze vorgeschlagen und als methodische Basis verwendet. Die Exploration des vernünftigerweise erwartbaren *Möglichen* in der Materialentwicklung bildet den ersten Schritt (Kap. 4). Im zweiten Schritt werden aus dem Bereich des Möglichen bestimmte Aspekte der Materialentwicklung final auf ihre erwartbare Eignung zur Lösung gegenwärtiger oder absehbarer zukünftiger Probleme im Verkehrssystem untersucht.

In der Wahrnehmung der wissenschaftlich-technischen Entwicklung von außen wird oftmals der explorative Ansatz mit Grundlagenforschung identifiziert, weil die Grundlagenforschung scheinbar eine Eigendynamik aufweist: in der Realisierung ihrer selbstgesetzten Zwecke entstehen neue Fragen, die zu weiteren selbstgesetzten Zwecken führen und so fort. So führt z.B. in der Elementarteilchenphysik die Beantwortung einer Frage in der Regel zu einer Fülle neuer Fragen, durch die neue Experimente angeregt werden. Es ist geradezu ein Kennzeichen moderner Wissenschaft, daß sie durch Beantwortung offener Fragen den Bereich des Unerforschten zumeist nicht verkleinert, sondern *vergrößert*, daß sie also durch ihre Arbeit

den Bereich des Erforschbaren erweitert (dazu z.B. Luhmann 1990, S. 271ff.). Analog wird oft der finale Ansatz mit anwendungsorientierter Forschung gleichgesetzt (Finalisierung der Wissenschaften). Im einzelnen geht diese Identifikation jedoch an der Sache vorbei: auch Projekte der Grundlagenforschung werden in der Regel zielorientiert durchgeführt.

Das Kriterium der Unterscheidung von anwendungs- und grundlagenorientierter Forschung ist der *Ort der Zwecksetzung* in der wissenschaftlich-technischen Entwicklung: sind diese in grundlagenorientierter Forschung von der Wissenschaft selbst gesetzt oder werden sie in anwendungsorientierter Forschung von außen, d.h. von außerwissenschaftlichen Bereichen der Gesellschaft (vor allem durch politische Instanzen und die Industrie) an sie herangetragen. So werden die mit einem Hochenergie-Beschleunigerring verfolgten elementarteilchenphysikalischen Ziele von den Physikern selbst definiert, sie ergeben sich aus offenen Fragen des jeweiligen Forschungsstandes (die gesellschaftliche Frage ist dann nur, ob der Gesellschaft diese physikalischen Grundlagenprobleme soviel bedeuten, daß sie die Finanzierung übernimmt). Verfolgt dagegen der Staat oder eine andere gesellschaftliche Agentur bestimmte Absichten, so kann sie diesen Absichten durch entsprechende Förderprogramme Gewicht und Anerkennung verleihen. Wenn die Industrie in bestimmten forschungsaktiven Bereichen Marktchancen sieht, kann sie ihre eigene Forschung dahin orientieren oder über Aufträge entsprechende Forschung anregen.

Der Begriff der anwendungsorientierten Forschung ist unscharf, weil aus ihm nicht ersichtlich wird, in welcher zeitlichen oder thematischen Nähe die beabsichtigte Anwendung zum Forschungsprojekt steht. Im Extremfall läßt sich auch Grundlagenforschung als anwendungsorientiert (mit fernem Zeithorizont) deklarieren. Aus diesem Grund sollen hier statt dessen grundlagen- und *umsetzungsorientierte* Forschung gegenübergestellt werden. Umsetzungsorientierte Forschung in den Materialwissenschaften bezieht sich z.B. auf den zielgerichteten Einsatz von Materialien in konkreten technischen Systemen. Sie ist, im Gegensatz zur Grundlagenforschung, immer

auch mit Fragen der gesellschaftlichen Rahmenbedingungen für technische Entwicklungen und ihre Akzeptanz, besonders im Hinblick auf die Durchsetzbarkeit am Markt, befaßt.

Die komplementäre Verwendung von explorativem und finalem Ansatz erlaubt es darüber hinaus, die Akzeptanzproblematik wissenschaftlich-technischer Entwicklungen mit einem höheren Grad an Rationalität zu betrachten. Ein ausschließlich explorativer Ansatz kann, wie bereits angedeutet, dazu verleiten, der technischen Entwicklung eine immanente Eigendynamik zuzusprechen und ihre Beeinflußbarkeit unter Aspekten gesellschaftlicher Wünschbarkeit und politischer Steuerbarkeit zu negieren (*technologischer Determinismus*, vgl. Mensch 1981, Ropohl 1982). Wenn die gesamte Entwicklung selbst aber kaum noch als beeinflussbar erscheint, richtet sich das öffentliche Augenmerk in vielleicht überbetonter Weise auf die *Nebenfolgen* dieser Entwicklungen. In dieser Sicht stellt sich dann die Frage der gesellschaftlichen *Akzeptanz* einer vermeintlich unabänderlichen Entwicklung mit ihren Folgen. In diesem Verständnis stellt sich politischen Instanzen die Aufgabe, mögliche negative Nebenfolgen durch flankierende Maßnahmen zu kompensieren, dadurch Akzeptanz zu schaffen und durch mangelnde Akzeptanz verursachte gesellschaftliche Verwerfungen zu verhindern. Bestenfalls wird diese Akzeptanzbeschaffung als Mediation organisiert, so daß die von Technikfolgen Betroffenen sich wenigstens artikulieren und eventuell gesellschaftliche Kompensationen für die Inkaufnahme technisch bedingter Risiken oder anderer Nachteile aushandeln können (Beispiel: Lärmbelästigung in der Nähe eines Flughafens). Die Annahme eines technologischen Determinismus ist jedoch aus handlungstheoretischen Gründen unhaltbar – da Technik planbar ist, ist sie auch verhinderbar (DLR 1993) – und wird empirisch nicht gestützt (z.B. Krohn/Rammert 1985, Rammert 1994).

Die gesellschaftliche Gestaltbarkeit von Technik wird im finalen Ansatz per definitionem betont: kein Selbstlauf wissenschaftlich-technischer Entwicklungen, sondern ihre Ausrichtung (auch, nicht ausschließlich) an gesellschaftlich oder politisch vorgegebenen Zielen. Dann jedoch ist die Akzeptanz der Nebenfolgen nicht mehr von der

technischen Entwicklung losgelöst, sondern in Zusammenhang mit den darin verfolgten Zielen zu sehen. Genau in diesem Abwägen von erwünschten Zielen und möglichen Nebenfolgen liegt der Gewinn an Rationalität: Lohnt sich die Inkaufnahme bestimmter Nebenfolgen (z.B. Risiken für Gesundheit oder Umwelt, höhere Kosten für bestimmte technische Produkte) angesichts des verfolgten Ziels und angesichts möglicher Alternativen in der Zielerreichung? Dieses Problem des Abwägens Risiken/Chancen und Risiken/Risiken stellt, da die Option „Null-Risiko“ in der Regel diskursiv keine Rolle spielt, die zentrale Herausforderung an den rationalen Umgang mit Technikfolgen dar.

Die Feststellung der Akzeptanz von Folgen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen ist auch deswegen nicht hinreichend für eine rationale Beratung gesellschaftlicher Gruppen oder Institutionen, weil sie sich nach den jeweiligen subjektiven Präferenzen und Wertmaßstäben der Individuen richtet. Diese haben jedoch keineswegs per se eine Verbindlichkeit oder Aussagekraft für das Gemeinwesen (Vernunftprinzip, s.o.). So sind z.B. Risikowahrnehmung und -akzeptanz nach den Ergebnissen der sozialwissenschaftlichen Risikoforschung von einer Fülle von kontingenten Faktoren abhängig (vgl. z.B. Jungermann/Slovic 1993; Kemp 1993, Wildavsky 1993, Rayner 1993) wie

- subjektiven Dispositionen oder Erlebnissen in der näheren Vergangenheit,
- dem „Katastrophenpotential“ (man denke an die unterschiedliche Risikowahrnehmung hinsichtlich Flugzeuge und Automobil),
- der Beeinflußbarkeit der Risiken oder
- der Freiwilligkeit der eingegangenen Risiken.

Aufgrund dieser subjektiv-beliebigen und oftmals zufallsbedingten Wahrnehmung und Akzeptanz von Risiken kann die Gesellschaft auf dieser Basis nicht über allgemeinverbindliche Zumutbarkeitsschwellen für Risiken entscheiden. Nach Akzeptanzmechanismen funktioniert der ökonomische Markt; die politischen Rahmenbedingungen und Regeln jedoch bedürfen einer anderen Legitimation. So ist z.B. in der Verkehrspolitik nicht auf die Akzeptanz des Katalysators in der

Automobilindustrie oder auf dem Automobilmarkt gesetzt worden, sondern seine Einführung wurde durch steuerliche Anreize und ordnungspolitische Maßnahmen durchgesetzt. Das Vertrauen auf die Akzeptanz bei Herstellern und Käufern hätte möglicherweise aufgrund des kurzfristigen Kosten/Nutzen-Denkens auf beiden Seiten zu einem Scheitern des Plans geführt. Es ist also zu unterscheiden zwischen Bereichen, in denen es ausschließlich auf Akzeptanz ankommt (dies sind die ökonomischen Märkte), und den gesellschaftlichen Rahmenbedingungen für diese Bereiche.

Bei der Bildung von Gesamturteilen über technische Entwicklungen stellt sich häufig die Frage nach der Relevanz von Kriterien wie „Bequemlichkeit“ oder „Komfort“ – die das Akzeptanzverhalten stark beeinflussen – und das Problem ihrer Abwägung z.B. mit aus Umweltschutz-Gründen wünschenswerten Restriktionen. So führen Superleichtbau-Konzepte für Automobile, welche aus Gründen der Energieeinsparung wünschenswert wären, zu Problemen mit Komfort-Wünschen hinsichtlich der Ausstattung, was ihre Akzeptanz verhindern könnte. Es besteht oft ein Konflikt zwischen der alltäglichen Akzeptanz von Wissenschaft und Technik bzw. ihrer Folgen und der normativen Frage, bis zu welchem Punkt dieses Akzeptanz- und Präferenzverhalten *berechtigt* ist, d.h. durch verallgemeinerbare Normen gedeckt und damit als ethisch gerechtfertigte Maxime politischen Handelns dienen kann. Kürzer formuliert ist dies der Konflikt zwischen den partikularen Interessen der Mitglieder der Gesellschaft und dem, was auf gesellschaftlicher Ebene als sinnvoll und verbindlich für jedermann angesehen werden kann, dem „Gemeinwohl“. Dieses ist nun gerade Objekt der ethischen Reflexion (Gethmann 1982). Sie kann sich nicht in der Erfassung oder Prognose von Akzeptanzverhalten erschöpfen, sondern beurteilt argumentative Vorschläge auf ihre Verallgemeinerbarkeit hin, d.h. auf ihre Eignung als Teil des Gemeinwohls (Gethmann 1994, Grunwald 1996b).

Die Frage nach der Akzeptanz trifft zudem oft gar nicht den relevanten Kern von Konflikten um Technik. Von gesellschaftlichem Interesse ist vielmehr die Frage, inwieweit es vertretbar ist, den Mitgliedern der Gesellschaft *zuzumuten*, unerwünschte Nebenfolgen wissen-

schaftlich-technischer Entwicklungen in Kauf zu nehmen, z.B. ein technisch bedingtes Risiko zu tragen. Die Fragen bezüglich der Maßstäbe der Technikentwicklung sind im Kern vom Typ: Welche Risiken sind dem Individuum im Interesse der Allgemeinheit in rational vertretbarer Weise zumutbar? Nach welchen Kriterien und Vergleichsmaßstäben kann diese Frage beantwortet werden? Wie sollen technisch bedingte Risiken räumlich, zeitlich und auf die gesellschaftlichen Gruppen verteilt werden? Konflikte dieser Art zwischen kurzfristigem Nutzen und dem langfristig als wünschenswert Erkannten prägen wesentlich die gegenwärtige Technikdiskussion. Der Bezug auf Akzeptanz allein ist ersichtlich nicht hinreichend, um letzterem zur gebührenden Beachtung zu verhelfen, vor allem nicht unter dem Aspekt der Langzeitverantwortung (Gethmann 1993). Die Beziehung dessen, was auf gesellschaftlicher Ebene als sinnvoll angesehen werden kann, zu den beteiligten Individuen kann demgegenüber durch den Begriff der *Akzeptabilität* erfaßt werden, der die Zumutbarkeit unter rationalen Kriterien bezeichnet. *Akzeptabilitätsfragen* sind die eigentlich ethischen Herausforderungen an wissenschaftliche Politikberatung in Fragen der Technikgestaltung (Grunwald 1996b). Es geht dort nicht um faktische, rein empirisch erhebbare Akzeptanzwerte, sondern um die Frage, was mit welchen Gründen den Mitgliedern der Gesellschaft *vorgeschrieben* bzw. *zugemutet* werden dürfe (man denke an das oben erwähnte Beispiel der Einführung des Katalysators). Der *Akzeptabilitätsbegriff* bildet die normative Mitte von Konflikten über Technikfolgen, zusammen mit den damit verbundenen Problemen von Risikoüberlegungen, Risiko-Risiko- und Risiko-Chancen-Vergleichen sowie Überlegungen zur gerechten und ethisch vertretbaren Verteilung technisch bedingter Risiken (Grunwald 1996b).

Resultate der vorliegenden Studie haben daher folgende Struktur: sie sind sowohl in ihren deskriptiven Aussagen wie in ihren präskriptiven Bestandteilen (Empfehlungen) immer hypothetisch und relational, indem sie in Form von Wenn-dann-Ketten *relative* Begründungen und Rechtfertigungen erlauben. Eine absolut richtige oder in irgendeinem Sinne absolut optimale Entscheidung kann nicht erzielt wer-

den, weil es keine „letzten“ Begründungen oder Rechtfertigungen gibt. Die Qualität der resultierenden Empfehlungen wird durch die Qualität der angeführten Begründungen bestimmt (Grunwald 1996c), d.h. durch die trans-subjektive Verallgemeinerbarkeit der hinzugezogenen Wenn/Dann-Argumente.

Diese Argumente haben prädiktive oder retrodiktive Struktur. Im explorativen Ansatz basiert das Argument auf der Kenntnis der Ausgangslage und der Heranziehung von Modellen, die den Schluß auf zukünftige Entwicklungen erlauben (dazu Kap. 2.2). Im zielorientierten Ansatz ist das Antezedens (der Wenn-Satz) selbst hypothetisch und beschreibt ein gesetztes Ziel, von dem aus retrodiktiv, ebenfalls auf der Basis von Modellannahmen und technischem Wissen, auf gegenwärtige Handlungserfordernisse zurückgeschlossen wird, die zur Erreichung dieser Ziele erforderlich sind. Die komplementäre Verwendung des explorativen und des zielorientierten Ansatzes dient als argumentative Basis sowohl der forschungspolitischen Empfehlungen wie auch weiterer Querschnittsanalysen, z.B. zum Life Cycle Approach in der Materialentwicklung, zur Kreislaufwirtschaft oder zu europäischen Innovationskulturen.

2.2 Prognosen

Wissenschaftliche Beratung von Politik und Gesellschaft in Fragen wissenschaftlich-technischer Entwicklungen ist stets mit Prognoseproblemen verbunden. Wichtiges Mittel der Technikfolgenbeurteilung sind hypothetische Vorhersagen der Folgen technischer Handlungen oder von Entscheidungen über Technik. Insbesondere betrifft dies Arbeiten, die, wie die vorliegende, sich nicht auf den Horizont der unmittelbar bevorstehenden Zukunft beschränken, sondern die den Rahmen mittelfristiger, sich auf etwa 10 bis 20 Jahre erstreckender Entwicklungen antizipierend reflektieren wollen. Damit das Reden über derartige Entwicklungen sich nicht entweder im hypothetischen verliert oder aber in die Gefahr der Verabsolutierung gerät, sind gewisse methodische Vorklärunen vonnöten.

Im Projekt Neue Materialien treten Prognosen an zwei methodisch verschiedenen Stellen auf: explorative Prognosen im Kapitel über Entwicklungstendenzen im Bereich neuer Materialien und prognostische Annahmen hinsichtlich der Entwicklungen im Verkehrssystem. Im ersteren Fall geht es darum, das zugrundeliegende und begründende Modell vorzustellen und hinsichtlich seiner Möglichkeiten und Grenzen zu diskutieren, im zweiten Fall sollen die auch in dem dort gewählten zielorientierten Vorgehen nicht vermeidbaren prognostischen Anteile benannt werden.

2.2.1 Modelle als Basis für Prognosen in der Materialentwicklung

Konkrete Fragen nach dem erreichten Entwicklungsstand oder dem künftig wahrscheinlichen Verlauf einer technischen Entwicklung werden in der ersten Planungsphase eines Projekts immer wieder gestellt. Das Risiko liegt nicht nur in der Systemkomplexität einzelner Systeme, sondern auch in dem durchschnittlichen Entwicklungszeitraum von 15 Jahren für eine Systemkomponente von den Grundlagen bis zur Serienreife.

In dem deutschen Delphi-Bericht zur Entwicklung von Wissenschaft und Technik (BMFT 1993) wird ausgeführt, daß für eine zutreffende Vorhersage des erreichbaren Standes der Technik idealtypisch eine Verknüpfung zwischen den Bereichen der wissenschaftlichen Grundlagenentwicklung, der industriellen Technikentwicklung und der kommerziellen Anwendung hergestellt werden sollte. Dieses Vorgehen bei der Umsetzung einer Ideen in das endgültige Produkt bzw. die Bewertung einer Idee beschreiben aus Sicht der Unternehmung die Ausführungen von Kroy (1988).

Das idealtypische Modellschema geht davon aus, daß nach der Erarbeitung der wissenschaftlichen Grundlagen einer Technik die Industrie die Ergebnisse aufgreift. In weiteren Entwicklungsschritten wird die Komponente zur Anwendungsreife gebracht und schließlich kommerziell verwertet. Die typischerweise auftretenden einzelnen Verläu-

fe der erwähnten Bereiche sind in Abb. 2-1 dargestellt. Das referierte Schema erscheint geeignet für die Darstellung von technischen Entwicklungen und liefert einen ersten Anhalt, wie bei der Vorhersage des einsatzreifen Standes der Technik einer technischen Entwicklung prinzipiell vorzugehen ist.

Aktivitätsindex

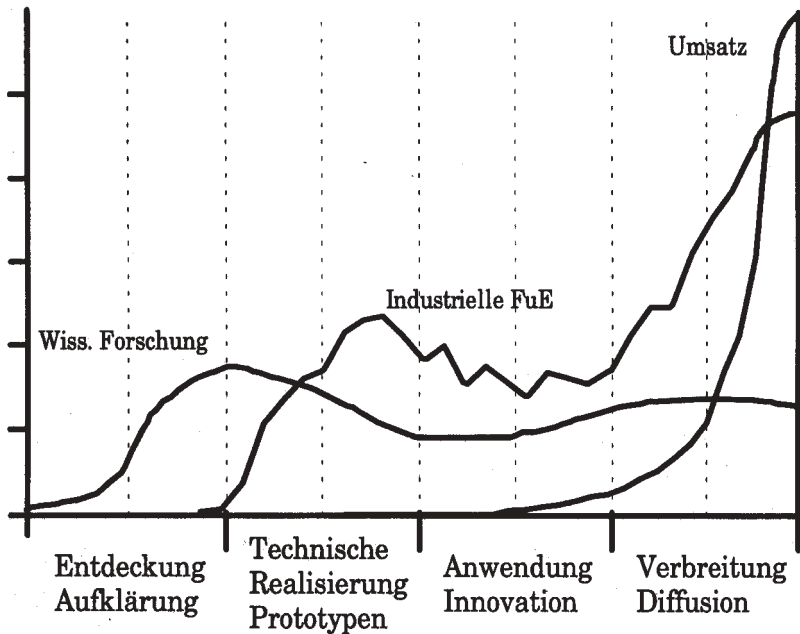


Abb. 2-1: Schematischer Verlauf einer wissenschaftlich-technischen Entwicklung (BMFT 1993)

Die in dem Bild erkennbare Entwicklung einer Technik von den ersten Grundlagen bis zur Verbreitung zeigen, daß man nur sukzessive von Phase zu Phase dem gesetzten Ziel näherkommt. Zunächst können technische Probleme und nicht vorhersehbare Wechselwirkungen mit anderen Bereichen und ihre Erforschung die ersten Phasen prägen. Die Entwicklung wird weiter vorwärts getrieben mit den wachsenden Anforderungen und durch die aufkommende Konkurrenzsituation, bis eine gewisse technische Reife erreicht ist.

Wird der jeweils erreichte Entwicklungsstand über der Zeit aufgetragen und werden die Punkte durch eine Kurve verknüpft, ergibt sich für den Verlauf einer technischen Entwicklung bis zu einem gewissen Stand im großen und ganzen ein S-förmiger Charakter der Kurve. Diese Kurve ist identisch mit der aus der Biologie bekannten Wachstumskurve (Vitányi 1985, Gomeni/Gomeni 1980) und wird verschiedentlich als logistische Kurve, Lernkurve oder Sigmoidenkurve (S-Kurve) tituliert. Bekannt wurde diese Art der Vorhersage durch die Arbeiten von R. Pearl und L.J. Read in den 20iger Jahren. Die beiden Statistiker verwendeten die Kurve für Ihre Analyse des Bevölkerungs- und biologischen Wachstums (Yamane 1976).

Die Wachstums- oder Sigmoidenkurve hat sich in vielen ähnlich garteten Fällen bewährt und auch Eingang in den technischen Bereich gefunden (Razim/Kaniut 1988, Foster 1986). Stellvertretend für die Anwendung der S-Kurve auf technische Entwicklungen ist in Abb. 2-2 der zunehmende Anteil von Kunststoffen im Automobilbau dargestellt.

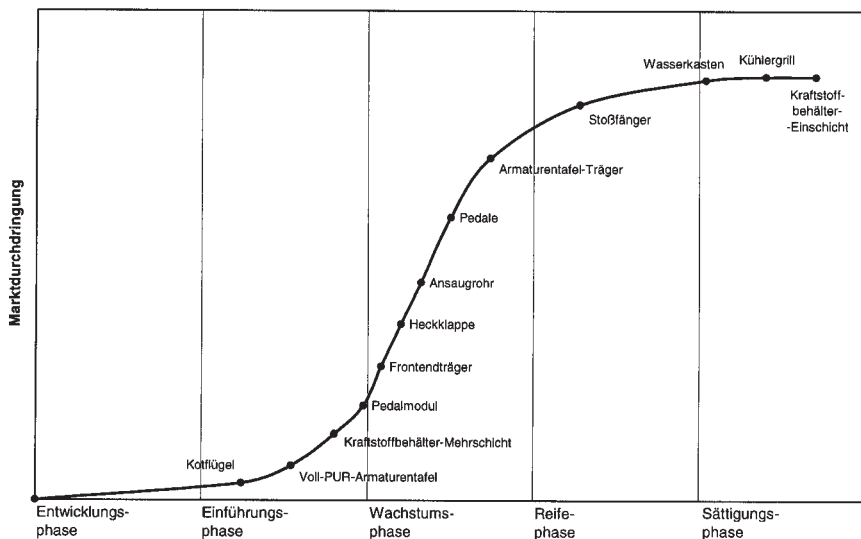


Abb. 2-2: Entwicklung des Anteils von Kunststoffanwendungen im Automobilbau (Eckell 1994)

Der Abb. 2-2 ist zu entnehmen, daß der Einstieg in die Verwendung von Kunststoffteilen zunächst nur langsam vonstatten ging. Durch die zunehmende Erfahrung im Umgang mit diesem Werkstoff stieg der Anteil der Kunststoffanwendungen mit der Zeit immer rascher an. Da aber gleichzeitig mit dem zunehmenden Ersetzungsprozeß die weiteren potentiellen Einsatzgebiete für Kunststoffe im Auto abnehmen, ist mit zunehmender Dauer eine nur noch geringe Steigerung die Folge, die sich über das Abflachen der Kurve ausdrückt.

Dieses Beispiel der technischen Entwicklung der Kunststoffe im Automobilbau zeigt auf der Zeitachse, daß der Weg von der ersten Idee bis zur optimalen Reife verschiedene Phasen durchläuft. Die Verallgemeinerung der Bildinformationen liefert die Basis für die S-Kurve und für das Prinzip der Kurve, wie es in Abb. 2-3 dargestellt ist. Morphologisch ergibt sich für die S-Kurve folgendes Bild. Zunächst verläuft die S-Kurve relativ flach. Erst allmählich wird der Kurvenverlauf steiler bis zu einem Wendepunkt (M). Danach flacht der steile Anstieg zunehmend ab und die Kurve nähert sich asymptotisch einem oberen Grenzwert k.

In (Niemann 1981) wird die technische Entwicklung entlang der S-Kurve durch drei Phasen charakterisiert. In der ersten Phase werden die Ideen geboren, verfolgt und durch wissenschaftliche Forschungen der Einstieg in eine Technik theoretisch vorbereitet. Einige dieser wissenschaftlich aufbereiteten Ideen schaffen es, in die Phase II überzutreten, d.h. sie haben anscheinend Potential für einen technischen Fortschritt oder Reifung. Die Entwicklungsarbeiten werden in dieser Phase intensiviert und es werden z.B. Prototypen hergestellt. Ist zudem die Wirtschaftlichkeit der in Entwicklung befindlichen Technik festgestellt worden, ist der Übergang in die dritte und letzte Phase erfolgt. Die Entwicklung hat einen einsatzreifen Stand der Technik erreicht und wird vermarktet. Parallel wird durch weitere Entwicklungsarbeiten versucht, der Technik den „letzten Schliff“ zu geben.

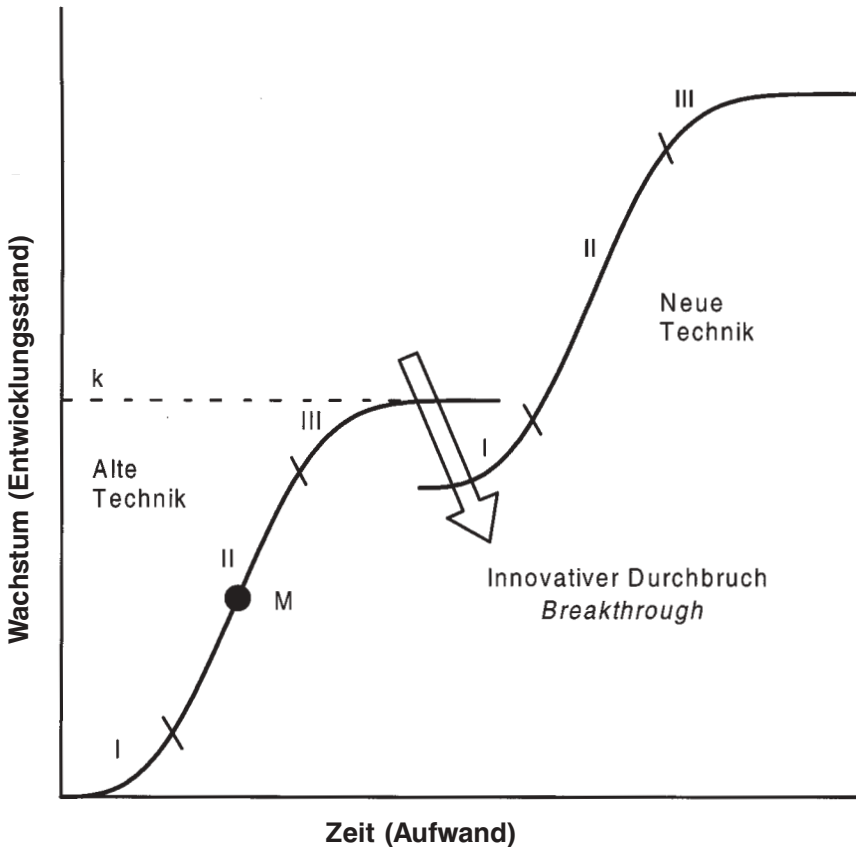


Abb. 2-3: Sigmoiden oder S-Kurve in allgemeiner Darstellung

In der Phase III erreicht der Entwicklungsverlauf die endgültige technische Reife (Sättigung), und es sind nur noch geringfügige Verbesserungen des Entwicklungsstandes durch einen hohen Aufwand (zeitlich und materiell) möglich. Somit ist es erforderlich, nach einer neuen und weiterführenden Anwendung zu forschen. Idealerweise führen die Forschungsarbeiten auf einen neuartigen technischen Ansatz (*Breakthrough*), und der Entwicklungszyklus beginnt von neuem.

Den innovativen Durchbruch, d.h. Breakthrough, aus den Ideen der ersten Phase herauszufiltern ist sehr schwierig und risikoreich. Daß es diesen Breakthrough gibt, zeigen Beispiele aus der industriellen Revolution. Das Buch *Innovation* von Foster (1986) widmet sich aus-

fürlich dieser Thematik und führt als Beispiele die Verdrängung der großen Segelschiffe von den Weltmeeren durch die Dampfschiffe, die Entwicklung der Kunstherzen sowie den Übergang von den Verstärkerrohren zu den integrierten Schaltkreisen an, um nur einige zu nennen. Daneben gibt es weitere Hinweise für den Umgang mit der S-Kurve als Vorhersagemöglichkeit von technischen Entwicklungen.

Die Anwendung eines Vorhersagemodells zum Stand der Technik setzt voraus, daß der bisherige Verlauf der Entwicklung der Technik erfaßt und abgebildet werden kann. Das erfordert eine Analyse des Entwicklungsfortgangs der zu prognostizierenden Technik mittels einschlägiger Literatur. Das Prognoseverfahren soll den verschiedenen Unwägbarkeiten, wie z.B. technischen Hindernissen, Wirtschaftlichkeit, etc., Rechnung tragen und dies in seinen Ergebnissen dokumentieren. Verschiedentlich wird dieses Problem gelöst, indem ein Lösungsraum vorgesehen wird. Dieser Lösungsraum deckt die extremen Alternativen der technischen Entwicklung ab. Rasches Umsetzen der Technik in die Anwendung oder Verzögerungen durch die erwähnten Hemmnisse können zu solchen Alternativlösungen führen.

2.2.2 *Materialeinsatz in Verkehrssystemen*

Hinsichtlich des Materialeinsatzes in Verkehrssystemen soll im finalen Ansatz gefragt werden, durch welche materialwissenschaftlichen Weichenstellungen Beiträge zur Realisierung gesellschaftlicher Ziele in diesem Bereich geleistet werden könnten. Es stellt sich hierbei die Frage, inwieweit auch zielorientierten (retrodiktiven) Schlüssen in der Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten neuer Materialien in Verkehrssystemen prognostische Annahmen über Entwicklungen im Verkehrssektor zugrundeliegen müßten. So stellt sich die Frage, in welcher Weise die Heranziehung von Prognosen oder Szenarien im Verkehrsbereich für den Zeitraum bis etwa 2020 erforderlich ist. Aufgrund der Begrenztheit von Verlässlichkeit und Genauigkeit derartiger Prognosen (Kick-Off-Meeting) sollte es vermieden werden, die Ergebnisse des Projekts von konkreten, gar quantitativen, Verkehrsprognosen abhängig zu machen.

Dieses ist jedoch auch aufgrund des zielorientierten Ansatzes gar nicht erforderlich. Die Aufgabe besteht in diesem Ansatz weder darin, verkehrspolitische Stellungnahmen abzugeben noch Verkehrsprognosen zu erarbeiten oder zu beurteilen, auch nicht darin, den künftigen Materialeinsatz in Verkehrssystemen quantitativ zu prognostizieren, sondern in der Analyse, ob und wie der Einsatz neuer Materialien in Transportsystemen zur Lösung bestimmter Probleme beitragen bzw. zu Innovationen führen kann und in welcher Weise die zukünftige Entwicklung in der Materialwissenschaft hypothetisch, szenarien- und zielabhängig *qualitativ* eingeschätzt werden kann. Der Einbau von Empfehlungen in verkehrspolitische Gesamtszenarien, d.h. die Kombination materialwissenschaftlicher Forschungsförderung des Einsatzes neuer Materialien in Verkehrssystemen und verkehrspolitischen Maßnahmen zur Realisierung von gesamtgesellschaftlichen Zielen ist Aufgabe politischer Institutionen.

In der Analyse der Frage, ob und wie der Einsatz neuer Materialien in Transportsystemen zur Lösung bestimmter Probleme beitragen bzw. zu Innovationen führen kann, ist ein Bezug auf Verkehrsprognosen nicht erforderlich. Statt dessen besteht der Ausgangspunkt der Überlegungen in einer Analyse *gegenwärtiger* oder wenigstens gegenwärtig erkannter und absehbarer Probleme im Transportbereich. Damit besteht keine Abhängigkeit der Ergebnisse von sehr unsicheren quantitativen Verkehrsprognosen, statt dessen ein direkter Bezug auf *heute* erkannte Probleme. Über letztere dürfte zum großen Teil sogar Einvernehmen bestehen, was die Akzeptanz der Ergebnisse der Studie befördern dürfte. Das daraus resultierende zielorientierte Vorgehen zum Umgang mit dem Zukunftsaspekt ist:

1. Identifikation heutiger und absehbarer zukünftiger Probleme im Verkehrsbereich (Energieverbrauch, Emissionen, Materialverbrauch, Kapazitätsprobleme, Wirtschaftlichkeit).
2. Bestimmung von darauf aufbauenden Kriterien für die Beurteilung der Beitragsmöglichkeiten neuer Materialien zur zielorientierten Bewältigung dieser Probleme.

3. Auf der Basis dieser Kriterien werden die Möglichkeiten der Entwicklung und des Einsatzes von Materialien, Werkstoffgruppen, Verfahren etc. analysiert. Dies erfolgt in der Differenzierung „gegenwärtig verfügbare Möglichkeiten“, „in naher Zukunft absehbare Möglichkeiten“, „perspektivisch denkbare Möglichkeiten“.
4. Es werden die Forschungs- und Entwicklungsleistungen bestimmt, die erforderlich sind, damit die vorgeschlagene Problemlösung in Realität umgesetzt werden kann. Dies umfaßt Vorschläge zu entsprechenden förderungspolitischen Maßnahmen bis hin zu Hinweisen auf Implikationen in anderen Bereichen, z.B. auf Verkehrsszenarien.

Die Beratungsleistung hätte dann die Form „Wenn das Problem x im Verkehrsbereich gelöst werden soll, kann der Werkstoff y/das Verfahren z etc. folgendes beitragen: Damit dies realisiert werden kann, sind die Forschungen und Entwicklungen a, b ... durchzuführen, welche wiederum durch die forschungspolitischen Maßnahmen k, l,... gefördert werden können/sollen.“

Prognostische Annahmen in dieser Schrittfolge sind:

- Gegenwärtig erkannte Probleme werden auch die Probleme in der absehbaren Zukunft sein: Sie werden sich nicht *abrupt* ändern.
- Die gegenwärtigen Verkehrsträger PKW, Bahn, Flugzeug werden in der näheren Zukunft zumindest nicht dramatisch an Bedeutung verlieren, so daß sich die intensive Beschäftigung mit diesen lohnt.

Diese Annahmen dürften einerseits hinreichend schwach sein, um nicht den Geltungsbereich der Resultate des Projekts zu stark einzuschränken, und andererseits hinreichend unstrittig, um nicht in eine verkehrspolitische Diskussion hineingezogen zu werden. Damit sind sie geeignet, um als ein prädiskursives Einverständnis eine Basis für darauf aufbauende Begründungsketten hinsichtlich des Einsatzes neuer Materialien herangezogen zu werden.

Ein Problem besteht jedoch darin, daß die Beschränkung auf die drei genannten Hauptverkehrsträger zu „konservativ“ sein und den Blick auf mögliche Beiträge neuer Materialien zur Entwicklung ganz neuer Verkehrssysteme für „übermorgen“ verbauen könnte. Innovative und avancierte Lösungsvorschläge im Verkehrssektor werden daher gegebenenfalls separat im Sinne möglicher Szenarien berücksichtigt.

2.3 Multikriterielle Bewertung von Materialien

Durch die Suche nach dem „roten Faden“ infolge der Entgrenzung früher „sauber“ getrennter Wissensgebiete und die zunehmende Vernetzung wird es immer aufwendiger und schwieriger, aus einem gegebenen Spektrum möglicher Entwicklungslinien die aussichtsreichsten und problemlösenden herauszufiltern. Die Erstellung einer verketteten Entscheidungsstrategie bereits zu Anfang des Problems kann dabei hilfreich sein.

Multikriterielle Entscheidungen beziehen sich auf Entscheidungssituationen mit mehreren Zielen, die häufig in einem Konfliktverhältnis zueinander stehen. Mehrfach-Ziele kommen in der Realität bei fast allen bekannten und zur Lösung anstehenden Problemen vor. Da ist zum Beispiel ein Autokäufer, der einen Wagen sucht, der einen gewissen Komfort garantiert, einen niedrigen Verbrauch vorweist, mit dem man auffallen kann, der eine aktuelle Formgebung zeigt, vor allem preiswert ist usw. Oder in der Materialwissenschaft wird ein Werkstoff gesucht, der eine gute Verarbeitbarkeit hat, eine hohe Warmfestigkeit aufweist, ein exzellentes Oxidationsverhalten zeigt usw. Diese Beispiele für multikriterielle Probleme können ohne weiteres um Fälle aus dem wirtschaftlichen und privaten Bereich ergänzt werden. Wird der Blick von den inhaltlichen Problemen auf den schematischen Vorgang gerichtet, so können folgende charakteristische Merkmale herausgearbeitet werden (Zimmermann/Gutsche 1991):

1. Mehrere Ziele (Vom Bearbeiter anzugeben)
2. Zielkonflikt (Zielwiderspruch; Verbesserung des einen Ziels führt auf Verschlechterung des anderen)
3. Unvergleichbare Einheiten (i.d.R. verschiedene Maßeinheiten)
4. Berechnung/Auswahl einer Lösung (Ergebnis ist die beste Handlungsalternative)

Die konkurrierenden Ziele veranlassen den sogenannten Entscheider, ein Kriterium für die Beurteilung der Alternativen zu suchen. Das bedeutet, daß er für jede Alternative die Vor- und Nachteile der verschiedenen benannten Ziele gegeneinander stellen und bewerten muß.

Die multikriterielle Bewertung sieht die Aufgabe darin, den Entscheider bei der Problemlösung zu unterstützen. Die Möglichkeiten der Unterstützung können von einer Beratung bei der Strukturierung und Definition des Problems, über eine Vereinfachung der Informationsverarbeitung bis hin zum Anbieten von Bewertungskriterien mitsamt einem Verfahren, das hieraus Handlungsvorschläge ableitet. Die Methoden der multikriteriellen Bewertung sollen dem Entscheider während der gesamten Analyse unterstützend helfen.

Der erste Schritt bei der multikriteriellen Bewertung von Materialien besteht in einer Grundsatzklärung über die Zielvorstellungen. Nach diesen Vorstellungen wird ein Zielkatalog aufgestellt, der versucht, die Anforderungen aller Parteien, die an neue Materialien gerichtet werden, so realitätsgetreu wie möglich darzustellen. Für eine überschaubare Form der Kriteriendarstellung sollte die hierarchische Auflistung gewählt werden.

Das Oberziel eines aufzustellenden Kriterienkatalogs der Materialien könnte lauten, ein optimales neues Material zu ermitteln/finden, das unter Berücksichtigung aller Kriterien die beste Bewertung erzielt. In der ersten Unterebene wird dieses Oberziel durch mehrere Ziele genauer charakterisiert. Neben den klassischen ökonomischen Zielen: Wirtschaftlichkeit, Operabilität, Sicherheit und Technologie, werden

auch ökologische (Umweltverträglichkeit) und Implementierungsziele (Programmatik) aufgestellt. Die beiden nächsten Ebenen sollten die Kriterien und Unterkriterien aufnehmen, die die aufgestellten Ziele näher beschreiben.

Ein Material ist nicht absolut zu bewerten, sondern wird abgestimmt auf den Einsatzzweck ausgewählt oder entwickelt. Das optimale neue Material steht in der Bewertungsaufgabe synonym für die Suche nach dem Material, das die beste Kompromißlösung darstellt in Bezug auf die vom System vorgegebenen Randbedingungen.

Die gestellte Aufgabe einer multikriteriellen Bewertung von neuen Materialien soll zunächst ohne konkreten Bezug zu den untersuchten Verkehrssystemen erfolgen. Das gewählte Vorgehen soll vorerst dazu dienen, grundsätzliche Erfahrungen im Umgang mit den Kriterien, der Datenbeschaffung sowie der Anwendung der multikriteriellen Methodik zu sammeln.

Wirtschaftlichkeit

Nicht nur die Entwicklungskosten von neuen Materialien sondern auch die weiteren absehbaren Lebenszykluskosten können zu einer Ausschlußgröße in einem Auswahlprozeß führen. Somit ist es wichtig, alle Kostenelemente vollständig zu erfassen, jedoch ist die Bereitstellung verlässlicher Kostendaten zu den jeweiligen Elementen problematisch, da die Prognose realistisch zu erwartender Kosten äußerst schwierig ist. Aus diesem Grund werden für dieses Ziel mehrheitlich Schätzungen auf den Kostenbasen bereits durchgeführter Materialentwicklungen herangezogen.

Kosten

Für den Kostenvergleich setzen sich die Kosten aus den *Entwicklungskosten*, den *Produktionskosten*, den *Betriebskosten* und den *Entsorgungskosten* zusammen. Alle Kostendaten werden in der Einheit DM oder Euro angegeben.

Produktivität

Die Produktivität bewertet das neue Material mit Blick auf das System. Zu dem Kriterium Produktivität sind derzeit noch keine geeigneten Unterkriterien ermittelt worden.

Einsatzzeitraum

Die erwartete durchschnittliche *Materiallebensdauer* ist charakterisierend für den Einsatzzeitraum eines neuen Materials. Sie wird in der Einheit Jahre angegeben.

Recyclingfähigkeit

Recyclingfähigkeit bezeichnet die Möglichkeit der mehrmaligen Verwendung eines Materials in technischen Produkten. Die Rückführung des Materials in den Produktionsablauf nach der Verwendung in einem Produkt kann dabei auf verschiedenen Ebenen geschehen. Wird das Material aus dem Produkt durch physikalische Umformungen unter Erhalt seiner chemischen Struktur zurückgewonnen, spricht man von Werkstoff-(Material-)Recycling. Im Gegensatz dazu werden beim Rohstoff-Recycling die Rohstoffe, aus denen das Material besteht, durch chemische Umwandlungen extrahiert. Beim Energie-Recycling wird lediglich der Energiegehalt des Materials in den Produktionsablauf zurückgeführt, z.B. durch Verbrennung, nicht aber seine materiellen Bestandteile (Kretschmer/Kohlhoff 1995, S.201).

Materialien können Recyclingfähigkeit demnach in verschiedenen Abstufungen besitzen. Der *Grad der Recyclingfähigkeit* ist dabei um so höher, je höher das Ordnungsniveau ist, auf dem das Recycling stattfinden kann. Er nimmt deshalb vom Material-Recycling zum Energie-Recycling hin ab.

Umweltverträglichkeit

Ausgehend vom anthropozentrischen Ansatz der Rechtfertigung von Umweltschutz beschreibt dieser Begriff das Ziel, die natürlichen Lebensgrundlagen der Menschheit dauerhaft zu sichern. Im Sinne des auf der Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro als verpflichtend anerkannten Leitbildes der

dauerhaft-umweltgerechten Entwicklung (Sachverständigenrat für Umweltfragen 1994) (Nachhaltige Entwicklung, sustainable development) bedeutet Umweltverträglichkeit die Befolgung der folgenden vier Grundregeln:

- (1) Die Abbaurate erneuerbarer Ressourcen soll ihre Regenerationsrate nicht überschreiten.
- (2) Nicht-erneuerbare Ressourcen sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktionell gleichwertiger Ersatz in Form erneuerbarer Ressourcen oder höherer Produktivität der erneuerbaren sowie der nicht-erneuerbaren Ressourcen geschaffen wird.
- (3) Stoffeinträge in die Umwelt sollen sich an der Belastbarkeit der Umweltmedien orientieren, wobei alle Funktionen zu berücksichtigen sind, nicht zuletzt auch die „stille“ und empfindlichere Regelfunktion
- (4) Das Zeitmaß anthropogener Einträge bzw. Eingriffe in die Umwelt muß im ausgewogenen Verhältnis zum Zeitmaß der für das Reaktionsvermögen der Umwelt relevanten natürlichen Prozesse stehen. (Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen Bundestages 1994, S.42-53)

Während die Grundregeln (1), (2) und (4) sich auf Materialmengen und deren Änderungsraten beziehen und daher rein quantitativer Natur sind, spielen im Hinblick auf Grundregel (3) auch qualitative Aspekte eines Materials eine Rolle, nämlich seine Toxizität bzw. Ökotoxizität, d.h. seine Giftigkeit für den Menschen bzw. für die Umwelt.

Bei der Betrachtung der Umweltverträglichkeit eines Materials müssen alle Phasen seines Lebenszyklus, von der Produktion über die Verwendung im Produkt bis zur Entsorgung (ggf. durch Recycling) betrachtet werden, um ein vollständiges Bild der hervorgerufenen Umweltbelastungen zu erhalten.

Dabei bietet es sich an, die Umweltbelastung durch Produktion und Entsorgung zu einem Kriterium zusammenzufassen, wenn man davon ausgeht, daß in diesen beiden Phasen die Umweltbelastung vor allem durch die Eigenschaften des Materials (z.B Herstellenergie, Recyklierbarkeit) bestimmt ist, während auf die Umweltbelastung durch

Infrastruktur und Betrieb des Produktes auch die Systemeigenschaften des Produktes (z.B. Wirkungsgrad des Motors, Rollwiderstand der Fahrbahn) und die durch den Anwender bestimmten Betriebsparameter (z.B. Benutzungsdauer, Fahrweise) einen großen Einfluß haben.

Operabilität

Lieferverzögerungen, technische Schwierigkeiten bei der Herstellung oder Bereitstellung größerer Mengen des neuen Materials führen zu Verschiebungen im Produktionsprozeß, was gewöhnlich mit zusätzlichen Kosten verbunden ist. Die beiden Kriterien *Flexibilität* und *Verfügbarkeit* beschreiben somit die Aspekte eines reibungslosen operationellen Ablaufs in Zusammenhang mit dem beabsichtigten Einsatz der neuen Materialien in verschiedenen Systemen.

Flexibilität

Zur Bewertung der Flexibilität wird das absehbare *Einsatzspektrum* eines neuen Materials betrachtet. Es beschreibt die Verwendungsmöglichkeiten des Materials für verschiedene Einsatzbereiche. Spezielle, maßgeschneiderte neue Materialien werden dabei einen nur geringen Flexibilitätsgrad aufweisen.

Verfügbarkeit

Um die Verfügbarkeit eines neuen Materials zu bewerten, werden die Eigenschaften untersucht, die zu Verzögerungen führen können. Dazu zählen die *Herstelldauer*, die in Minuten, Stunden oder Tagen angegeben wird und die *Menge*, die hergestellt werden kann, was wiederum wichtig ist für die Planung von Produktionsabläufen.

Sicherheit / Zuverlässigkeit

Sicherheit bezeichnet die Abwesenheit von Gefahren für Leib und Leben. Sicherheit ist gegeben, wenn die Möglichkeit der Entstehung eines Schadens für den Menschen durch den Betrieb eines technischen Systems ausgeschlossen ist. Absolute Sicherheit ist nicht möglich (VDI 1991, S.9). Ein Material trägt zur Sicherheit eines technischen Systems durch seine Zuverlässigkeit bei, d.h. dadurch, daß

seine Eigenschaften sich nicht unkontrolliert ändern. Unerwünschte Änderungen der Eigenschaften eines Materials, verursacht z.B. durch seine technische Beanspruchung oder durch Umwelteinflüsse, können zu *Qualitätsschwankungen* im Normalbetrieb eines technischen Systems führen. Darüberhinaus kann es im Extremfall durch Versagen des Materials zu Unfällen mit schwerwiegenden Folgen kommen, was durch das Unterkriterium der *Versagenswahrscheinlichkeit* erfaßt wird.

Technologie

Die Basis für die Entwicklung/Einsatz eines neuen Materials stellen zum Zeitpunkt des Projektbeginns die verfügbaren Grundideen/Techniken dar. Um eine Annäherung von Technikstand und Systemerfordernissen zu erreichen, sind in der Regel im Vorfeld vorbereitende Technologieprogramme / Grundlagenforschungen nötig.

Entwicklungserfordernisse

Mit dem Kriterium Entwicklungserfordernisse sollen neue Materialien beurteilt werden, die bereits in der Entwicklung sind oder von denen erste Grundlagen bekannt sind. Bei den *Materialentwicklungserfordernissen* wird festgestellt, welche Eigenschaftsverbesserungen gegenüber dem aktuell erreichten technischen Stand notwendig sind. Die *Systementwicklungserfordernisse* gehen über das reine Material hinaus, und für die Bewertung soll betrachtet werden, wie sich das System bei Einsatz eines neuen Materials durch gleichzeitig stattfindende Entwicklungen verbessern läßt.

Technikreife

Das Kriterium Technikreife beschreibt den erreichten Reifegrad, d.h. den aktuellen Stand der Entwicklung, eines neuen Materials. Es kann mit dem ermittelten Ergebnis zum einen kontrolliert werden, ob zuvor gesetzte Meilensteine erreicht wurden. Zum anderen kann abgeschätzt werden, wie die Entwicklung weiterhin erfolgen sollte, um zum Beispiel Entwicklungskosten zu senken oder Materialeigenschaften zu verbessern.

Komplexität

Der komplexe Materialaufbau, wie bei Verbundmaterialien, kann fehleranfällig sein. Die Komplexität ist damit ein Kriterium, das in der Bewertung berücksichtigt werden muß. Unter *Gesamtkomplexität* fallen Angaben über die Wechselwirkung mit anderen Materialtypen, struktureller Materialaufbau, Materialeigenschaften etc.

Technikniveau

Im Gegensatz zum Kriterium Technikreife wird mit der Bewertung des Technikniveau versucht, den allgemeinen *Stand der Technik* unabhängig von der eingeschlagenen Entwicklungsrichtung absolut zu beschreiben.

Designigenschaften

Mit diesem Kriterium wird die Eignung eines Materials (oder einer Materialklasse) zur Anpassung seiner Eigenschaften an einen bestimmten Anwendungszweck erfaßt. Gute Designeigenschaften sind dann gegeben, wenn sich eine solche Anpassungsfähigkeit durch die *Verwendung vorhandener Materialien* oder durch eine *Modularität* des Materialaufbaus (im Falle von Verbundmaterialien) erreichen läßt.

Nebeneffekte

Unter diesem Ziel sind die positiven Nebeneffekte einer technischen Entwicklung gruppiert. Das *Spin-Off-Potential* gibt den Nutzen wieder, den die Entwicklung von neuen Materialien auf Bereiche neben der Materialwissenschaft haben kann. Mit dem *Synergiepotential* wird das Zusammenwirken mit weiteren naturwissenschaftlichen Disziplinen charakterisiert, die das Ziel gleichermaßen verfolgen. Die Forderung der Entwicklung eines neuen Materials mit fast identischen Eigenschaften könnte unabhängig voneinander in der Luftfahrttechnik und dem Automobilbau gestellt werden.

Programmatik

Mit dem Begriff der Programmatik ist die Frage angesprochen, inwieweit sich die Entwicklung und Verwendung eines Materials im Einklang mit politischen Rahmenbedingungen sowie mit dem wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Umfeld befindet.

Autonomie

Im Hinblick auf die forschungs- und wissenschaftspolitischen Rahmenbedingungen bezieht sich das Kriterium der Autonomie darauf, ob das für die Materialentwicklung und -verwendung notwendige technische Können und wissenschaftliche Wissen im eigenen Lande vorhanden ist. Dabei geht es zum einen um *wissenschaftlich-technische Unabhängigkeit* an sich, zum anderen um die wirtschaftliche Sicherung des *Hochtechnologiestandortes*.

Akzeptanz

Hinsichtlich des wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Umfeldes wird mit dem Kriterium der Akzeptanz die Zustimmung zu dem jeweiligen Material oder seiner Verwendung in einem technischen Produkt erfaßt. Dabei ist die Akzeptanz für verschiedene Personen bzw. gesellschaftliche Gruppen oder Teilsysteme (*Nutzer, Industrie, Politik, Öffentlichkeit*) getrennt zu betrachten, weil mit deren jeweils unterschiedlichem Verhältnis zu dem Produkt auch unterschiedliche Sichtweisen verbunden sein können.

3 Bedeutung neuer Materialien in Technik und Gesellschaft

Bereitstellung und Variation von Materialien sind wesentliche Elemente der wissenschaftlich-technischen Entwicklung. Sie sind für sich selbst dynamische und innovative Bereiche, die darüber hinaus den technischen Entwicklungsprozeß in anderen innovativen Entwicklungsfeldern (Informationstechnik, Umwelttechnik, Energietechnik, Verkehrstechnik u.a.) mitbestimmen. Historisch läßt sich zeigen, daß in vielen Fällen die Verfügbarkeit von Materialien mit neuen oder gravierend verbesserten Eigenschaften und entsprechenden Fertigungsverfahren Innovationsschübe mit weitreichenden Folgen für Technik, Wirtschaft und Kultur erst ermöglicht haben. Die Klassifizierung vor- und frühgeschichtlicher Zeitepochen richtet sich dementsprechend zum Teil nach den vorwiegend verwendeten Materialien (Stein-, Bronze- und Eisenzeit). In Bezug auf durch neue Materialien ermöglichte Innovationsschübe in neuerer Zeit denke man z.B. an

- die Bedeutung von Stahl, einerseits in der industriellen Revolution, andererseits in der Folge neuer Verfahren der Wärmebehandlung (Härten, Vergüten),
- die Aushärtung von Aluminiumlegierungen als Voraussetzung für den Metall-Flugzeugbau,
- den Siegeszug der Kunststoffe in vielfältigen Anwendungsbereichen in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts oder
- die auf avancierten Halbleitermaterialien beruhende Entwicklung von Chip-Bausteinen seit den siebziger Jahren.

Entwicklung und Weiterentwicklung von Materialien haben mittelbar und unmittelbar Auswirkungen auf das Innovationspotential der deutschen und der europäischen Wirtschaft und sind von großer Bedeutung für Umweltfragen. Im folgenden wird zunächst die Bedeutung von Materialien für Wissenschaft und Technik mit ihrer faktischen Wahrnehmung in Öffentlichkeit und Politik verglichen, um danach

auf die tatsächliche Bedeutung der Materialien in den Bereichen Wirtschaft, Umwelt und Lebenswelt näher einzugehen. Daraufhin werden einige Beispiele vorgestellt, in welcher Weise die Materialentwicklung einen wesentlichen Baustein für Leitbilder und Leitkonzepte zukünftiger Technikentwicklung darstellen kann: innovative Materialentwicklung als Nukleus wissenschaftlicher Bemühungen um technische Lösungen gegenwärtiger Probleme, vorwiegend im Verkehrsbereich.

3.1 Zur Wahrnehmung der Bedeutung neuer Materialien

Innovationsschübe werden in modernen Technikentwicklungen vor allem durch Systemwechsel oder Wechsel in Produktgenerationen wahrgenommen (Beispiel: von der Schallplatte zur CD). Technischer Fortschritt wird wahrgenommen als Ersatz bisheriger technischer Angebote durch neue. Daß dabei oft an wesentlichen Stellen der Entwicklung und Herstellung neue Materialien oder Fertigungsverfahren, Oberflächenbeschichtungen o.ä. eingehen, ohne die die entsprechende Systemlösung bzw. das vom Benutzer wahrgenommene Produkt nicht möglich gewesen wäre, ist in der Regel weder dem Benutzer noch der Öffentlichkeit bekannt.

Auch in volkswirtschaftlicher Hinsicht tritt der Werkstoff hinter das System zurück, in dem er eingesetzt wird: die Wertschöpfung, die mit der Entwicklung von Materialien verbunden ist, ist relativ gering im Vergleich zur Wertschöpfung durch innovative Systemlösungen (s.u.).

These: neue Materialien weisen geringe Sichtbarkeit im Endprodukt und in der Wirtschaftsbilanz auf.

Beispiele:

- Thermoplastische Elastomere in der Medizin (dazu auch Kap. 3.4)
- Wartungsfreie (nicht mehr schmierpflichtige Lager)
- Selbstverdunkelnde Scheiben (Brillen, Autofenster)

Die mangelnde Sichtbarkeit neuer Materialien kann beispielhaft auch prospektiv deutlich gemacht werden. So wurde Nitrid (C_3N_4) als

superhartes Material – härter als Diamant, mit hohem spezifischen elektrischen Widerstand, hoher Wärmeleitfähigkeit, sowie thermischer Stabilität – theoretisch vorausgesagt. In Bezug auf Einsatzmöglichkeiten ist eine Vielzahl von Anwendungen denkbar. Ein Schwerpunkt der Eigenschaftsnutzung wird aufgrund der hohen Härte, Temperaturbeständigkeit sowie Verschleißfestigkeit in der Beschichtung von Werkzeugen und verschleißbeanspruchten Bauteilen als Weiterentwicklung der bisherigen Hartstoffschichten gesehen.

Diese Weiterentwicklung ist auch auf Anwendungen bei der spanenden und spanlosen Bearbeitung in der Fertigungstechnik übertragbar. Die zu erwartende Wärmeleitung und die elektrischen Eigenschaften lassen Verbesserungen in der Hochleistungselektronik gegenüber den gegenwärtig in der Forschung bearbeiteten Diamantschichten erwarten. Auf dem Gebiet der Optik ist ggf. die Kratzfestigkeit und Transparenz von Vergütungsschichten nutzbar. In der Medizin sind Anwendungen durch die Kombination der charakteristischen mechanischen Eigenschaften des C_3N_4 mit der biologischen Verträglichkeit denkbar.

Es eröffnen sich also perspektivisch eine Vielzahl möglicher Anwendungen. In jeder dieser Anwendungsmöglichkeiten ist jedoch das Material selbst nur *ein Bestandteil unter vielen anderen*; seine die Innovation ermöglichende Bedeutung wird dann wohl oftmals nicht entsprechende Würdigung finden.

Das strategische Problem besteht darin, daß in einer Mediengesellschaft die mangelnde öffentliche Wahrnehmung zu Akzeptanzproblemen oder zu Gewichtsverschiebungen in der Forschungsförderung führen kann, die sich auf längere Sicht als nachteilig herausstellen.

3.2 Ökonomische Bedeutung

Die ökonomische Bedeutung der Entwicklung und des Einsatzes neuer Materialien läßt sich einerseits volkswirtschaftlich und im Maßstab der Weltwirtschaft untersuchen, andererseits gibt es wirtschafts-

politische Auswirkungen auf die Rohstoffmärkte.

3.2.1 Volkswirtschaftliche Bedeutung

Materialentwicklung ist das erste Glied in einer Wertschöpfungskette, die vom Material über die Entwicklung und Fertigung von Bauteilen bis hin zu Konstruktion kompletter Systeme reicht (Wissenschaftsrat 1996, S. 39ff.). Mit der Entwicklung neuer Materialien selbst ist oftmals nur eine geringe Wertschöpfung verbunden (vgl. das Beispiel der Gasturbinenschaufel, Wissenschaftsrat 1996, S. 39). In volkswirtschaftlicher Hinsicht, in der die gesamte Wertschöpfungskette betrachtet werden muß, verbirgt sich die ökonomische Bedeutung neuer Materialien hinter dem durch ihre Entwicklung ermöglichten Produkt oder System. Letztere bilden die volkswirtschaftlich entscheidende Stufe der Wertschöpfung.

Die isolierte Betrachtung des Wertschöpfungsanteils an einem bestimmten Produkt oder System greift jedoch zu kurz. Denn da innovative Lösungen in Material- oder Fertigungsfragen in unterschiedlichen Technikfeldern und Branchen Anwendung finden können, manifestiert sich die ökonomische Bedeutung von neuen Materialien auch in eher indirekter Weise durch ihren Querschnittscharakter. In beiderlei Hinsicht wird in den nächsten Jahren ein starkes Wachstum erwartet (Wissenschaftsrat 1996, S. 41).

3.2.2 Wirtschaftspolitische Bedeutung

Neue Materialien führen zur (teilweisen) Substitution klassischer Materialien. Damit hat der Einsatz neuer Materialien Bedeutung für die internationale Arbeitsteilung im Hinblick auf Rohstofflieferung und Weiterverarbeitung.

Folgenden Thesen wird nachgegangen:

- eventuelle Reduzierung der Abhängigkeit von Rohstofflieferungen aus politischen Problemzonen (Socher/Rieken 1994, S. 3-5),
- wirtschaftliche Folgen für die klassischen rohstoffliefernden Entwicklungsländer (z.B. Kupferproduzenten),
- wachsende wirtschaftspolitische Bedeutung der Energieströme gegenüber den Stoffströmen,
- Trends weg von Förderung, Transport und Bearbeitung großer Materialmengen, hin zu intelligenteren Fertigungsverfahren.

3.3 Bedeutung für Umweltfragen

Probleme von Folgen der Entwicklung und des Einsatzes von Technik für die natürliche Umwelt sind ein Hauptthema der Technikfolgenbeurteilung. Innovative Materialentwicklung kann unter ökologischen Aspekten betrachtet werden. Da auf dem Gebiet der ökologischen Aspekte der Materialforschung viele Fragen ungeklärt sind und ein hoher Forschungsbedarf besteht (Wissenschaftsrat 1996, S. 46), soll im folgenden durch einige Beispiele streiflichtartig die ökologische Bedeutung von Erforschung und Entwicklung neuer Materialien verdeutlicht werden.

Die Schärfung des Bewußtseins für ökologische Aspekte, von der Begrenztheit der Ressourcen bis hin zu möglichen globalen Umweltschäden, legen es, insbesondere unter dem Aspekt der Verantwortung für zukünftige Generationen (Gethmann 1993) nahe, fertigungstechnische Prozesse auch unter ökologischen Gesichtspunkten zu optimieren (sustainable development). Wesentliches Stichwort in diesem Kontext ist die Ressourcenschonung im Hinblick auf Energie und Stoffe. Erforschung und Entwicklung neuer Materialien können dazu Beiträge unter mehreren Aspekten leisten. Zwei der wesentlichen Aspekte sind:

- (1) die Substitution ökologisch bedenklicher Materialien und Verfahren,
- (2) die Förderung der Rezyklierbarkeit von Stoffen.

Beispiel zu (1): Substitution von Kühlschmierstoffen

In konventionellen formgebenden Fertigungsprozessen, wie Zerspännen und Umformen, fallen Kühlschmierstoffe, wie z.B. Emulsionen und Lösungen an. Zur Zeit sind dies jährlich in Deutschland etwa 600,000 t (VDI Nachrichten 1997). Sie führen zum einen bei der Entsorgung zu Belastungen von Boden und Luft, zum anderen entsteht am Arbeitsplatz eine erhebliche Gesundheitsbelastung (Kanzerogenität). Beide Folgen führt neben der ökologischen Bedenklichkeit zu höheren Kosten in Betriebs- und Volkswirtschaft.

Aufgrund von Auflagen und Gesetzen haben sich die Kosten für die Entsorgung der Kühlschmierstoffe von 1987 bis 1993 verdoppelt mit weiterhin steigender Tendenz. Bei einzelnen Bauteilen betragen die Kühlschmierstoffkosten bereits bis zu 20% der Bauteilkosten. Industrie und Wissenschaft versuchen daher, kühlenschmierstoffreiche Prozesse durch kühlenschmierstoffarme, idealerweise „trockene“ Prozesse zu ersetzen. Werkzeugwerkstoffe für die Trockenbearbeitung müssen über geringe Adhäsionsneigung zum Werkstückwerkstoff und über hohe Warm- und Verschleißfestigkeit verfügen. Bisher haben sich besonders beschichtete Werkzeuge bewährt. Für die Feinstbearbeitung weisen beschichtete Werkzeuge jedoch oft zu starke Verrundungen an den Schneiden auf, so daß bei Schneidwerkzeugen auf die parallele Entwicklung neuer geeigneter bulk-Materialien nicht verzichtet werden kann. Hier stehen z. Zt. feinkörnige Keramiken im Mittelpunkt. Zum anderen kann durch ein besseres Verständnis der Abtragmechanismen, z.B. beim Bearbeiten von Hochleistungskeramik, der Einsatz von Kühlschmierstoffen optimiert werden. In weiten Bereichen des Ersetzens von kühlenschmierstoffintensiven Prozessen durch andere Bearbeitungsprozesse ist noch erheblicher F&E-Aufwand notwendig. Dies betrifft insbesondere thermische Probleme, die der Substitution Grenzen setzen.

Beispiel zu (1): Biologisch abbaubare Kunststoffe

In Deutschland werden jährlich etwa 10 Mio. t Kunststoffe produziert, welche bislang vor allem im Hinblick auf ihre Langzeitstabilität

gegenüber umwelt- und technikspezifischen Einflüssen hergestellt werden (Rafler 1995). Oft ist diese Langzeiteigenschaft jedoch nicht für den Zweck der Verwendung erforderlich, dies gilt z.B. im Bereich der Plastiktüten, der Einwegverpackungen und der Einweggeräte, z.B. im klinischen Bereich. Um Entsorgungsprobleme zu entschärfen und um Stoffkreisläufe zu schließen, wird daher u.a. versucht, biologisch abbaubare Kunststoffe zu entwickeln. Das Substitutionspotential wird mittelfristig auf etwa 5% aller Kunststoffe eingeschätzt (Kalbe/Koch 1995).

Als Ausgangsmaterial für biologisch abbaubare Kunststoffe kommen sowohl fossile organische wie auch nachwachsende Rohstoffe in Betracht. Im letzteren Fall könnte der Stoffkreislauf über den Anbau nachwachsender Rohstoffe, deren technischer Bearbeitung, ihre Kompostierung nach Erfüllung ihres Zwecks und anschließender Aufbringung als Dünger auf Ackerflächen erreichen. Ausgangsstoffe für biologisch abbaubare Kunststoffe auf der Basis nachwachsender Rohstoffe sind vor allem Cellulose (Kalbe und Koch 1995) und Stärke (Rafler 1995).

(2) Rezyklierung

Oftmals ist es nicht der Werkstoff an sich, der geeignet oder ungeeignet ist für eine Kreislaufführung, sondern Entwicklung, Konstruktion, Herstellung, Nutzung, Wartung und Verwertung eines Produktes oder eines Systems bestimmen die Fähigkeit, Ressourcen möglichst lange und intensiv zu nutzen. Produkt- und Materialentwicklung bzw. -auswahl müssen daher unter dem Blickwinkel der Kreislauffähigkeit optimal aufeinander abgestimmt und für den Herstellungsprozeß vorbereitet sein. Dabei ist es notwendig, Maßnahmen zur Lebensdauerverlängerung und mögliche Verwertungswege von Anfang an in die Einsatzgebiete, Auslegung, Bearbeitungstechniken, Qualitätssicherung und Verwertung neuer Werkstoffe und daraus hergestellter Produkte einzubeziehen. Die Anwendung neuer Materialien vor dem Hintergrund kreislaufwirtschaftlicher Zielsetzungen ist durch einen hohen F&E-Bedarf geprägt (vgl. Kap. 5.4).

3.4 Bedeutung in der Lebenswelt

Neue Materialien führen oftmals zur Ermöglichung von technischen Innovationen, die sich bis in die Lebenswelt und den Alltag der Bevölkerung hinein auswirken und dort teilweise erhebliche kulturverändernde Folgen haben. Deutlich wird dies beispielsweise im Versuch, sich Produkte aus Kunststoffen aus der modernen Küche oder auch aus dem Bereich der Kinderspielzeuge wegzudenken. Angesichts der Tatsache, daß der Siegeszug der Kunststoffe erst vor etwa 40 Jahren begann, wird deutlich, in welchem Umfang der Einsatz neuer Materialien für die Kultur einer Gesellschaft von erheblicher Bedeutung ist.

In jüngster Zeit sind vor allem folgende Beispiele des Einsatzes neuer Materialien mit Folgen bis hinein in den lebensweltlichen Bereich zu nennen:

- Verpackungsmaterialien jeglicher Art mit den Folgen für Transportmöglichkeiten von Gütern, Haltbarkeit, aber auch mit der Entsorgungsproblematik,
- CD-Technik, die durch das Speichermedium Polycarbonat ermöglicht wurde und sich in kurzer Zeit gegen die Schallplatte durchgesetzt hat, obwohl dafür ein Systemwechsel erforderlich war,
- Glasfaserkabel, durch die Innovationen in Richtung Informationsgesellschaft unter Substitution klassischer Datenübertragungsmedien (vor allem Kupfer) ermöglicht werden,
- Einweggerätschaften im Krankenhaus mit der Ermöglichung eines Höchstmaßes an Hygiene,
- oberflächenbehandelte oder beschichtete Gläser (Gebäude- oder PKW-Verglasung, entspiegelte Brillengläser),
- im Automobil die Entwicklung von Hochleistungsreifen und Katalysator,
- Sportgeräte-Entwicklung (z.B. Ski),
- Textilien (Gore-Tex etc.).

In besonderer Weise soll auf Entwicklungen in der Medizin eingegangen werden, in der die Bedeutung des Materials und sein Nutzen evident werden, wiewohl gerade dort die Bedeutung der Materialien von der Öffentlichkeit kaum gesehen und der Verdienst an den Neuerungen statt dessen vor allem den Medizinern angerechnet wird.

Resorbierbare Polyester

Zu resorbierbaren Polyestern gehören Derivate der Milchsäure (Lactide) oder der Glycolsäure (Glycolide), die entweder als Monomer oder in verschiedenen Polymer- und Copolymer-Varianten bekannt und herstellbar sind. Formkörper aus diesen Materialien bilden thermoplastische Kunststoffe, deren mechanische Eigenschaften ähnlich denen anderer Kunststoffe sind. Ihre Besonderheit besteht darin, daß sie unter physiologischen Bedingungen innerhalb von Wochen, Monaten oder Jahren – dies ist je nach Polymer verschieden – hydrolytisch zu Glycol- bzw. Milchsäure abgebaut werden. Im Zusammenhang mit der Eigenschaft, daß sowohl die Polymere selbst wie auch die Abbauprodukte nichttoxisch sind und vom Organismus gut vertragen bzw. ausgeschieden werden, liegen Anwendungen in der Medizin nahe.

Etabliert sind glycolid-derivatige Polymere als Nahtmaterial in der Chirurgie (Chu 1983). Ihre Resorption im Körper nach Erfüllung ihrer Funktion als Hilfe beim Wundverschluß erfolgen ohne Auftreten negativer Gewebereaktionen. Gegenwärtig werden auch Wundklammern, Netze und Bänder aus resorbierbaren Polyestern eingesetzt.

Ein anderes Anwendungsgebiet liegt in der operativen Behandlung von Knochenbrüchen (Barrows 1986). Bislang werden vor allem Metallteile (Platten, Schrauben, Draht) zur mechanischen Stabilisierung verwendet, welche nach erfolgtem Heilungsprozeß operativ entfernt werden müssen. Ihr Ersatz durch resorbierbare Polyester, der die Zweitoperation überflüssig macht, ist möglich, weil sowohl die mechanischen Eigenschaften wie auch die Abbaurate durch Wahl der Art und der Zusammensetzung des Polyesters bestimmt werden können.

Die zentrale Eigenschaft, im Organismus innerhalb bestimmter Zeiten abgebaut zu werden, macht resorbierbare Polyester darüber hinaus als Arzneimittelträger mit verzögerter Wirkstofffreigabe interessant. Dazu wird der Wirkstoff entweder im Polyester mikroverkapselt oder in die Polymermatrix eingebettet.

3.5 Leitbilder zukünftiger Technikentwicklungen

Leitbilder technischer Zukunftsentwicklungen stellen gesellschaftlich weitgehend im Konsens akzeptierte Paradigmen dar, die eine Vielzahl von partikularen Bemühungen unter einem entsprechenden Oberziel integrieren können. Sie beschreiben gesellschaftliche Zielattribute für bestimmte Bereiche der Technik oder Querschnittstechniken, ohne jedoch bereits die Realisierung im Detail festzulegen. Ein Leitbild innovativer Techniken im Umkreis des Begriffs „Informationsgesellschaft“ besteht, als Beispiel, darin, daß jedermann zu jeder Zeit Zugriff auf alle an einem beliebigen Punkt der Erde frei verfügbaren Informationen haben solle.

Der technischen Realisierung und Umsetzung näher kann der Begriff des *Leitkonzepts* eingeführt werden. Damit sei ein technisches Ziel gemeint, das in sich eine Reihe verschiedener Herausforderungen vereinigt, die wiederum als separate technische Entwicklungen in verschiedenen Produkten Verwendung finden können. Als Beispiele: das Raumtransportsystem SÄNGER (Paschen et.al. 1992) stellte ein Leitkonzept für die Entwicklung von Hyperschalltechnologien dar, sowie gegenwärtig das „Dreiliter-Auto“ als ein Leitkonzept für die zukünftige Entwicklung im Automobilbau gehandelt wird.

Damit fungieren Leitbilder als Medien der Kristallisation gesellschaftlicher Anstrengungen und gebündelter Maßnahmen zu ihrer Erreichung („Visionen“, Weyer 1994) und sind daher gerade in der Forschungsförderung von besonderer Bedeutung. Durch den Entwurf von Leitkonzepten können sie präzisiert werden, ohne daß bereits direkt von technischen Endprodukten geredet wird.

Im folgenden seien die Leitbilder „CO₂-arme Wirtschaftsweise“ und „Umweltverträgliche Mobilität“ anhand einiger Beispiele für den Materialsektor untersucht.

Leitbild: CO₂-arme Wirtschaftsweise

Leitkonzept: CO₂-armes Kraftwerk

Die Bundesrepublik Deutschland strebt das Ziel an, bis zum Jahre 2005 die CO₂-Emission um 25 – 30 % gegenüber der des Jahres 1987 zu verringern. Die deutliche Steigerung des thermischen Wirkungsgrades der kohlebefeuerten Dampfkraftwerke durch höhere Dampfparameter und durch den Einsatz von weiterentwickelten Gas-/Dampfturbinenkraftwerken ist ein zweckdienliches Mittel, um den CO₂-Ausstoß bei der Stromerzeugung deutlich zu verringern und dabei gleichzeitig die globalen Energieressourcen zu schonen.

Eine Schlüsselrolle bei der Weiterentwicklung der Kraftwerkstechnologie nehmen die Werkstoffe der hochbeanspruchten Bauteile ein, da die Zielsetzungen (Erhöhung der Arbeitstemperatur) im wesentlichen nur durch Werkstoffe mit höherer Warmfestigkeit sowie Oxidations- bzw. Korrosionsbeständigkeit zu erzielen sind.

Durch Anhebung der Dampftemperatur auf max. 650° C (bisher 540 °C) bei gleichzeitiger Steigerung des Dampfdruckes auf 300 bar (bisher 180 bar) mit zweifacher Zwischenüberhitzung liegt das erreichbare Potential bei der Wärmeverbrauchsminderung für Dampfkraftwerke bei max. 10% gegenüber dem derzeitigen Standardkraftwerk mit Gesamtwirkungsgrad bei ca. 38 – 39%. Eine weitere Verbesserung des thermischen Wirkungsgrades von „Hochtemperatur“-Dampfkraftwerken auf ca. 55% mit Dampfparametern von ca. 700 °C und 360 bar ist vorstellbar, wenn die existierenden hochwarmfesten Nickelbasislegierungen für die Herstellung und den spezifischen Betrieb von Dampfkesseln und Dampfturbinen modifiziert und weiterentwickelt werden können.

Bei Gasturbinen werden Wirkungsgradverbesserungen erreicht durch die Erhöhung der oberen Kreisprozeßtemperatur und die Verbesserung der Aerodynamik von Verdichter und Turbine. Der Verbrennungstemperatur sind aufgrund der Zunahme des Stickstoffausstoßes Grenzen gesetzt. Die Anhebung der oberen Kreisprozeßtemperatur ohne Anhebung der Verbrennungstemperatur, d. h. der möglichst sparsame Umgang mit Kühlluft, wird daher zukünftig zu einer wesentlichen Aufgabe auch für die Werkstofftechnik.

Hohe thermomechanische Beanspruchung, hohe mittlere Materialtemperaturen, Realisierung fortschrittlicher Kühltechnologie, Aufbringung von Wärmedämmschichten bei gleichzeitig aerodynamisch anspruchsvollen Profilen sind die Folge-Anforderungen für die Gasturbinenbeschaufelung. Diesen Herausforderungen wird durch die Übertragung von Triebwerkstechnologie aus der Flugturbine auf große Gasturbinen zur Stromerzeugung begegnet. Die Skalierung führt dabei zu Komponenten mit Material- und Lebensdaueranforderungen jenseits des bisher Machbaren.

Leitbild: Umweltverträgliche Sicherung der Mobilität

Leitkonzept: Leichtbau

Als Faustregel für den PKW gilt: Bei Reduktion des Fahrzeuggewichtes um 100 kg spart man etwa 0,6 l Kraftstoff/100 km. Um hierfür die Voraussetzungen zu schaffen, d.h., Werkstoffe mit niedrigerem spezifischen Gewicht zu entwickeln, ist die Verbesserung der statischen, spezifischen Festigkeit, z. B. bei Aluminium- und Magnesiumlegierungen und die Verbesserung der Bruchzähigkeit, z.B. bei pulvermetallurgischen Werkstoffen und Keramiken, erforderlich. Hinzu kommen komplexere Anforderungsprofile mit einer Vielzahl von zum Teil konkurrierenden Effekten, z.B. der Schutz gegen Oxidation und Korrosion, die Festigkeit bei mechanisch und thermisch wechselnder Belastung, der mechanisch-chemische Verschleiß, die Geräuschdämpfung, ferner alle Fertigungstechniken (ur- und umformen, trennen, fügen, beschichten).

Leichtbau stellt auch eine wesentliche Herausforderung an Weiterentwicklungen im Flugzeug- und Schienenfahrzeugbau dar. Materialspezifische Herausforderungen und Möglichkeiten sind daher wesentliches Thema der vorliegenden Studie (vgl. Kap. 5.2, 5.3). Dabei bildet das Leitkonzept „Leichtbau“ keinen Selbstzweck, sondern muß mit anderen Faktoren der Technikentwicklung abgewogen werden.

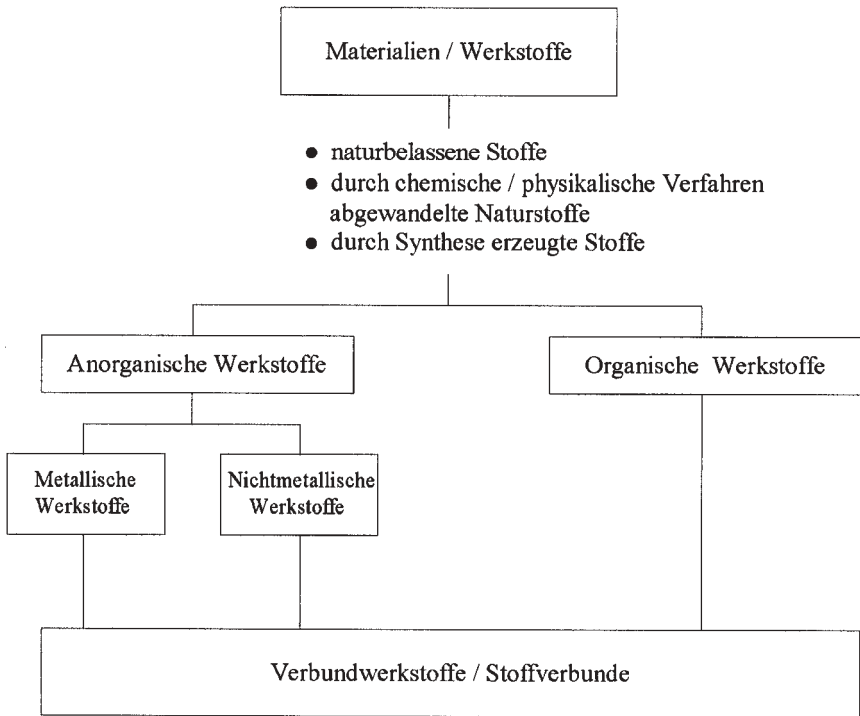
4 Materialien

4.1 Klassifizierung

Die traditionelle Klassifizierung der Materialien für die Technik orientiert sich an den Metallen, die aufgrund ihrer besonderen Eigenschaftskombinationen, ihrer Verarbeitbarkeit und auch ihrer Verfügbarkeit eine überragende Stellung einnehmen. Der Gruppe der für die Technik relevanten metallischen Werkstoffe stehen dabei die nicht-metallischen Werkstoffe in ihrer Vielfalt als sehr uneinheitliche Gruppe gegenüber, deren Bedeutung für Technik und Gesellschaft durch die Negation in der Gruppenbezeichnung nicht angemessen gewürdigt wird. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist die elektrische Leitfähigkeit, die um mehrere Größenordnungen differiert und die ihre Ursache in der Ausprägung unterschiedlicher atomarer Bindungsmechanismen hat.

Moderne Strukturkenntnisse lassen erkennen, daß die Sinnfälligkeit der Unterteilung in natürliche und künstliche oder synthetische Materialien nicht unbedingt weiterhin gegeben ist. Die technisch verwendeten Materialien haben nämlich sowohl strukturell wie auch verarbeitungstechnisch unterschiedliche Naturnähe. Zusatzstoffe zur Eigenschaftsvariation können den Charakter eines sogenannten Naturstoffes u. U. stärker bestimmen als sein Ursprung. Andererseits entsteht z.B. ein unlegierter Stahl im wesentlichen durch Reduktion eines Oxids und Zugabe einiger zehntel Prozente Kohlenstoff.

Die in Abb. 4-1 wiedergegebene Übersicht versucht, diese Gedanken zur Grundeinteilung so umzusetzen, daß derzeitigen Erkenntnissen und zukünftig notwendigen Klassifizierungen Rechnung getragen wird. Die übliche Unterteilung in Struktur- und Funktionswerkstoffe soll in diesem Zusammenhang nur kurz gestreift werden, da viele Werkstoffe beiden Gruppen zuzuordnen sind bzw. infolge struktureller Variationsmöglichkeit der eine oder der andere Charakter im Vordergrund steht.



- naturbelassene Stoffe
- durch chemische / physikalische Verfahren abgewandelte Naturstoffe
- durch Synthese erzeugte Stoffe

Basis

- Polymermatrix
- Keramikmatrix
- Metallmatrix

Struktur

- Teilchenverbund
- Faserverbund
- Schichtverbund
- Durchdringungsverbund
- gradiert
- porös

Abb. 4-1: Einteilung der technischen Materialien

Sollen Materialien als Strukturwerkstoffe eingesetzt werden, so müssen sie vornehmlich Anforderungen an ihre mechanischen Eigenschaften erfüllen, die z. B. durch Festigkeitswerte, Steifigkeitswerte, den Verschleißwiderstand oder den Widerstand gegen Rißausbreitung in einem weiten Parameterfeld äußerer Bedingungen gekennzeichnet werden.

Der Einsatz von Materialien als Funktionswerkstoffe ist zuerst an deren elektrische, magnetische, optische, akustische und auch biolo-

gische Eigenschaften gebunden. Im Vordergrund stehen dabei die Informations- und Kommunikationstechnik, die Energie- und Verkehrstechnik, aber auch bereits die Medizintechnik. Die Funktionswerkstoffe werden zukünftig für diese und weitere Technikbereiche eine Schlüsselstellung einnehmen. Betroffen sind davon alle Materialgruppen, die metallischen Werkstoffe, die nichtmetallisch-anorganischen Werkstoffe mit den Halbleitern sowie die organischen Werkstoffe.

Die in Abb. 4-1 gegebene Übersicht geht davon aus, daß die in der Technik verwendeten Materialien durch Wandlungen der Strukturen ihrer Rohstoffe mit unterschiedlichen Eingriffstiefen erzeugt werden. Die technisch erwünschten strukturellen Änderungen laufen unter gezieltem Energie- und Stoffaustausch ab. Damit soll aufgezeigt werden, daß fortschrittliche Materialbetrachtungen in Kenntnis struktureller Gegebenheiten die Dualität von „natürlich“ und „künstlich“ zugunsten einer ganzheitlichen Analyse von Struktur, Eigenschaftsprofil, Energiebilanz und Verhalten im Stoffkreislauf als unerheblich außer Betracht lassen. Die unterschiedliche Eingriffstiefe wird hier durch die Begriffe

- naturbelassene Stoffe,
- durch chemische / physikalische Verfahren abgewandelte Naturstoffe sowie
- durch Synthese erzeugte Stoffe

charakterisiert, wobei eindeutige Grenzziehungen sicher problematisch sind.

Die metallischen Werkstoffe haben zwar die gute elektrische Leitfähigkeit als gemeinsames Merkmal, sie decken allerdings extrem weite Eigenschaftsfelder bezüglich ihres physikalischen und chemischen Verhaltens ab. Genannt seien beispielhaft die Festigkeit, die Verformbarkeit, die Wärmebeständigkeit, die Korrosionsbeständigkeit sowie das elektrische und magnetische Verhalten. Der Grund für die hohe Variabilität der Eigenschaften liegt bei den atomaren Bindungsmechanismen in metallischen Werkstoffen, die kristalline Struktur, variable Defektdichte, aber auch Nichtkristallinität ermöglichen.

Technisch besonders wichtige Variationen sind durch die Polymorphie bei einigen Metallen – wie z.B. Eisen – gegeben.

Die metallischen Werkstoffe überdecken mikrostrukturell den gesamten Bereich vom reinen Metall über die homogene Lösung, das heterogene Phasengemisch bis zur homogenen intermetallischen Verbindung. Inbegriffen sind alle Folgen der verschiedenen Erzeugungsprozesse (z. B. Schmelzmetallurgie, Pulvermetallurgie) sowie alle Ergebnisse von Strukturvariationen durch Wärmebehandlung und Verformung.

Zu den nichtmetallischen Werkstoffen gehören die Halbleiter, die Keramiken mit den Gläsern und die organischen Werkstoffe. Die Halbleiter sind von außerordentlicher Bedeutung für die Mikroelektronik einerseits, aber auch für die Photovoltaik andererseits. Es werden höchste Kristallperfektion sowie höchste Reinheit verlangt. Dabei handelt es sich im wesentlichen um die Elemente Silicium und Germanium sowie einige Verbindungshalbleiter wie Silicium-Germanium, Siliciumcarbid, Galliumarsenid, Galliumphosphid und Indiumphosphid. Ternäre und quaternäre Verbindungen sind Gegenstand aktueller Forschungen. In der Photovoltaik werden kristallines und amorphes Silicium sowie verschiedene Verbindungshalbleiter zur Umsetzung von Licht in elektrischen Strom durch den Photoeffekt benutzt.

Basissubstanzen der keramischen Werkstoffe und Gläser sind Oxide, Carbide, Nitride und Boride. Keramische Gefüge sind kristallin und/oder amorph und von großer Vielfalt. Aufgrund der Bindungsmechanismen weisen sie hohe Schmelzpunkte, hohe Härten und Steifigkeiten, hohe thermische Stabilitäten sowie gute Korrosions- und Verschleißbeständigkeiten bei niedriger Dichte auf. Durch mögliche Kombinationen einer Vielzahl von Metalloxiden lassen sich Funktionskeramiken mit gezielt einstellbaren physikalischen Eigenschaften (elektrisch, magnetisch, optisch, katalytisch) erzeugen. Hervorzuheben sind Supraleitung und Biokompatibilität. Zu dieser Werkstoffgruppe gehören auch verschiedene mineralische Stoffe wie Asbest oder Diamant.

Zu den organischen Werkstoffen sind alle Polymere zu zählen. Sie umfassen die natürlichen Polymere wie Pflanzenfasern, Tierhaare, Leder, Kautschuk, die regenerierte Cellulose sowie die synthetischen Polymere. Eigenschaftsvariationen sind auf der Basis der Monomerstrukturierung über Kettenverzweigungen und Vernetzungen, Polymerisationsgrade, Kristallinitätsgrade, Monomerkombinationen sowie Additive möglich. Durch Dotierung mit Fremdatomen lassen sich zusätzlich physikalische Eigenschaften variieren.

Unter den Verbundwerkstoffen/Stoffverbunden lassen sich alle Stoffsysteme subsumieren, die aus chemisch und/oder strukturell unterschiedlichen Komponenten oder Phasen, d.h. abgrenzbar, aufgebaut sind. Traditionell gehören die Komponenten unterschiedlichen Werkstoffgruppen an. Diese Beschränkung ist aber nicht aufrecht zu erhalten. Polymer-, Keramik- und Metallmatrices werden mit verschiedensten Komponenten in unterschiedlichen Verteilungen kombiniert. So sind auch alle randschichtbehandelten sowie beschichteten Werkstoffe zu dieser Gruppe zu zählen, desgleichen Werkstoffe mit Konzentrationsgradienten sowie gezielt eingestelltem Porenvolumen.

Es bleibt abschließend anzumerken, daß derzeitige innovative Konzepte zu Werkstoffentwicklungen führen, die ebenfalls durch die gegebene Übersicht erfaßt werden. Besonders hervorzuheben sind die nanokristallinen Gefügestrukturen bei Metallen und Keramiken sowie im Verbundbereich. Die Ursache besonderer Eigenschaftskombinationen ist mikrostrukturell in dem hohen Anteil interkristalliner Grenzschichten im Volumen zu sehen. Ferner sei auf die Entwicklungen bei den flüssigkristallinen Werkstoffen in der Gruppe der organischen Werkstoffe verwiesen, deren wesentliches Merkmal die Anisotropie ist. Noch im Bereich der Grundlagenforschung angesiedelt sind Arbeiten zu molekularen sphärischen Strukturen, z.B. Fullerenen und Dendrimeren. Fullerene sind käfigartige Kohlenstoffmoleküle, bei den Dendrimeren handelt es sich um baumartig verzweigte organische Moleküle.

4.2 Gegenwärtige Entwicklungen

Dieser Abschnitt stellt den Stand der aktuellen Materialforschung in den Bereichen der metallischen und nichtmetallischen, sowie der Verbundwerkstoffe dar. Das besondere Augenmerk liegt auf z.Zt. nicht befriedigend zu lösenden Werkstoffproblemen und der Beschreibung neuerer Werkstoffe. Diese befinden sich z.T. in dem Übergang zwischen der (anwendungsbezogenen) zielorientierten Forschung und dem tatsächlichen Einsatz in Systemen.

Insgesamt soll mit dieser kurzen Beschreibung des gegenwärtigen Entwicklungsstandes die Grundlage zur weitergehenden Einschätzung der Materialbedarfsentwicklung für die kommenden 5-10 Jahre gelegt werden. Diese über die reine Bestandsaufnahme hinausgehende Einschätzung wird der Schwerpunkt dieses Abschnitts in der Abschlußstudie sein. Er wird damit die zeitliche Lücke zwischen dem gegenwärtigen und dem in Kapitel „4.3 Langfristige Entwicklungstendenzen“ auf den Zeitrahmen der kommenden 10-20 Jahren projizierten Materialbedarf schließen.

4.2.1 *Metallische Werkstoffe*

Kurz- und mittelfristige Entwicklungen im Bereich der Strukturwerkstoffe werden vom derzeitigen Leistungsprofil der bereits in der technischen Anwendung oder Erprobung befindlichen Materialien ausgehen. Ein wesentliches Ziel besteht in der Realisierung eines verbesserten Leichtbaus. Es ist bekannt, daß die Leistungspotentiale herkömmlicher metallischer Werkstoffe häufig noch nicht voll ausgeschöpft sind. Vielfach ist eine angemessene Umsetzung wissenschaftlicher Erkenntnisse in die praktische Anwendung zu fördern. Dabei dürfen Materialentwicklungen nicht isoliert betrachtet werden. Der Erfolg der Einführung neuer Materialien kann sich nur im Einklang mit deren Herstellung, ihrer Verarbeitung und i.d.R. auch mit neuen Bauweisen einstellen. Hinzu kommen Anforderungen an ihre Wiederverwendung oder Wiederverwertung unter minimalem Qualitätsverlust. Die notwendige Kostenermittlung muß unter Einschluß aller

Folgekosten durchgeführt werden, die im gesamten Lebenszyklus auftreten.

Die metallischen Werkstoffe nehmen unter den Strukturwerkstoffen traditionell eine überragende Stellung ein, weil sie durch gezielte, einfach vornehmbare Variationen ihrer Mikrostrukturen (Kombination von Wärmebehandlung und Verformung) in ihren Eigenschaftsprofilen in etwa an unterschiedlichste Anforderungsprofile angepaßt werden können. Trotz intensivster Forschungen ist es aber bis heute nicht gelungen, Bauteile eindeutig definierter Mikrostruktur herzustellen und deren Lebensdauer im technischen Einsatz unter gegebenen Bedingungen so abzuschätzen, daß das korrigierende Experimentalergebnis überflüssig wird. Eine wesentliche Aufgabe wird also sein, Materialstrukturen im nano- bis mikroskaligen Bereich mit erhöhter Reproduzierbarkeit aufzubauen und deren Verhalten mikromechanismus-orientiert einzuschätzen.

Das Versagen technischer Bauteile beginnt i.d.R. im Oberflächen- bzw. Randschichtbereich. Die dieser Tatsache zugrundeliegenden mechanischen und/oder physikalisch-chemischen Mechanismen sind beherrschbar oder gar vermeidbar, wenn gezielt Oberflächen- oder Randschichtveränderungen vorgenommen werden. Kurz- und mittelfristige Entwicklungen werden bei den Verfahren zur Erzeugung von Beschichtungen sowie Randschichtvariationen liegen. Dabei stehen Haftungs- und Strukturprobleme im Vordergrund. Die meist den Keramiken zuzurechnenden Schichten müssen weitgehend kompatibel zum metallischen Substrat sein. Beschichtungen und Randschichtvariationen stellen einen wesentlichen Teil der Erzeugung gradierter Strukturen dar.

Ein weiterer Entwicklungsbereich umfaßt die durchgreifende Veränderung von Materialien im Hinblick auf spezielle Eigenschaften meist unter extremen Bedingungen. Im Vordergrund stehen dabei Kenngrößen zur Festigkeit und Steifigkeit bei hohen Temperaturen und unter korrosiver Umgebung. Besondere Aufmerksamkeit ist auch dem Dämpfungsverhalten zu widmen. Im Sinne allgemeiner Entwicklun-

gen in Richtung Leichtbau ist der Bezug zur Masse von Bedeutung. Ein wichtiges Teilgebiet umfaßt die Entwicklung von Magnetwerkstoffen sowie von Materialien zur Energiespeicherung.

Mit der Weiterentwicklung der klassischen Materialien im Sinne der Züchtung extremer Eigenschaftswerte werden an die Qualitätssicherung erhöhte Anforderungen gestellt. Dazu müssen die vorhandenen Prüfsysteme weiterentwickelt oder gar neue Verfahren geschaffen werden. Es kommt hinzu, daß konstruktive Optimierungen die erlaubten Materialtoleranzen zunehmend einengen. Letztere werden wiederum von den Herstell- und Verarbeitungsbedingungen bestimmt.

Neben den Fortentwicklungen der klassischen metallischen Legierungen auf beispielsweise Fe-, Ni-, Co-, Ti-, Al-, Mg- oder Cu-Basis durch verbesserte Anpassung der Mikrostrukturen an bestimmte Erfordernisse ist die bereits im Erprobungsstadium befindliche Gruppe der Intermetallischen Phasen verstärkt weiterzuentwickeln. Hier besteht die Aufgabe darin, bisher noch unbefriedigende Eigenschaftskombinationen durch Mikrostrukturvariationen zu verbessern.

Effektive Materialnutzung ist ganz wesentlich an die Möglichkeiten konstruktiver Optimierungen bis hin zu biomechanisch optimierten Bauweisen geknüpft. Die Substitution von Materialien oder der Einsatz ganz neuer Materialien kann i.d.R. aber nur bei gleichzeitiger Änderung der Verarbeitungsverfahren erfolgen. So sind gleichrangig zu den Materialentwicklungen Fertigungsverfahren zu variieren oder auch neu zu schaffen. Davon betroffen sind die klassischen Ur- und Umformverfahren, wenn sie auf extreme Werkstoffzustände oder Abmessungen angewendet werden sollen, oder die Fügeverfahren, deren Anwendungen stark werkstoffabhängig sind. Exemplarisch seien hier als entwicklungsfähige Verfahrensbereiche die Pulvermetallurgie einschließlich Nanotechnologie, das Sprühkompaktieren, das Metallspritzen, der Feinguß einschließlich Einkristallzüchtung, das Sinterschmieden, das Strangpressen großer Integralplatten, das superplastische Umformen, das Beschichten sowie das Schweißen genannt.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die kurz- und mittelfristigen Entwicklungen im Bereich der metallischen Strukturwerkstoffe

- den Leichtbau,
 - die Verarbeitbarkeit,
 - die Hochtemperaturfestigkeit,
 - die Korrosionsbeständigkeit und die Biostabilität sowie
 - die Lebensdauer und die Zuverlässigkeit
- fördern werden.

4.2.2 Nichtmetallische Anorganische Werkstoffe

4.2.2.1 Halbleiter

Halbleiter sind Materialien, bei denen die Bindungen zwischen den einzelnen Atomen überwiegend kovalenten Charakter haben und alle Bindungen der äußersten Valenzschale abgesättigt sind. Durch die Vollbesetzung des Valenzbandes ist ihre intrinsische elektrische Leitfähigkeit gering. Diese steigt allerdings durch das Aufbrechen von Bindungen, was z.B. durch Temperatureinwirkung oder Strahlung geschehen kann. Dabei wird ein Elektron in das nächsthöhere sog. Leitungsband gehoben und im Valenzband eine Fehlstelle (Loch, positiver Ladungsträger) generiert. Die dazu benötigte Energie pro Bindung ist der sog. Bandabstand, der bei den geläufigen Halbleitern zwischen 0,1 und 1,6 eV liegt. Bandabstand und Beweglichkeit der Ladungsträger in diesen Bändern sind Hauptmerkmale eines Halbleiters.

Für den Einsatz eines Halbleiters ist entscheidend, daß die Leitfähigkeit durch gezielte Dotierung über mehrere Größenordnungen modifiziert werden kann. Hauptanwendungsbereiche sind die Mikro- und Optoelektronik.

Halbleiter in der Mikroelektronik

Aus der großen Vielfalt halbleitender Materialien der Gruppen II, III, IV, V und VI haben sich für die Anwendungen in der Mikroelektronik (bis 150°C) vor allem die Elementhalbleiter Silizium und III-V Verbindungshalbleiter wie GaAs bzw. GaAs-AlAs bewährt. GaAs zeichnet sich gegenüber Silizium durch höhere Ladungsträgerbeweglichkeiten und damit wesentlich geringere Schaltzeiten aus sowie durch die Möglichkeit, den Bandabstand mittels Mischkristallbildung mit einer weiteren III-V Verbindungen zu verändern. Schichtfolgen von Material verschieden großer Bandlücke oder andere Arten von Heterostrukturierungen bilden die Ausgangsbasis zur Herstellung extrem schneller Bauteile auf GaAs-Basis. Obwohl Silizium in dieser Beziehung unterlegen ist, dominiert es in der Anwendung aus ökonomischen und herstellungstechnischen Gründen. Insbesondere können hier die für komplette Schaltkreise notwendigen Isolationen durch eine gezielte Oxidierung des Ausgangsmaterials gebildet werden, was die Herstellung miniaturisierter Schaltkreise in automatischen Produktionen erst möglich macht.

Ein erweiterter Einsatzbereich in Schaltkreisen bei höheren Temperaturen oder erhöhter Strahlenbelastung wird mit Halbleitermaterialien mit großer Bandlücke wie SiC oder Diamant angestrebt. Diese Materialien könnten in fernerer Zukunft durch Nitrid-Halbleiter wie BN, AlN und GaN ergänzt werden. Die Schmelzpunkte sind hier sehr hoch und die Technologie schwierig. Beweglichkeitswerte sind bislang kaum bekannt. Hier könnte eine Gruppe elektronischer Bauelemente verfügbar werden, die bei Temperaturen bis 800 °C unter extremen physikalischen Bedingungen betreibbar sind. Entsprechender Bedarf ergibt sich für die Überwachung und Regelung von Generatoren, Gasturbinen und Verbrennungsmotoren von Kraftfahrzeugen und Flugzeugen.

Halbleiter in der Optoelektronik

Halbleiter mit sog. direkter Bandlücke können vorteilhaft als Photo-detektoren eingesetzt werden, indem man die Leitfähigkeitsänderung bei Generation zusätzlicher freier Ladungsträger durch Strahlungsabsorption auswertet. Je nach Bandlücke kann so Strahlung zwischen 200 und 0,2 μm detektiert werden. Erzeugt man z.B. durch pn-Übergänge innere elektrische Felder, so kann man die so generierten Elektron-Loch Paare trennen und als äußere Spannung nachweisen. Dies führt zu schnellen Photovoltaik-Detektoren, bzw. zur Solarzelle.

Umgekehrt kann man durch einen eingepprägten Strom an einem pn-Übergang Ladungsträgerpaare rekombinieren lassen und Licht (Leuchtdiode) oder – bei entsprechender Cavity – Laserstrahlung erzeugen. Für diese Anwendungen ist Silizium wegen seiner indirekten Bandlücke nicht einsetzbar. Hier kommt z.Zt. fast ausschließlich AlGaAs bzw. das quaternäre System AlGaAsP zum Einsatz, welches sich an die Strahlungsfenster in der faseroptischen Nachrichtentechnik anpassen läßt.

Durch Materialien größerer Bandlücke kann der verfügbare Frequenzbereich für Lichtemitter in Richtung kürzerer Wellenlängen ausgedehnt werden. Hier konzentriert sich die Forschung z.Zt. auf die II-VI Halbleiter CdTe und ZnSe, wodurch blaue Leuchtdioden und Laser realisierbar werden. Durch Benutzung von Lese- und Schreibgeräten im blauen Spektralbereich kann die Speicherdichte optischer Datenträger um den Faktor vier gesteigert werden. Genauso sind effektive blaue Leuchtdioden für die Weiterentwicklung lichtstarker Flachbildschirme unabdingbar.

Die realisierten optischen Materialien sind nicht mit der Silizium-Technologie kompatibel, was bislang eine direkte Integration optischer Komponenten in mikroelektronische Schaltkreise verhindert hat. Hier bietet sich die Verwendung von Si-Ge Heterostrukturen an. Man nimmt an, daß dieses Material durch gezielte Einstellung von

Verspannungen zu einem Halbleiter mit direkter Bandlücke wird und somit integrierte optoelektronische Anwendungen möglich werden.

Halbleiter in der Mikromechanik

Die weit fortgeschrittene Technologie der anisotropen Ätztechnik bei Silizium erlaubt eine Strukturierung im Mikrometer-Maßstab, was die Herstellung mikromechanischer Bauteile zuläßt (Mikrosystemtechnik auf Siliziumbasis). Damit ist zusätzlich die Integration mikromechanischer Sensoren und Aktuatoren zusammen mit elektronischen Bauteilen auf einem Chip möglich.

Insgesamt ist bei der Entwicklung neuer Halbleiter ein Trend zu höheren Bandlücken erkennbar, da Bauteile für höhere Temperaturen bzw. optoelektronische Komponenten für kürzere Wellenlängen benötigt werden. Zusätzlich ist man um eine weitere Miniaturisierung von Gesamtsystemen bemüht, die durch eine gemeinsame Integration elektronischer, optischer und mechanischer Bauteile auf einem Chip realisiert werden soll.

4.2.2.2 Keramische Werkstoffe

Man unterteilt die keramischen Werkstoffe in traditionelle Werkstoffe, die weitgehend aus natürlichen Rohstoffen bestehen, wie Porzellan, Geschirr, Sanitärwaren, feuerfeste Materialien, aber auch technisch anspruchsvollere Anwendungen wie Isolatoren, und solche, die eine sehr hohe chemische Reinheit aufweisen und deren Ausgangsbestandteile meist durch aufwendige Aufbereitungsverfahren gewonnen werden. Außerdem werden bei diesen Werkstoffen scharf definierte Eigenschaftswerte und demgemäß kontrollierte Gefügeentwicklungen gefordert. Im folgenden werden ausschließlich Keramiken der zweiten Kategorie, die auch als Hochleistungskeramiken bezeichnet werden, beschrieben.

Die Eigenschaften der Hochleistungskeramiken werden von der Struktur und den vorherrschenden kovalenten und ionischen Bindungsanteilen, der das Material aufbauenden Phasen sowie der Gefügeausbildung unter Einschluß des Porenanteils und der Porenverteilung bestimmt. Gemäß ihrer Anwendung werden in dieser Kategorie primär mechanisch belastete Strukturkeramiken und wegen ihrer physikalischen (elektrischen, magnetischen, optischen) chemischen und biologischen Eigenschaften eingesetzte Funktionskeramiken unterschieden.

Strukturkeramiken weisen gegenüber metallischen und organischen Werkstoffen häufig Vorteile bei der thermischen Beständigkeit und den Hochtemperatur-Verschleiß- und Korrosionseigenschaften auf, oft in Verbindung mit einem niedrigen spezifischen Gewicht. Nachteile der Strukturkeramiken sind ihre geringen Schadenstoleranzen insbesondere in Verbindung mit thermischen Wechselbelastungen. Ein weiteres Problem stellt die Herstellung der Hochleistungskeramiken dar, da auch bei Massenfertigungen Einzelbauteile zur Erzielung der geforderten Maßgenauigkeit häufig nachbearbeitet werden müssen. Allerdings ist es heute bei vielen Hochleistungskeramiken möglich, auch bei hohen mechanischen Anforderungen, die Versagenswahrscheinlichkeiten der Bauteile in den geforderten Bereich abzusenken. Die dafür notwendige kontrollierte und meist kostenintensive Verarbeitung vermindert allerdings die weite Verbreitung der keramischen Bauteile. Zur Zeit werden primär Oxide, Carbide, Nitride und in geringerem Maße auch Silicide und Boride eingesetzt. Der Gefügebau von Hochleistungskeramiken kann einphasig oder mehrphasig sein. Dabei wird eine gezielte Gefügeentwicklung der Keramiken angestrebt und die Verarbeitbarkeit und die Verwendbarkeit der Materialien zu verbessern bzw. zu verbreitern. Eine gezielte Beeinflussung der Gefügeentwicklung kann durch Fremdstoffzusätze zu den Ausgangsmaterialien vorgenommen werden. Ein Beispiel sind sinterfördernde Additive von Aluminiumoxid und anderen Hilfsstoffen bei der Herstellung von Siliciumnitrid. Diese bewirken bei geschickter Steuerung der Prozesse Gefügeentwicklungen mit längstgestreckten Kör-

nen und dadurch verursacht einen erhöhten Reißfortschrittswiderstand von bis zu 25 % des Wertes von Stahl. Es muß allerdings klar festgestellt werden, daß damit keine plastische Verformbarkeit der keramischen Werkstoffe verbunden ist, sondern lediglich ihre Versagensempfindlichkeit gegenüber einem bereits vorhandenen Defekt (Reiß) abnimmt.

4.2.2.3 Gläser

Der Werkstoff Glas besitzt insbesondere im Bereich der Optik und der Optoelektronik hohe technische Bedeutung. Hinzu kommen Bereiche wie der Apparatebau in der chemischen Industrie sowie Spezialanwendungen in der Medizin. Nach wie vor haben oxidische Gläser die höchste Verbreitung, jedoch erlangen Spezialgläser (Chalkogenid- oder auch ionische Gläser) aufgrund ihrer neuartigen Eigenschaften zunehmendes Interesse.

Dies gilt in gleicher Weise auch für neue Herstellverfahren oxidischer und insbesondere nicht-oxidischer Gläser. Der folgende Abschnitt beschreibt in kompakter Form den aktuellen Stand, sowie kurz- und mittelfristige Entwicklungen im Bereich

- A) Sol-Gel-Verfahren zur Herstellung oxidischer Gläser
- B) Herstellung und Eigenschaften nicht-oxidischer Gläser

A) *Sol-Gel-Verfahren zur Herstellung oxidischer Gläser (Kaim 1996)*

Neben den klassischen Schmelzverfahren erlangt insbesondere das Sol-Gel-Verfahren zur Erzeugung oxidischer Gläser an Bedeutung. Hydrolyselabile Verbindungen, wie Silicium- oder Titanalkoxide werden in Gegenwart von geeigneten Katalysatoren mit Wasser zur Reaktion gebracht. Über die Stufen des Sols (kolloidale Lösung von kleinsten Partikeln in der Reaktionsflüssigkeit), Gels (Verteilung einer flüssigen Phase in einem weitmaschigen Polymernetz) wird schließlich das Xereogel (unter Strukturert halt getrocknetes Gel) gebildet,

welches nach einem Sinterprozeß in den Glaszustand übergeht. Diese Methode bietet neben rein verfahrenstechnischen Vorteilen die bislang einzigartige Möglichkeit, gezielte Strukturen zu erzeugen, indem die Funktionalität der Ausgangssubstanzen variiert und deren Verhältnis verändert wird.

Ebenso ist zu erwarten, daß gezielt organisch modifizierte Alkoxide erzeugt werden und deren neue Eigenschaften auch die des entstehenden Glases verändern. So werden z.B. zukünftig halbleitende Gläser durch den Einsatz organischer, an Silicium gebundene, leitfähige Polymere auf der Grundlage des Sol-Gel-Prozesses zugänglich sein.

B) Herstellung und Eigenschaften nicht-oxidischer Gläser (Seddon 1995)

Unter chalcogenidischen Gläsern sind solche auf Basis Schwefel, Selen und Tellur zu verstehen, in Kombination mit elektropositiveren Elementen der III- bis V-Hauptgruppe, sowie den Lanthaniden, Silber und den leichteren Alkalimetallen.

Im Gegensatz zu den herkömmlichen oxidischen Gläsern werden chalcogenidische Gläser nahezu ausschließlich in der Schmelze und hier unter Vakuum oder Inertgas erzeugt, um oxidische Verunreinigungen zu vermeiden.

Glasschichten werden durch Verdampfung bzw. durch Sputtern erzeugt. Häufig weicht bei der Verdampfung chalcogenidischer Gläser die Zusammensetzung der Gasphase und damit der Glasschicht von der der Ausgangssubstanz ab, da die Komponenten unterschiedlich leicht verdampfen. So steht eine As_2S_3 enthaltende Schmelze mit einer As_4S_4 enthaltenden Gasphase im Gleichgewicht. Die verfahrenstechnische Optimierung derartiger Verfahren wird ein Schwerpunkt in der Erzeugung dünner Glasschichten sein. Alternativ dazu können homogene Schichten durch Sputtern erzeugt werden.

Vielversprechend und neu hingegen ist die Laserablation. So gelingt die Erzeugung μm -dicker Schichten von La-Ga-S-Gläsern auf CaF_2 durch Beschuß eines $\text{LaGa}_{2,3}\text{S}_5$ Targets mit einem KrF-Excimeren-Laser bei 10^{-2}Pa . Damit können die besonderen Eigenschaften der Chalkogengläser mit denen ionischer und möglicherweise auch oxidischer Substrate kombiniert werden.

Optische Eigenschaften

Chalkogenidische Gläser zeigen eine hohe Transmission im IR, insbesondere im fernen IR (S-basierend: bis $12\mu\text{m}$, Se-basierend: bis $15\mu\text{m}$ und Te-basierend: bis $20\mu\text{m}$). Aufgrund dieser Eigenschaft ist zu erwarten, daß diese Materialien verstärkt zur Datenübertragung im IR-Bereich zum Einsatz kommen werden. Voraussetzung ist aber, daß deren Herstellung soweit optimiert wird, daß eine Verunreinigung mit Sauerstoff vermieden wird, da es ansonsten zur Absorption im Bereich zwischen $8\text{-}12\mu\text{m}$ kommt, was den Einsatz dieser Gläser stark einschränkt.

Die Brechungsindices der Chalkogengläser lassen sich in weiten Bereichen durch Variation des Chalkogens verändern. Mit zunehmender Größe von $\text{S} \Rightarrow \text{Te}$ nimmt dessen Polarisierbarkeit und damit der Brechungsindex des darauf basierenden Glases zu. Dies gilt in gleicher Weise für die elektropositiveren Elemente im Glas. Die Verwendung von Silicium oder Germanium verringert, die von Blei, Zinn oder Antimon erhöht den Brechungsindex. Diese Abstimbarkeit des Brechungsindex kann ebenfalls Eingang in die Glasfasertechnik bzw. in auf der Lichtbrechung beruhenden optischen Geräten finden.

Thermische Eigenschaften

Die Chalkogengläser zeigen eine hohe Variabilität im Hinblick auf die Glasübergangstemperatur (t_g) und den thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Durch die zunehmende Größe des Chalkogens in der Reihe $\text{S} \Rightarrow \text{Se} \Rightarrow \text{Te}$ nimmt dessen Bindungsstärke in der Glasmatrix ab, verbunden mit einer Abnahme der Glasübergangstemperatur. Gleich-

ches gilt für eine Erhöhung des Chalkogengehalts im Glas (siehe Tab. 4-1). Umgekehrt verhält sich der thermische Ausdehnungskoeffizient, der in der Reihe $S \Rightarrow Se \Rightarrow Te$ zunimmt.

Tab. 4-1: Thermische Eigenschaften einiger Chalkogenidgläser (Seddon 1995)

System	t_g [°C]	thermischer Ausdehnungskoeffizient [$10^{-6} K^{-1}$]
$Ge_{30}As_{20}Se_{50}$	361	11,7
$Ge_{30}As_{10}Se_{60}$	345	13,7
$Ge_{10}As_{40}Se_{50}$	222	20,9
$Ge_{10}As_{20}Se_{70}$	159	24,8
$Ge_{30}As_{13}Se_{47}Te_{10}$	308	13,2
$Ge_{30}As_{13}Se_{37}Te_{20}$	285	12,9

Daher ist zu erwarten, daß zukünftige Gläser hinsichtlich ihrer thermischen Eigenschaften „maßgeschneidert“ werden können.

Weitere Anwendungen sind in der Lasertechnik zu erwarten (Falbe/Regitz 1995). Aufgrund der hohen Absorption von Wasser bei $10,6 \mu m$ werden CO_2 -Laser in der Chirurgie zum Schneiden eingesetzt. Da sie eine große Wärmeeinwirkung auf die obersten Zellschichten ausüben, verschließen sie Blutadern sofort, so daß auch stark durchblutete Organe damit operiert werden können. Die hierbei eingesetzten Laser sind kontinuierlich oder gepulst mit typischen Leistungen um 20 Watt. Da noch keine flexiblen Lichtleitfasern für $\lambda = 10,6 \mu m$ im medizinischen Einsatz sind, muß das Licht zur Zeit noch über Spiegel zum Operationsgebiet gebracht werden. Hier ist ein potentielles Einsatzgebiet der hoch IR-transparenten Chalkogengläser, wobei sich bereits mit einer schichtartigen Glasfaser (Kern: Ga-Se-Te, Schale: Ga-As-Se-Te) erste Erfolge abzeichnen.

Eine weitere Anwendung kann die Materialbearbeitung mit CO_2 -Lasern u.a. zum Schneiden (mit einem 10 kW System können Stahl-

platten von mehreren cm Dicke geschnitten werden), zum Schweißen und Beschriften sein.

4.2.3 Organische Werkstoffe

4.2.3.1 Naturbelassene Stoffe und abgewandelte Naturstoffe

Holz

Holz ist aus morphologischer und chemischer Sicht eine uneinheitliche Substanz. Aus botanischer Sicht wird Holz als die Gesamtheit der vom Kambium (Wachstumsschicht) nach innen gebildeten Zellenelemente bezeichnet. Holz ist aus langgestreckten dickwandigen Zellen in Form von Holzfasern, Gefäßen, Tracheiden, Holzparenchym u.a. aufgebaut. Hierdurch übernimmt das Holz im Baum Funktionen wie Verfestigung der Struktur, Leitung der Nährsubstanzen (besonders in den Gefäßen) und ihre Speicherung (vorwiegend in den Holzparenchymzellen).

Die Dichte von luftgetrocknetem Holz (bei 10 bis 20 % Wassergehalt) schwankt je nach Holzart zwischen 0,3 und 0,8 kg/m³. Die wichtigsten chemischen Verbindungen des Holzes sind Zellulose, Hemicellulose und Lignin. Zusätzlich enthält Holz Substanzen wie z.B. Harze, Wachse, Terpene und Terpenoide (Kautschuk), Phenole, Chinone, Farbstoffe, Fette, Zucker, Eiweiß und Mineralstoffe (Neumüller 1976, S. 1493-1496).

Entsprechend der in Kapitel 4.1 dargestellten Klassifizierung der Materialien erfolgt in Abb. 4-2 ausgehend von der natürlich gegebenen Substanz Holz eine grobe Einteilung nach der Art der Abwandlung durch chemische / physikalische Verfahren.

Wie Abb. 4-2 zu entnehmen ist, stellt die natürlich gegebene Substanz Holz einen interessanten Werkstoff dar, der zum überwiegenden Teil in einer vom Naturzustand abgewandelten Form zum technischen Einsatz kommt. Selbst in den neusten Entwicklungen des Schienenfahrzeugbaus wird auf diesen traditionellen Werkstoff zurückgegrif-

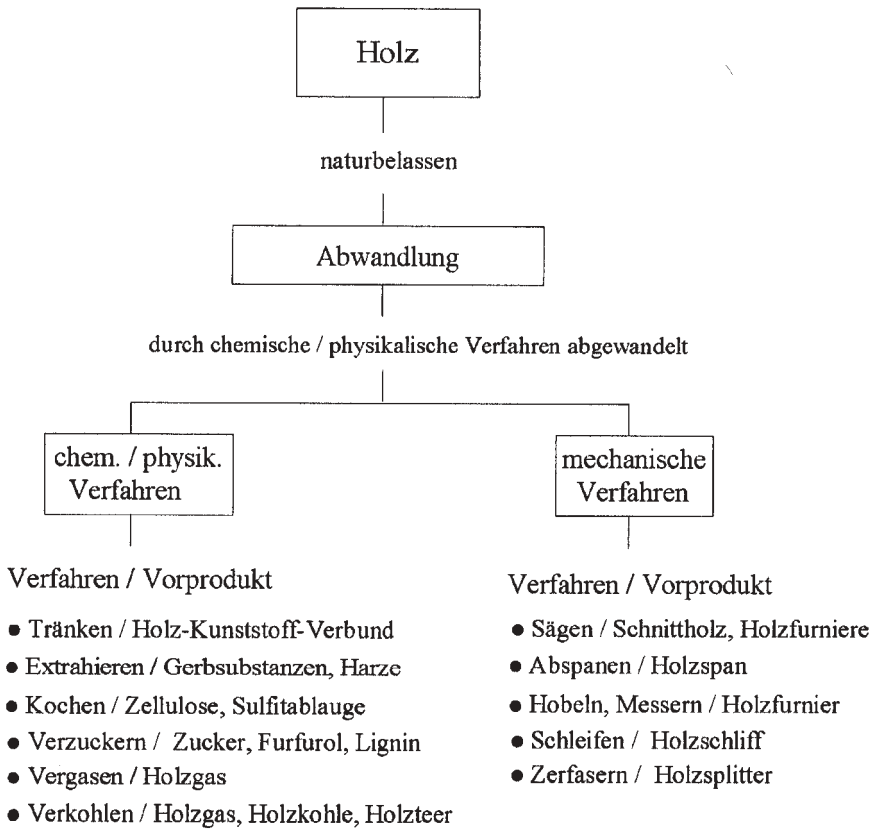


Abb. 4-2: Die durch chemische / physikalische Verfahren abgewandelte Substanz Holz

fen. Zum Beispiel wird ein Verbundwerkstoff mit hoher Luftschalldämmung aus Birkenspertholz mit einer inneren Schicht aus Thermoplast als Bodenelement für den ICE-Speisewagen eingesetzt (Rost 1996). Neben der direkten Verwendung des durch vorwiegend mechanische Verfahren abgewandelten Werkstoffes Holz, werden Gehölze auch weiterhin als Rohstoffquelle für Produkte wie Kautschuk und Holzzellstoff dienen.

Naturkautschuk

Naturkautschuk wird zum überwiegenden Teil aus dem sogenannten Latex gewonnen. Latex ist eine Emulsion, die beim Anritzen des Baumes *Hevea brasiliensis* als weißer, milchiger Saft aus dem Stamm austritt. Im Amazonasgebiet wächst *Hevea brasiliensis* in wilder Form. Er wird in fast allen Bereichen der Tropen in Plantagen angebaut. Die 15 bis 20 m hohen und im Durchmesser 60 bis 75 cm dicken Bäume decken den weltweiten Naturkautschukbedarf.

Im Latex (Dichte $1,02 \text{ kg/m}^3$) sind die 0,0005 bis 0,001 mm großen Kautschuktröpfchen (Dichte $0,93 \text{ kg/m}^3$) in Wasser emulgiert. 100 g Latex enthalten neben 30 bis 35 g Kautschuk und anderen Substanzen etwa 60 g Wasser. Für die Verarbeitung wird Kautschuk zur Gerinnung gebracht und vom Wasser getrennt. Der Rohkautschuk wird gereinigt, zerrissen, gewaschen, geknetet und zu einem ca. 1 mm dicken Flächengebilde geformt. Der Naturkautschuk ist ein schlechter Wärme- und Elektrizitätsleiter, leichter als Wasser, fast geruchsneutral, hat eine Bruchdehnung von 400% und ist über einen sehr großen Bereich elastisch (Neumüller 1976, S. 1737-1741). Naturkautschuk kann biologisch abgebaut werden, sofern er nicht nachträglich chemisch modifiziert z.B. vernetzt wurde (Klein/Kramer 1994, o.J.) Diese Eigenschaften haben unter anderem dazu geführt, daß Naturkautschuk wieder verstärkt in Produkten zum Einsatz kommt, in denen der biologische Abbau und die Kompostierung nach Abschluß der Produktverwendungsphase gewünscht ist. Beispielsweise gibt es umweltverträgliche Teppiche aus Naturfasern, die mit einer biologisch abbaubaren Naturkautschukbeschichtung ausgestattet sind (Donau Tufting 1994, Donau Tufting/Gunnar Koch 1996). Naturlatex kann im Vergleich zu anderen nachwachsenden, biologisch abbaubaren Werkstoffen für den genannten Einsatzbereich zur Zeit am überzeugendsten die geforderten Eigenschaften erfüllen (Neumann 1996). Weiterhin kommt Naturkautschuk in Kombination mit Stahl im Bereich der Schall- und Schwingungstechnik im Schiff-, Flugzeug-, Automobil- und Schienenfahrzeugbau sowie im Gebäude- und Brückenbau zum Einsatz (GMT 1996a).

Stärke

Ein Beispiel für ein natürlich gegebenes Polymer ist die Stärke. Der Einsatz von Stärke hat in den letzten Jahren außer im Lebensmittelbereich auch im industriellen Bereich zugenommen. Wenn allgemein von Stärke gesprochen wird, sollte sinnvollerweise eine genauere Einteilung nach dem Grad der Veränderung, ausgehend von der natürlich gegebenen Substanz, erfolgen:

- natürlich gegeben
- industriell geschaffen
 - durch chemische oder physikalische Verfahrenstechnik abgewandelt
 - durch Synthese neu erzeugte Substanz

Während im Pflanzenreich die Cellulose die wichtigste Gerüstsubstanzen ist, stellt die Stärke die wichtigste Speichersubstanz dar (Bischof 1993). Das Polysaccharid Stärke wird seit Jahrzehnten vornehmlich in der Lebensmittel- und der Papierindustrie eingesetzt und findet vermehrt das öffentliche Interesse. Einen Überblick über die bisherigen industriellen Anwendungen von Stärke gibt Abb. 4-3.

Die Darstellung verdeutlicht, daß die Stärke in unterschiedlich stark abgewandelter Form ausgehend von der natürlich gegebenen Substanz in der Industrie Verwendung findet. Trotz der vielfältigen Anwendungen ist der Stärkeeinsatz als Substitut für petrochemische Polymere bisher noch sehr begrenzt.

Insbesondere die Kartoffelstärke kann ohne Zugabe von Additiven auf herkömmlichen Kunststoffverarbeitungsmaschinen thermoplastisch verarbeitet werden. Im Gegensatz zu anderen Stärkearten wie Mais-, Reis- oder Erbsenstärke kann sie bei einem Preis von unter 1 DM/kg mit Massenkunststoffen konkurrieren, da neben dem Preis auch eine hohe Verfügbarkeit gegeben ist (Mann 1994).

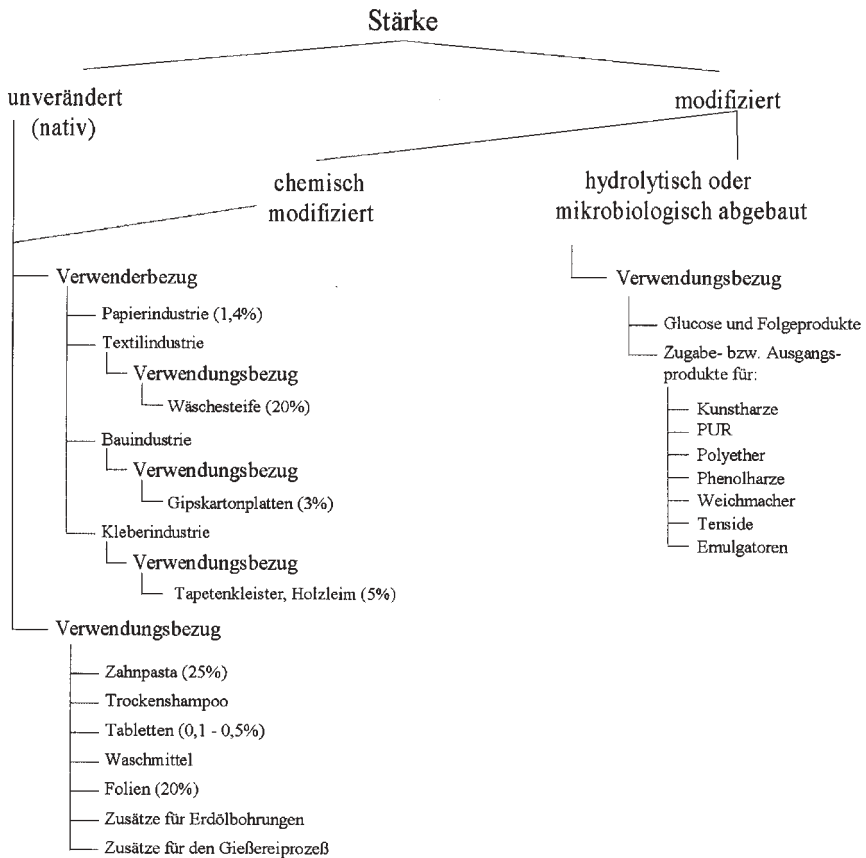


Abb. 4-3: Industrielle Verwendung von Stärke (GMT 1996a)

In den letzten Jahren wurde an der Entwicklung von sogenannten „Propfcopolymeren“ aus Stärke und synthetischen Polymeren gearbeitet, damit die Polymerstruktur nach Produktverwendung durch mikrobiologische Abbauprozesse aufgelöst werden kann. Hierbei wird z.B. durch eine anionische Polymerisation eines Vinyl- oder Acrylmonomeren ein polymeres Carbanion synthetisiert und anschließend mit einem funktionalisierten Stärkemolekül zur Reaktion gebracht. Das eingebrachte Stärkemolekül stellt eine Schwachstelle in der Polymerkette dar und kann durch Mikroorganismen abgebaut werden (GMT 1996a). Der Nachteil ist, daß zwar die Stärkemoleküle biologisch abgebaut werden und damit die Polymerstruktur „zerfällt“, aber die synthetischen Polymermoleküle biologisch nicht abbaubar im Boden verbleiben.

Ein ähnlicher Ansatz wird bei der Verwendung von nativer Stärke als preiswerter Füller für synthetische, petrochemische Polymere verfolgt (C.A.R.M.E.N. 1995).

Pflanzliche Naturfasern

Die Vielfalt der pflanzlichen Naturfaserarten ist denkbar groß. Dies liegt darin begründet, daß sich die Fasern einerseits durch die Pflanzenart (monokotyle oder dikotyle³ Pflanzen) und andererseits nach dem Ursprung der Fasern aus den unterschiedlichen Teilen der Pflanze unterscheiden lassen. Zum besseren Verständnis ist in Abb. 4-4 eine Einteilung der Naturfasern grafisch dargestellt.

Pflanzen verfügen durch ihre Form und Gestalt über mechanische Eigenschaften, die einzigartig sind. Die Konstruktion z.B. des Roggenhalmes ist derart komplex, daß Höhen erreicht werden, die das 500fache des Grunddurchmessers betragen. Zudem trägt der Halm das Gewicht der Ähre, die schwerer ist als er selbst. Darüber hinaus ist die elastische Verformbarkeit des Halmes so hoch, daß er sich bei Windstößen bis zum Boden neigen und anschließend wieder seine ursprüngliche Position einnehmen kann (Herzog 1930). Für die Verstärkung von Kunststoffbauteilen sind insbesondere die Fasern mit hohem Elastizitätsmodul geeignet.

Nach Abb. 4-5 können neben den Hanffasern auch die Flachs-, Ramie- und bedingt die Sisalfasern als mögliche Verstärkungsfasern eingesetzt werden. Die dargestellten Reißlängen von Flachs-, Hanf- oder Ramieeinzelfasern erreichen im Vergleich zu den derzeit häufig verwendeten E-Glasfasern akzeptable Festigkeitswerte. Hanffasern erreichen sogar höhere dichtebezogene Steifigkeiten als E-Glasfasern (Herrmann 1994).

³ Monokotyle Pflanzen sind einkeimblättrige Pflanzen, z.B. Gräser, dikotyle Pflanzen sind zweikeimblättrig.

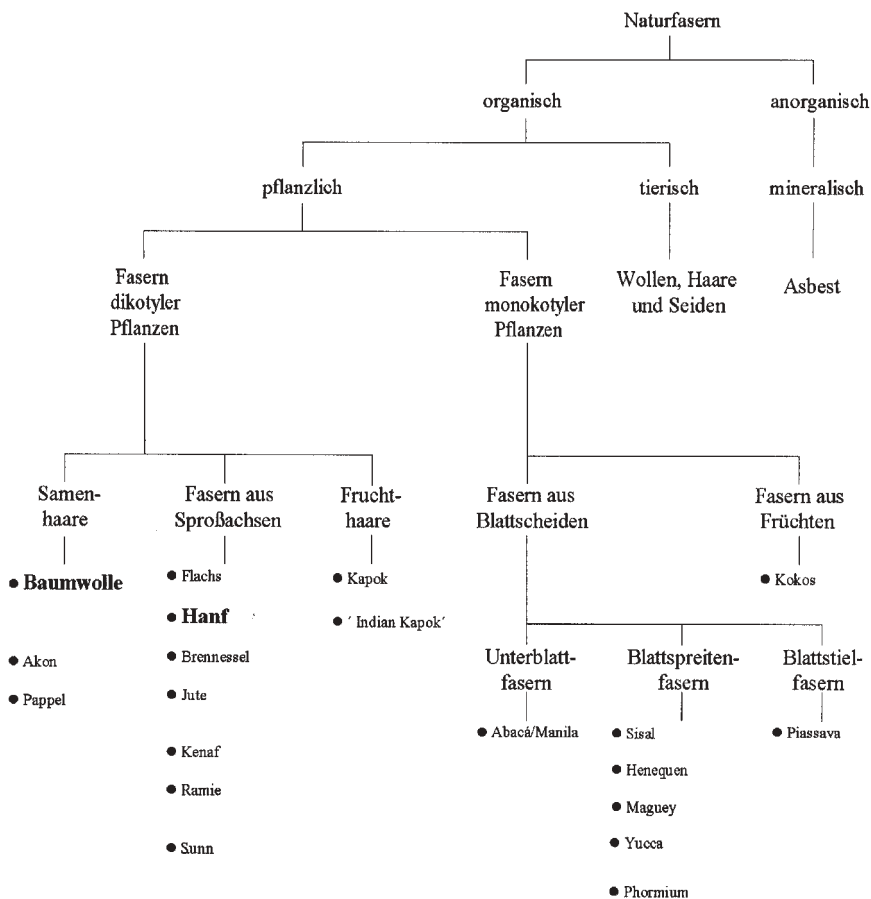


Abb. 4-4: Übersicht über die Naturfasern (Franke 1989, Müssig 1995)

Diese Angaben sind jedoch nicht als feste Größe für eine Faserart zu sehen, da es sich um Naturprodukte handelt, die infolge verschiedener Pflanzensorten, Anbaubedingungen, Klima, Röst- und anderen Aufschlußverfahren starken Schwankungen unterliegen. Die Grafik soll vielmehr als Orientierung dienen, um die Potentiale von Naturfasern zu verdeutlichen. Bei der Verarbeitung werden in der Regel die *Faserbündel* und nicht die *Einzelfasern (Bündelfasern)* eingesetzt. Die Festigkeit der Einzelfaser ist in der Regel höher als die eines

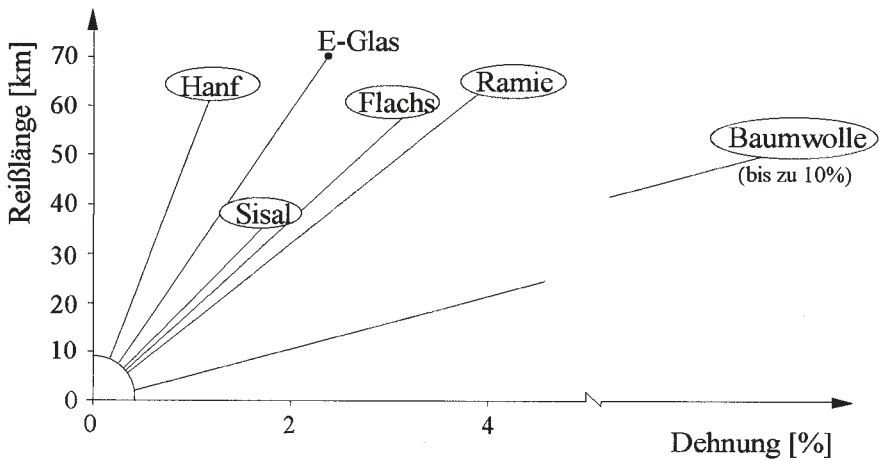


Abb. 4-5: Festigkeiten ausgewählter pflanzlicher Naturfasern (Herrmann 1994)

Faserbündels, da bei dem Faserbündel durch die verbindenden Mittellamellen nicht die Festigkeit der Einzelfaser, sondern die Grenzflächenscherfestigkeit zwischen Einzelfasern und Mittellamellen gemessen wird. Wegen der vergleichbaren Festigkeiten einiger pflanzlicher Naturfasern mit E-Glasfasern erscheint es sinnvoll, vor allem die mögliche Substitution dieser Glasfasern durch pflanzliche Naturfasern zu untersuchen (Müssig 1996). Einsatzbereiche wie die Kraftfahrzeugindustrie werden zum größten Teil von Glasfasern beherrscht (Mieck et.al. 1993, S. 276). Von Seiten der Automobilhersteller wird in den letzten Jahren verstärkt an der Wiedereinführung von pflanzlichen Naturfasern im Bereich des Fahrzeugbaus geforscht.

Einen möglichen Anwendungsfall stellen nadelfilzverstärkte Thermoplaste dar (Fölster 1994). Bei der Herstellung des textilen Flächengefüges Nadelfilz werden z.B. Faserflore (durch mechanisches Ordnen entstandene Faserkollektive aus Stapelfasern) durch Faserverschlingungen zum Filz verfestigt. Die Faserverschlingungen werden

durch wechselndes Einstechen in bzw. Ausziehen aus dem Faserflor von Nadeln mit Widerhaken gebildet (Schnegelsberg 1971, S. 117-119, 190-193). Derartige Nadelfilze kommen bei einigen deutschen Automobilherstellern bereits zum Einsatz. In Versuchen zur Herstellung von nadelfilzverstärkten Thermoplasten wurden Nadelfilze aus Flachswerg, aus Flachsfaserbündeln aus dem Grünflachsaufschluß sowie Nadelfilze aus Sisalfaserbündeln mit Polypropylen (PP) durchtränkt und anschließend verpreßt. Bei den Versuchen kam ein neu entwickeltes kombiniertes Extrusions-Preß-Verfahren zum Einsatz. Das geschmolzene Polypropylen wird mittels des verfahrenbaren Extruders über eine Breitschlitzdüse in die untere Hälfte des Pressenwerkzeuges eingetragen. Ein Nadelfilz wird auf das aufgetragene Polypropylen gelegt, verpreßt und anschließend abgekühlt. Bei den Versuchen zeigte sich der Vorteil des Einsatzes von Flachsfaserbündeln aus dem Grünflachsaufschluß. Durch die gröberen Faserbündel kann ein Nadelfilz mit einer höher luftdurchlässigen Struktur hergestellt werden. Infolge der offeneren Struktur wird ein leichtes Durchtränken mit Polypropylen erreicht.

Um Aussagen über den möglichen Ersatz von Glasfasern durch pflanzliche Naturfasern treffen zu können, sind in Abb. 4-6 neben den Festigkeiten der nadelfilzverstärkten Thermoplaste die Werte herkömmlicher glasfaservliesverstärkter Thermoplaste dargestellt. Beim Einsatz der Flachsfaserbündel aus dem Grünflachsaufschluß werden Zugfestigkeiten erreicht, die sogar bei geringeren Bauteildichten die Festigkeiten des glasfaservliesverstärkten Polypropylens erreichen. Dadurch können Bauteile realisiert werden, die im Vergleich mit den konventionellen glasfaserverstärkten Bauteilen rund 25 Prozent leichter sind und bei der Produktion bis zu 60 Prozent der Materialkosten einsparen.

Eine Wiederverwertung der hergestellten nadelfilzverstärkten Thermoplaste aus pflanzlichen Naturfasern kann in einem „Downcyclingprozess“ erfolgen. Die Bauteile werden nach Gebrauch geschreddert. Hierbei entsteht ein thermoplastisches Granulat, verstärkt mit kurzen Naturfasern bzw. Naturfaserbündeln (Fölster 1994). Eine Verarbei-

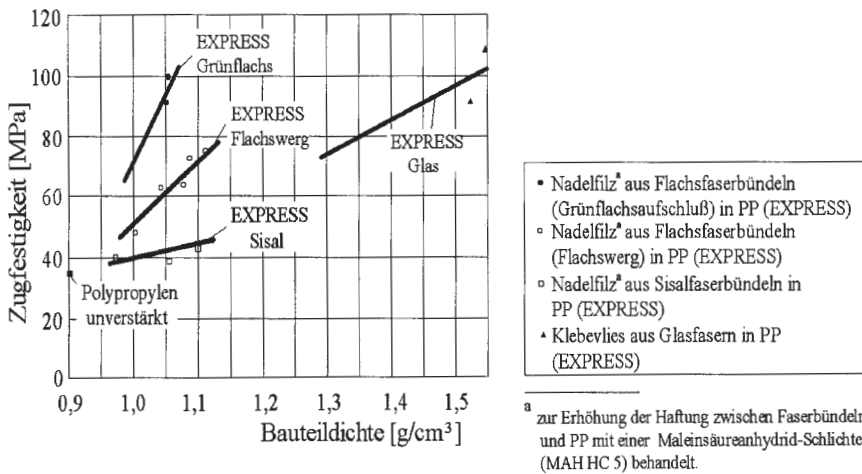


Abb. 4-6: Zugfestigkeit bezogen auf die Bauteildichte (Fölster 1994)

tung des Granulats in üblichen Kunststoffverarbeitungsmaschinen ist wegen der vergleichsweise geringen abrasiven Eigenschaft der Flachsfasern maschinenschonend durchführbar. Da die Zersetzungsercheinungen der Flachsfasern erst ab ca. 280 Grad Celsius einsetzen, werden sie durch die bei der Verarbeitung auftretenden hohen Temperaturen nicht geschädigt und können somit relativ unproblematisch weiterverarbeitet werden (Michaeli et.al. 1993, S. 316).

Seit Dezember 1994 werden neuartige Türinnenverkleidungen der Mercedes C-Klasse in Serienfertigung hergestellt. Hierbei werden Nadelfilze aus Flachs- und Sisalfasern mit Epoxidharz getränkt. Durch den Einsatz der Naturfasern sind die neuen Türinnenverkleidungen um 20 Prozent leichter als die konventionellen Bauteile und bieten darüber hinaus einen erhöhten Aufprallschutz, da sie beim Aufprall nicht zersplittern (Daimler-Benz 1995, S.10).

Nadelfilze aus Hanffasern werden seit Mitte 1996 zur Verstärkung von Polyurethan eingesetzt. Ein Automobilzulieferer fertigt daraus die Deckel für den Beifahrerairbag von Personenkraftfahrzeugen eines deutschen Automobilherstellers. Die Verwendung der Naturfasern und die damit verbundene Substitution von Glasfasern wurde vom

Betriebsrat aus Arbeitsschutzgesichtspunkten gefördert (nova-Institut 1996).

4.2.3.2 Synthetische Werkstoffe

Die wesentlichen Entwicklungen auf dem Gebiet der Polymerwerkstoffe sind charakterisiert durch die gezielte Herstellung von supermolekularen Strukturen aus Standardmonomeren. Ziel ist es, Werkstoffe mit verbesserten und maßgeschneiderten Eigenschaften einstellen zu können, die darüberhinaus noch kostengünstig und einfach verarbeitbar sind. Zur gezielten Herstellung von supermolekularen Strukturen werden zwei Wege eingeschlagen:

- Durch neuartige Produktionsverfahren der kontrollierten Polymerisation können Standard-Monomerbausteine mit hoher Präzision und Wiederholgenauigkeit verknüpft werden.
- Durch spezielle Verarbeitungstechnologien können neuartige Blends und Materialverbunde hergestellt werden (mehrphasige Werkstoffe).

Schwerpunkt stellen, wie oben genannt, die Anwendung von Standardmonomerbausteinen dar, deren Potential im Polymerwerkstoff unter Beibehaltung der einfachen Verarbeitungsfähigkeit und der kostengünstigen Ausgangsstoffe, wesentlich erweitert werden kann.

Auf folgenden Gebieten liegen intensive Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten vor bzw. werden erwartet:

Kontrollierte Polymerisation

Durch die Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Katalysatoren kann eine gesteuerte Herstellung von einheitlichen Polymeren und damit die gezielte Beeinflussung der Polymereigenschaften erreicht werden.

Beispiel hierfür sind Metallocen-Katalysatoren, die z.B. bei der Polymerisation der Standardkunststoffe Polypropylen und Polystyrol zu einer deutlichen Erweiterung des Eigenschaftsprofils führen.

Mehrphasige Werkstoffe

- Durch kontrollierte Phasenseparation kann die Ausbildung von supermolekularen Architekturen mit gezielten Werkstoffeigenschaften erreicht werden.
- Durch reaktives Verarbeiten bzw. Blenden wird eine chemische Reaktion an Grenzflächen erreicht. Dies führt bei unverträglichen Polymerkomponenten sowie anorganischen Füll- und Verstärkungsstoffen zur Verbesserung der Phasenbindung und damit der Werkstoffeigenschaften.
- Die Erhöhung der Steifigkeit und Festigkeit wird zumeist durch Fasern und Füllstoffe erreicht. Die bekannten Technologien sind unter dem Aspekt der Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit weiterzuentwickeln.
- Ein interessantes Potential weisen molekulare Verbundmaterialien auf, bei denen durch polymere Gerüststrukturen eine Matrixverstärkung von Standardpolymeren erzielt werden kann, die u.a. zu einer Erhöhung der Glasstemperatur führt.

Weitere Entwicklungsgesichtspunkte

Unter dem Aspekt von Umwelt und Recycling ist die Weiterentwicklung von kostengünstig verfügbaren bioabbaubaren Biopolymeren aus nachwachsenden Rohstoffen eine Aufgabe.

4.2.4 Verbundwerkstoffe / Stoffverbunde

Die Kombination verschiedener Materialien in einem Verbund ermöglicht eine gezielte Einstellung der mechanischen, thermischen und

elektrischen Eigenschaften, wodurch Materialgruppen mit deutlich unterschiedlicher Funktion erhalten werden können. Neben Schichtverbunden besitzen partikel- und faserverstärkte Verbundwerkstoffe ein wesentliches Anwendungspotential. Verbundwerkstoffe finden ihren Einsatz vor allem als Strukturwerkstoffe, aber auch z.B. in der Elektrotechnik und Mikroelektronik.

4.2.4.1 Metallmatrix-Verbundwerkstoffe

Für weiche (duktile) Matrices werden meist harte, hochfeste und hochsteife Verstärkungsphasen in Teilchen und Faserform zur Verbesserung der Festigkeit und der Steifigkeit benutzt (dies gilt generell für Faserverstärkte Kunststoffe und auch für die meisten verstärkten Metallmatrices). Die Verstärkungskomponente kann sich auf die Eigenschaften des Verbundes jedoch sowohl positiv, als auch negativ auswirken. So ist die Faserverstärkung von Metallen mit einem signifikanten Verlust an Duktilität verbunden, die meisten anderen mechanischen Eigenschaften, wie z.B. die Warmfestigkeit, Ermüdungsfestigkeit und Reibfestigkeit werden deutlich verbessert. Beim Einsatz langfaserverstärkter Bauteile ist die Anisotropie der Eigenschaften zu berücksichtigen: der Gewinn an Verstärkung in Faserrichtung geht meist mit einem Verlust dieser Eigenschaften senkrecht dazu einher. Als Verstärkungskomponente von Metallegierungen werden Fasern und Partikel auf der Basis von Kohlenstoff, Aluminiumoxid, Aluminiumsilikaten und Siliziumkarbid verwendet. Die Wahl der Verstärkungskomponente für eine Legierung ist kritisch für die Verbundeigenschaften und hängt sowohl von den angestrebten mechanischen Eigenschaften, als auch von der Benetzbarkeit der Fasern und der zu erwartenden Grenzflächenreaktion bei der Verbundherstellung ab. Eine besondere Bedeutung hat vor allem die Faserverstärkung von leichten und duktilen Aluminium-, Magnesium- und Titanlegierungen erhalten, bei denen eine erhebliche Steigerung der spezifischen Festigkeit und Steifigkeit in Faserrichtung erzielt werden konnte. Bei der Verstärkung hochfester, meist spröder Matrices dienen

die dann meist faserförmigen Verstärkungen weniger zur Erhöhung der Festigkeit, sondern vor allem zur Verbesserung der Schadenstoleranz, d.h. zur Vermeidung eines katastrophalen Versagens.

Für kurzfaserverstärkte Metallmatrices sind erste substantielle technische Anwendungen im Motorkolben von Dieselmotoren mit dem Grundwerkstoff aus einer Al-Si-Legierung und einem nichtausgerichteten Gewebe aus Aluminiumoxid- oder Aluminiumsilikatfasern zur Verstärkung gefunden worden. Durch eine lokale Faserverstärkung in Kolben aus Aluminiumgußlegierungen wird eine Erhöhung der Abriebfestigkeit der Kolbenwand und eine verbesserte Warmfestigkeit für die Verbrennungsmulden erhalten. Lokale Aluminiumoxid-Langfaserverstärkung wird beim Motorpleuel aus Aluminiumlegierungen angestrebt. In der Luft- und Raumfahrt kommt der Langfaserverstärkung von Titanlegierungen besondere Bedeutung zu. Aufgrund ihrer hohen spezifischen Festigkeit, Steifigkeit und Warmfestigkeit sind sie für den Einsatz als Zellenwerkstoff von wiederverwertbaren Raumfahrzeugen und als alternative Kompressormaterialien in Flugturbinen vorgesehen. Während ungerichtete Faserverstärkung ökonomisch auch für Massenartikel einsetzbar ist, beschränken die hohen Kosten der Hochleistungsfasern und der Verarbeitung den Einsatz der Metallmatrix-Verbundwerkstoffe mit gerichteten Langfasern auf wenige technische Systeme, in denen damit ein hoher Wertgewinn erzielt wird.

Die Herstellungsmethoden und die daraus resultierende Qualität der faserverstärkten Metallmatrix-Verbundwerkstoffe umfassen ein breites Spektrum. Ungerichtete Faserformkörper, die mit einem Binder verklebte Kurzfasern enthalten, und Fasergewebe werden bevorzugt im Druckgußverfahren mit einer Metallschmelze infiltriert. Partikelverstärkung von Metallen erfolgt überwiegend durch Sprühkompaktierung oder auf pulvermetallurgischem Wege. Langfaserverstärkte Titanlegierungen werden durch Heißpressen oder heißisostatisches Pressen von Folien und Faserlagen erhalten. Für eine lokale Faserverstärkung von Kompressorbauteilen eignet sich besonders ein Verfahren, bei dem die Fasern mit Matrix beschichtet werden und diese

dann zum Wickeln von Bauteilen und deren Verdichten durch heißisostatisches Pressen eingesetzt werden. Die Kombination einer keramischen Faser mit einer Metallegierung führt beim Herstellen und später beim Einsatz des Verbundes bei höheren Temperaturen zu einer verbundschädigenden Reaktion zwischen Faser und Matrix, die durch geeignete Maßnahmen, wie z.B. Faserschutzschichten (z.B. Kohlenstoff/SiC-Schichten auf SiC-Endlosfasern) verhindert werden müssen.

Die Partikelverstärkung z.B. von Al-Legierungen verbessert primär die Steifigkeit und die Abriebbeständigkeit. Eine Steigerung der Festigkeit ist nur in begrenztem Umfang möglich. Mit zunehmendem Volumenanteil der Partikel (mit Durchmessern zwischen 5 und 30 μm ; meist SiC oder Aluminiumoxid) nimmt allerdings auch die Verformbarkeit und Schadenstoleranz der Verbundwerkstoffe drastisch ab. Mit dem Zusatz der keramischen Teilchen lassen sich auch einige physikalische Eigenschaften, wie der Ausdehnungskoeffizient und die Wärmeleitfähigkeit steuern. SiC-partikelverstärkte Aluminiumlegierungen haben daher Anwendung im Bereich des „thermal managements“ integrierter Schaltkreise der Mikroelektronik, bei hochsteifen dünnen und leichten Bauteilen wie im Fahrradrahmenbau und bei leichten, steifen, abriebfesten Maschinenkomponenten wie Pleuel im Rennwagenbau gefunden.

Eine Verstärkung mit einigen Volumenprozent an keramischen Dispersoidpartikeln mit Partikeldurchmessern zwischen 50 und 300 nm hat vollkommen andere Auswirkungen auf das mechanische Verhalten des Verbundwerkstoffs als die Verstärkung mit gröberen Teilchen im μm -Bereich. Die kleinen Partikel haben in metallischen Matrices dieselbe Wirkung wie nichtschneidbare intermetallische Ausscheidungen dieser Größenordnung. Sie verhindern die Versetzungsbewegung und damit die plastische Verformung. Während allerdings Ausscheidungsteilchen sich mit steigender Temperatur auflösen und damit wirkungslos werden, bleiben die meist oxidischen Dispersoidpartikel auch bei hohen Temperaturen stabil in der Metallmatrix erhalten. Die Verstärkung mit Dispersionen auf oxidischer oder anderer keramischer Basis verbessert daher drastisch die Kriechbeständig-

keit vieler Metallmatrices. Beispiele der Anwendung sind Al_4C_3 -verstärkte Aluminiumlegierungen (z.B. Dispal) und ZrO_2 -verstärkte Ni-Basis-Superlegierungen (z.B. MA6000).

4.2.4.2 Keramik/Glasmatrix-Verbundwerkstoffe

Es ist ein klassischer Irrtum, daß keramische, monolithische Werkstoffe durch die Verstärkung mit ebenfalls hochfesten, jedoch selbst nicht duktilen Bestandteilen, duktilisierbar seien. Durch die Verstärkungsphasen kann jedoch z.B. durch Reißablenkung ein sich mit der Reißlänge erhöhender Reißfortschrittswiderstand eingestellt werden, der zu einer gewissen Erhöhung der Restfestigkeit keramischer Bauteile und damit zu einer Erhöhung der Schadenstoleranz führt. Diese ist in der Regel aber mit einer geringeren mechanischen Festigkeit des Ausgangswerkstoffes verbunden. Man unterscheidet zwischen

- partikelverstärkten Werkstoffen,
- laminatverstärkten Werkstoffen und
- faserverstärkten Werkstoffen.

Verstärkte Keramikmatrix-Werkstoffe werden auch als CMC bezeichnet (CMC = Ceramic Matrix Composite).

Die Partikel-(Teilchen)Verstärkung von oxidischen, nitridischen und boridischen Matrices ist Stand der Technik. Die meist aufwendigen Herstellungsverfahren, die mit dem Einbringen von Fremdphasen verbunden sind, erlauben eine energieabbauende Ablenkung des Risses oder ähnliche Effekte. Zur Zeit werden die partikelverstärkten keramischen Werkstoffe mehr und mehr durch monolithische Materialien mit anisotrop (z.B. stengelig) gewachsenen Kristallen ersetzt, wodurch sich eine gewisse Wahrscheinlichkeit von Reißablenkung an den Korngrenzen ergibt („Selbstverstärkung“).

Laminat-Werkstoffe sind lagenförmig aus unterschiedlichen Komponenten aufgebaut ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$; $\text{YPO}_4/\text{ZrO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$), wobei zumindest eine Phase strukturell und gefügemäßig für energieverzehrende Mechanismen wie Reißablenkung und Schichtdelamination

besonders geeignet sein sollte. Laminatwerkstoffe zeigen z.T. ausgezeichnete Festigkeiten und Schadenstoleranzen, allerdings nur im Bereich von zweidimensionalen Beanspruchungen. Laminatwerkstoffe werden häufig mit Foliengießtechniken und anschließendem Heißpressen produziert.

Die sicher bedeutendste Gruppe der Keramik-Verbundwerkstoffe sind die faserverstärkten CMCs. Hierunter fallen kurz- und langfaserverstärkte Keramiken, wobei die letzteren von sehr viel größerer Bedeutung sind als die erstgenannten.

Kohlenstofffaserverstärkte Kohlenstoffmatrixen (CFC) sind seit längerem Stand der Technik. Sie werden aus verwebten Kohlenstofffaserbündeln hergestellt, die mit Kunststoff infiltriert und anschließend pyrolysiert werden. Je nach Herstelltechnik werden unterschiedliche mechanische Eigenschaften erhalten. Charakteristisch für diesen Verbundwerkstoff geringen spezifischen Gewichts sind die sehr hohen Festigkeiten bis zu höchsten Temperaturen von 2000°C, seine ausgezeichnete Schadenstoleranz und die hohe Wärmeleitfähigkeit. Nachteil ist die mangelnde Langzeitbeständigkeit in oxidierenden Atmosphären bei Temperaturen oberhalb 600°C. Mit Oxidationsschutzschichten versehene C/C-Bauteile haben Eingang beim thermischen Schutz beim Wiedereintritt von Raumflugkörpern, aber auch als hochbelastete Bremscheiben in Verkehrsflugzeugen und Rennfahrzeugen gefunden. Einen ähnlichen Anwendungsmarkt, aber auch vergleichbare Nachteile besitzen C/SiC- oder C/C-SiC Verbundwerkstoffe mit einer (Teil)matrix aus SiC. Im Vordergrund gegenwärtiger Entwicklungen stehen hier die Verbesserung der Herstellverfahren und die Verminderung der Oxidationsanfälligkeit durch Schutzschichten.

Die Herstellung langfaserverstärkter Keramiken mit oxidischer Matrix steht noch am Anfang der Entwicklung. Diese Werkstoffe sind von besonderem Interesse, weil viele potentielle Hochtemperaturanwendungen in oxidierender Atmosphäre ablaufen (z.B. Verbrennungsprozesse). Erste Anwendungen von z.B. mit Mullitfasern verstärkten

Mullitmatrices im heißen Abgasstrom von Turbopropantrieben erbrachten vielversprechende Ergebnisse. Für den Einsatz von Oxidfaser/Oxidmatrix-Werkstoffen für den thermischen Schutz z.B. von Flugzeugtriebwerksbrennkammern und für Brennkammern von stationären Gasturbinen bei Temperaturen von 1300 °C und höher werden allerdings noch Fasern mit hoher thermischer Stabilität benötigt. Ganz wesentlich ist auch die Entwicklung von langzeitbeständigen Faser/Matrix-Grenzschichten, die einerseits eine Reaktion zwischen Faser und Matrix verhindern, andererseits aber auch energieverzehrende Mechanismen wie Rißablenkung und „Faser-Pull-out“ erlauben.

4.2.4.3 Schichtverbundwerkstoffe

Werkstoffe aus mehreren Schichten unterschiedlicher Gruppenzugehörigkeit (Metalle, Keramik, Polymere) nennt man Schichtverbundwerkstoffe. Zu der Gruppe der Schichtverbundwerkstoffe sollen auch beschichtete und randschichtveränderte Werkstoffe gehören.

Klassische Entwicklungen wie ARALL bestehen aus dünnen Aluminiumblechen, die durch Lagen dünner aramidfaserverstärkter Kunststoffe verbunden sind. ARALL wurde durch das leistungsfähigere GLARE ersetzt, dessen Zwischenschichten aus glasfaserverstärktem Kunststoff bestehen. Schichtverbundwerkstoffe zeichnen sich durch eine exzellente Ermüdungsfestigkeit und dabei insbesondere ein Rißfortschrittsverhalten aus, bei dem ein Ermüdungsriß bei gleichbleibender Belastung durch die Schließkräfte der Glasfasern sogar zum Stillstand kommen kann. Ihr Nachteil ist der mehrfach höhere Preis gegenüber den monolithischen Aluminiumlegierungen.

Weitere Anwendungsbeispiele für Kombinationen zweier Werkstoffe in alternierenden Schichten sind Bauteile aus Stahl und Polymeren zur Schall- und Schwingungsdämpfung. Wie im Kapitel 4.2.3.1 bereits beschrieben wurde, kommen derartige Bauteile z.B. im Schiff-, Flugzeug-, Automobil- und Schienenfahrzeugbau zum Einsatz (GMT 1996a). Obwohl bei vielen Anwendungen die Dämpfung von Schwin-

gungen im Vordergrund steht, kann häufig auch eine Reduzierung der Schallemission erreicht werden. Bei der Verwendung von Naturkautschuk-Stahl-Bauteilen z.B. in Drehgestellen von Güterwagen wurde im Vergleich zu konventionellen Metallfederungen eine Reduzierung des Schallpegels um 7 dB erreicht (GMT 1996b). Durch Aufbringung von Dämpfungselementen aus Naturkautschuk und Stahl in alternierenden Schichten auf die Radscheiben eines modernen Nahverkehrszuges soll eine Reduzierung der Schallabstrahlung erreicht werden.

4.3 Langfristige Entwicklungstendenzen

4.3.1 Einleitung

Zukünftige Materialien und Werkstoffe mit neuartigen chemischen und physikalischen Eigenschaften können grundsätzlich nur auf zweierlei Weise erhalten werden:

- durch neuartige chemische Zusammensetzung,
- durch die Strukturweiterung bekannter oder neuer Materialien in Form von Nano-Bausteinen.

Die langfristige Entwicklung von Stoffen durch neuartige Atomkombinationen, also neue chemische Verbindungen, entzieht sich einer sinnvollen Beurteilung. Täglich werden weltweit tausende neuer Verbindungen synthetisiert, deren Eigenschaften in der Regel nicht genau vorhersagbar sind.

Anders verhält es sich mit der Erzeugung sog. Nano-Bausteine aus bereits existierenden Materialien. Dieser unter dem Begriff „Nanotechnologie“ bekanntgewordenen Entwicklung werden für künftige Materialentwicklungen, neben der Weiterentwicklung herkömmlicher Werkstoffe und Verbundwerkstoffe, die größten Chancen eingeräumt (Schmid et.al. 1996).

Das Wesen der Nanotechnologie ist der Materieaufbau aus Nanopartikeln, d.h. Teilchen im Größenbereich von 10^{-9} m (nm). Partikel dieser Größe, gleichgültig welcher chemischen Zusammensetzung, weisen sowohl gegenüber molekularen Strukturen (Sub-Nanometerbereich) als auch gegenüber Bulkmaterialien, mit typisch makroskopischem Aufbau, grundsätzlich veränderte Eigenschaften auf (Ozin 1992, Schön et.al. 1995a,b, Schmid 1992). Dies hat einen allgemeingültigen physikalischen Grund: Die Bulkeigenschaften eines Materials, ob flüssig oder fest, kommen erst ab einer gewissen räumlichen Ausdehnung zustande. So treten beispielsweise typische Eigenschaften eines Metalls wie elektrische und thermische Leitfähigkeit, Magnetismus, Schmelz- und Siedepunkt erst auf, wenn viele tausend Atome zusammenwirken. Umgekehrt kann aus einem Metall ein Halbleiter, aus einem Halbleiter ein Nichtleiter werden. Ein silberglänzendes Bulk-Metall bildet gelbe, rote, violette Nanoteilchen. Selbst Flüssigkeiten wie Wasser können ihre typischen Eigenschaften erst entwickeln, wenn eine genügende Anzahl von Molekülen im Verbund wechselwirken können. Im Nanometerbereich ist dies nur bedingt der Fall. Die meisten Eigenschaften sind anders als im Bulk, aber auch anders als auf molekularer Basis. Im Nanometerbereich befindet man sich in einem Bereich zwischen der Welt der Atome und Moleküle und der Welt des unendlich ausgedehnten Zustands. Folgerichtig sind auch die Eigenschaften eines Materials, das aus Nanoteilchen aufgebaut ist, anders als die eines Materials gleicher chemischer Zusammensetzung aber mit Bulkeigenschaften, sofern der individuelle Charakter der Nanopartikel im Verbund erhalten bleibt.

Im folgenden wird versucht, anhand des gegenwärtigen Kenntnisstandes mögliche Entwicklungen aufzuzeigen, in denen die Nanotechnologie eine maßgebliche Rolle spielen wird. Es wird zwischen Konstruktions- und Funktionswerkstoffen unterschieden.

4.3.2 *Konstruktionswerkstoffe*

Die folgenden Einsatzgebiete von Nanomaterialien lassen sich derzeit als besonders attraktiv und praxisrelevant für Verkehrssysteme erkennen:

4.3.2.1 *Keramiken*

Keramiken herkömmlicher Art bestehen aus oxidischen oder nicht-oxidischen anorganischen Stoffen, dadurch charakterisiert, daß der gesamte Keramikkörper aus einem amorphen oder polykristallinen, in seltenen Fällen auch aus einem monokristallinen Atom- oder Ionenverband besteht.

Keramiken aus Nanobausteinen sind dagegen aus Nanopartikeln mit ihren veränderten Eigenschaften zusammengesetzt. Durch die Nanobausteine werden nicht nur deren größenbedingte Eigenschaften an das Material weitergegeben. Aus der praktisch unendlichen Zahl von Korngrenzen ergeben sich z.B. niedrigere Sintertemperaturen, sowie wertvolle Verformbarkeitseigenschaften, die bei herkömmlichen Keramiken praktisch wegfallen.

4.3.2.2 *Metalle und Legierungen*

Ebenso wie bei Keramiken sind die mechanischen Eigenschaften eines Metalls von dessen Mikrostruktur, d.h. von submikroskopischen Defekten, Kristallitorientierungen und -größen, sowie der Zahl der Korngrenzen, in Verbindung mit den entsprechenden Herstellungsverfahren abhängig. So können aus Nanoteilchen aufgebaute, metallische Werkstoffe z.B. superhart gemacht werden.

4.3.2.3 Nanokomposite

Die Verwendung von Nanokeramik- und Nanometallpartikeln gestattet deren kontinuierliches Mischen zu neuartigen Verbundwerkstoffen, in denen sich die Eigenschaften beider Nanoteilchen wie z.B. Verformbarkeit, elektrische Leitfähigkeit, hoher Widerstand u.a. wiederfinden. Die Kombination Metall/Polymer über Nanopartikel kann die Werkstoffeigenschaften der einzelnen Komponente drastisch verändern. Aus Abb. 4-7 geht die gegenwärtige Einschätzung der Bedeutung dieser Nanotechnologiebereiche hervor (BMBF 1996).

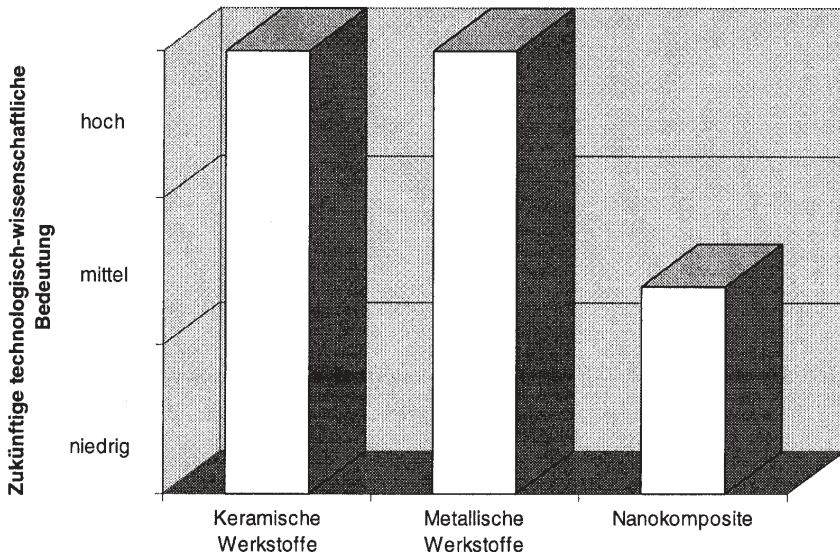


Abb. 4-7: Diagramm zur Bedeutung von nanostrukturierten Konstruktionswerkstoffen⁴

Die ‚klassischen‘ Werkstoffe, Keramiken und Metalle, werden in ihrer Bedeutung gleich hoch eingeschätzt. Nanokompositen wird bereits eine mittlere Bedeutung zugemessen.

⁴ Dieses und die folgenden Diagramme beruhen auf der Auswertung einer Expertendiskussion des BMBF mit dem Thema „Innovationsschub aus dem Nanokosmos?“ vom Juni 1996.

4.3.3 Funktionswerkstoffe

Die zweite Gruppe der Werkstoffe umfaßt die Funktionswerkstoffe. Diese können ebenso wie die strukturmöglichenden Materialien massiv im Sinne eines dreidimensionalen Funktionskörpers sein, insbesondere sind aber die durch Oberflächenmodifizierung zugänglichen funktionalen Werkstoffe von Bedeutung (2-dim). Daher basieren innovative Funktionswerkstoffe nicht ausschließlich auf der Nanostruktur bekannter Materialien, sondern insbesondere auf der Beschichtung und Strukturierung in sich nicht zwangsläufig funktionaler Träger (Schöllhorn 1996). Nachfolgend sind daher zunächst zukunftsrelevante Beschichtungs- und Strukturierungsverfahren aufgezeigt, bevor Einsatzfelder funktionaler Werkstoffe umrissen werden.

4.3.3.1 Beschichtungs- und Strukturierungsverfahren

Beschichtungsverfahren

Im Bereich der Beschichtungen kann zwischen Physical Vapour Deposition (PVD)- und Chemical Vapour Deposition (CVD)-Verfahren unterschieden werden. Unter dem Begriff PVD summieren verschiedene Vakuumbeschichtungsverfahren. Dabei wird das aufzubringende Material durch Zerstäuben oder durch „Beschuß“ vom Target abgetragen. Ziel neuer Entwicklungen muß es sein, die Beschichtung hinsichtlich ihrer Zusammensetzung, Nanostruktur und Schichteigenschaften (Dicke, Homogenität, ...) zu steuern.

Die Kontrolle der Zusammensetzung im Falle der Beschichtungen mit chemischen Verbindungen (z.B. Borid- oder Carbid-Verschleißschichten) erlaubt die CVD unter Verwendung speziell synthetisierter molekularer Precursor (Bochmann 1996).

Neben diesen in vielen Teilen bereits technisch realisierten Beschichtungsverfahren erlangen Methoden wie das Self-Assembling an Bedeutung (Philip/Stoddart 1996, Rühle 1994, Weller 1996). Hier

erfolgt die selektive Bildung molekularer Monolagen aufgrund chemischer Wechselwirkung zwischen Substrat und Beschichtungsmaterial. Derartige Methoden sind hoch spezifisch hinsichtlich der erzeugten Struktur.

Strukturierungsverfahren

Die Bildung nanostrukturierter Oberflächen ist zweifellos eine grundlegende Neuerung in der Erzeugung und Verbesserung funktionaler Beschichtungen (Rühe 1994). Durch die gezielte, hochgeordnete Anordnung von Nanopartikeln auf beliebigen Oberflächen ist neben der Materialeinsparung in vielen Fällen eine Steigerung des Oberflächeneffekts und damit der Funktion verbunden.

Die Grenze bisheriger Strukturierungsverfahren ist mit der Miniaturisierungsgrenze der Werkzeuge in absehbarer Zeit erreicht (Prentiss et.al. 1996). Daher werden neue Verfahren, wie Rastersondenmethoden oder die physikalisch-chemische Strukturierung an Bedeutung zunehmen (Bonnell 1993, Fann et.al. 1996, Lieber et.al. 1996, Ricken et.al. 1996, Sarid/Elings 1991, Snyder 1992, Wiesendanger 1994).

In der nachstehenden Abb. 4-8 sind die zuvor beschriebenen Verfahren hinsichtlich ihrer Bedeutung in Industrie und Wissenschaft eingeordnet (BMBF 1996).

Den Strukturierungsverfahren wird eine wesentlich höhere Bedeutung gegenüber den klassischen Beschichtungsverfahren zugemessen. Daß die technisch wesentlich weiter entwickelten PVD- höhere Bedeutung gegenüber den CVD-Verfahren besitzen, überrascht nicht. Dennoch wird die Bedeutung gerade der CVD-Verfahren mit der Anzahl der zugänglichen Precursor stark zunehmen.

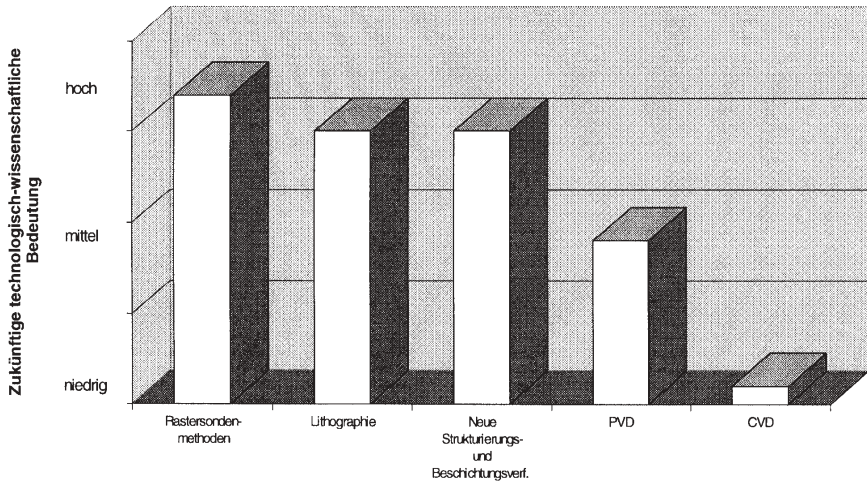


Abb. 4-8: Diagramm zur Bedeutung der Beschichtungs- und Strukturierungsverfahren

4.3.3.2 Optische Funktionswerkstoffe (Corriu/Leclercq 1996, Ostertag 1994)

Optische Funktionswerkstoffe umfassen im wesentlichen beschichtete Gläser. Diese zeigen besondere Eigenschaften hinsichtlich

- der Absorption und Reflexion von Licht oder IR-Strahlung
- des Verhaltens im elektrischen Feld
- der mechanischen Belastbarkeit
- ...

So können kratzfeste und beschlagfreie Windschutzscheiben ebenso wie lichtreflektierende aber IR-transparente Wärmeschutzverglasungen zukünftig Anwendungen in Verkehrssystemen finden. Darüber hinaus ermöglichen elektrochrome Beschichtungen die Herstellung ultradünner, in der Frontscheibe integrierter Displays.

4.3.3.3 Grenzflächenwirksame Funktionswerkstoffe

Gemeint sind Werkstoffe, welche die Adhäsion zweier Grenzflächen verändern. Dabei stehen zwei grundsätzlich verschiedene Zielrichtungen im Blickpunkt der Entwicklungen. Es sind dies die Adhäsionssteigerung (Klebe- und Haftvermittlungstechniken) und die Adhäsionsverringering (Reibung).

Adhäsionssteigerung

Haftvermittlungstechniken umfassen chemische und physikalische Verfahren. Insbesondere vor dem Aufbringen (ultra-) dünner Schichten sind vielfach Vorbehandlungen der Oberflächen erforderlich. Diese sind eng verbunden mit den zuvor beschriebenen Strukturierungsverfahren, da die selektive Modifizierung einer Oberfläche mit Haftvermittlern Basis einer eben solchen strukturierten Beschichtung sein kann.

Die Entwicklung neuartiger Haftvermittler ist jedoch insgesamt stark system- und problemorientiert (z.B. die Lackierung von und Lackhaftung auf Polypropylen-Formteilen im Automobilsektor).

Klebertechniken ermöglichen die Verbindung verschiedenster, ansonsten nicht kompatibler Materialien. Hier wird die Oberflächenbehandlung zukünftig weiterhin unstrukturiert erfolgen. Ziel wird es sein, die Verklebung bislang schlecht bzw. nicht dauerhaft zu verbindender Materialien durch neuartige Klebstoffe oder Klebertechniken zu ermöglichen.

Adhäsionsverringering

Die Verringerung von Haft- und Gleitreibung ist verbunden mit einer Standzeitsteigerung der Werkstücke. Durch nanotribologische Schutzschichten, ultraglatte Oberflächen o.ä. kann unter Verzicht auf

Schmiermittel die Standzeit insbesondere von Gleitlagern erhöht und deren Anwendungsbereich vergrößert werden.

4.3.3.4 Sensoren, Detektoren und Katalysatoren (Göpel 1995)

Sensoren und Detektoren

Die Steuerung komplexer technischer Prozesse (Kraftstoffverbrennung, Bremsregelung, Dämpfung und Federung, Steuerung von Sicherheitssystemen usw.) erfordert die exakte Kenntnis einer Vielzahl verschiedener Parameter. Neben der reinen Erweiterung der Anwendungsbereiche von Sensoren und Detektoren steht insbesondere deren Miniaturisierung und direkte Integration in elektronische Regelkreise im Vordergrund. Hohes Potential besitzen hier neben nanoporösen Festkörpern sensorische Schichten, die auf (beliebigen) Substraten einsetzbar wären. Darüber hinaus kann der Multischichtaufbau die Detektion verschiedenster Parameter simultan an einem (beliebig) kleinen Ort gestatten.

Katalysatoren

Das weite Feld der Katalysatoren nimmt außerordentlichen Aufschwung durch die Verwendung von nanostrukturierten Festkörpern, da katalytische Vorgänge immer oberflächenabhängig sind. Es sind hier nicht nur verstärkte sondern zudem auch neue katalytische Effekte zu erwarten. In wie weit diese zukünftig neue technische Entwicklungen auslösen ist z.Zt. nur schwer einschätzbar.

4.3.3.5 Sonstige

Die zuvor beschriebenen Gruppen umfassen sicherlich die Hauptzahl funktionaler Werkstoffe. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl funktionaler Werkstoffe, die

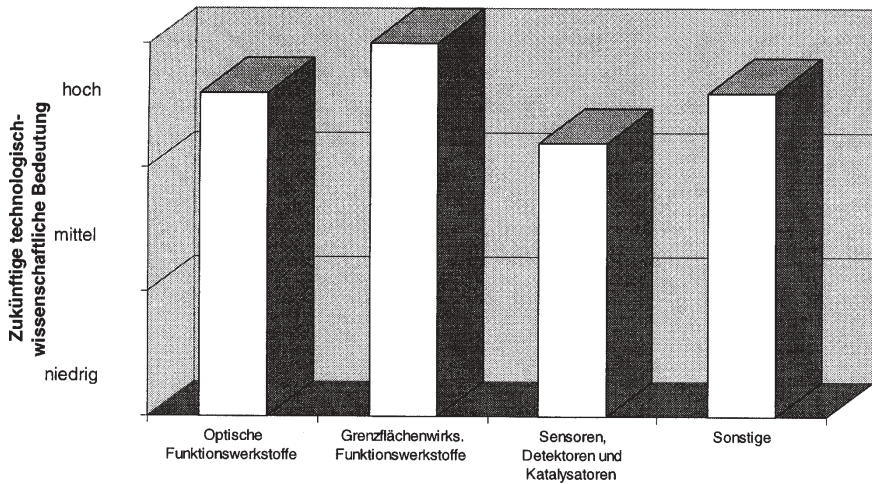


Abb. 4-9: Diagramm zur Bedeutung funktionaler Werkstoffe

- zur Herstellung hochkompakter Batterien
- zum Korrosionsschutz
- zur Gasspeicherung für Verbrennungsmotoren
- ...

eingesetzt werden. Diese Technologien werden durch die Nanostrukturierung z.T. erst ermöglicht oder aber entscheidend verbessert. So kann das Volumen eines Gasspeichers durch die Verwendung nanoporöser Feststoffe außerordentlich vergrößert oder die Standzeit beschichteter, korrosionsgeschützter Werkstoffe erhöht werden.

Abb. 4-9 faßt die Bedeutung funktionaler Werkstoffe für Industrie und Wissenschaft zusammen (BMBF 1996).

Funktionale Werkstoffe besitzen eine nahezu einheitlich hohe Bedeutung in Industrie und Wissenschaft.

5 Gegenwärtiger Materialeinsatz in Verkehrssystemen

5.1 Straßenverkehr / Automobil

5.1.1 Einleitung

Die Automobilentwicklung steht im Spannungsfeld zwischen Ökonomie, Technologie und Ökologie, wobei die Schwerpunkte in den letzten Jahren folgendermaßen gesetzt waren:

- Die Ökonomie, d.h. Kostenreduzierung ist zunehmend in den Vordergrund gerückt. Deutsche Firmen haben bei den Produktionskosten wieder Anschluß an den Weltstandard gefunden. Dies wurde erreicht durch Verkürzung der Entwicklungszeiten, kostenoptimierte Produktgestaltung und Fertigung sowie kostenbewußte Werkstoffauswahl.
- Die Ökologie hat an Bedeutung gewonnen und in zunehmendem Maße Einfluß auf die Entwicklungsziele genommen.
- Auf dem Gebiet der Technologie lag die Priorität auf der Umsetzung und Weiterentwicklung bestehender Verfahren und weniger auf der Entwicklung neuer Technologien.

Nachfolgend sind, unter besonderer Berücksichtigung des Werkstoffaspektes, einige übergeordnete Gesichtspunkte aufgeführt, die in den letzten 5 bis 10 Jahren in der Automobilentwicklung wirksam waren.

Verkürzung der Entwicklungszeiten

Wesentliches Ziel war die Verkürzung von Entwicklungszeiten, um schneller auf Veränderungen von Marktgegebenheiten reagieren, d.h. häufiger Modellveränderungen durchführen zu können. Dies wurde realisiert durch simultaneous engineering, Anwendung von Simulationsverfahren und Einbeziehung von Systemlieferanten. Die Verkürzung der Entwicklungszeiten läßt jedoch nur begrenzt eine Erprobung neuer Werkstoffsysteme zu und behindert somit in gewissem Umfang

den Einsatz innovativer Materialien und Technologien.

Kostenoptimierung der Fertigung

Im Rahmen intensiver Anstrengungen zur Kostenreduzierung konnten folgende Tendenzen beobachtet werden: Konzentration auf Kerngeschäfte mit zunehmender Verringerung der Fertigungstiefe, zunehmender (weltweiter) Fremdbezug, Aufforderung an Zulieferer, sich zu Systemlieferanten weiterzuentwickeln. Diese Tendenzen führten einerseits weltweit zu einer Angleichung im technischen Niveau von Produkten, andererseits ging mit dem zunehmenden Fremdbezug eine Reduzierung der zuvor breit angelegten werkstofforientierten Forschungs- und Entwicklungsaktivität in den Automobilfirmen einher.

Werkstoffe / Werkstofftechnik

Die Entwicklungen auf dem Gebiet des Werkstoffeinsatzes waren im wesentlichen geprägt durch die Forderung nach Kosten- und Gewichtsreduzierung. Die Aufgabe der Werkstofftechnik bestand in der Unterstützung bei der Kostenreduzierung von Produkten und Prozessen.

Innovative Werkstoffentwicklungen und innovativer Einsatz von Werkstoffen wurden kaum realisiert. High-Tech-Werkstoffe wie Hochleistungsverbundwerkstoffe, Keramik- oder metallische Hochtemperaturwerkstoffe fanden keine oder nur geringfügige Anwendung.

Umwelt und Recycling

Die Begrenztheit der Ressourcen und die Gefährdung der Umwelt sind im letzten Jahrzehnt verstärkt in das Bewußtsein der Politik und der Öffentlichkeit getreten. Dies hat insbesondere Fragen der Motorabgastechnik berührt. Der Kraftstoffverbrauch konnte ebenfalls durch Fortschritte in der Motortechnik – vielfach sogar bei noch gesteigerter Motorleistung – reduziert werden.

Durch den zunehmenden Einsatz von Kunststoffen hat das Recycling von Polymerwerkstoffen im Rahmen der Altfahrzeugverwertung an Bedeutung gewonnen. Nach dem Nachweis der Recyclingfähigkeit der Polymerwerkstoffe sowie durch den geplanten Recyclateinsatz in Neufahrzeugen hat sich die Diskussion um dieses Thema allerdings wieder beruhigt, und der Kunststoffeinsatz im Fahrzeugbau stieg daraufhin wieder an.

Energie- und Kraftstoffkosten

Die Energiekosten machen einen erheblichen Teil der Herstellungskosten aus. Da in den letzten zehn Jahren die Energiekosten absolut betrachtet nahezu konstant geblieben sind, d.h. sich inflationsbereinigt sogar reduziert haben, ergaben sich daraus für die Werkstoffwahl und die Fertigungstechnik keine wesentlichen Impulse. Die steuerpolitisch bedingten Kraftstoffpreiserhöhungen haben lediglich einen begrenzten Beitrag zu einer Verbrauchsreduzierung geleistet. Diese Forderung konnte durch verbrauchsreduzierte Motoren weitgehend erfüllt werden.

5.1.2 Allgemeine Entwicklungsziele und deren Konkretisierung

Die Hauptproblembereiche infolge des motorisierten Individualverkehrs lassen sich in fünf Punkten zusammenfassen (Menne et.al. 1995):

- Schadstoffemission
- Geräuschemission
- Verkehrsfluß
- Energieverbrauch, CO₂-Emission
- Rohstoffverbrauch, Abfallbeseitigung, Recycling

Diese Punkte stimmen nur z.T. mit den von der Automobilindustrie beschriebenen Haupteinflußfaktoren der Produktentwicklung überein:

- Marktwünsche
- Technologietrends
- Gesetzgebung
- Kostenoptimierung/-reduzierung

In der Vergangenheit wurden unterschiedliche Schwerpunktaufgaben der Automobilentwicklung aufgegriffen (Braess 1993) (Abb. 5-1).

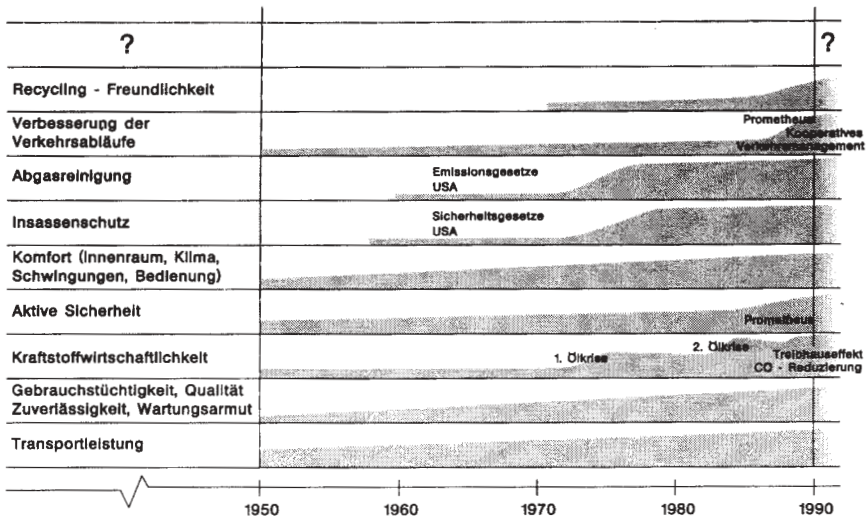


Abb. 5-1: Automobilentwicklung – Beispiele für quantitative und qualitative Zunahme der Anforderungen (Braess 1993)

Die Schwerpunkte der heutigen Automobilentwicklung werden auf folgenden Feldern gesehen (Theissen et.al. 1992):

- Umwelt (Geräuschemissionen, Kraftstoffverbrauch, Abgasemissionen, Entsorgbarkeit)
- Umfeld (Vorschriften und Gesetze, Sozialverträglichkeit, Nutzbarkeit, Akzeptanz)
- Wirtschaft (Marktstrategie, Produktzyklen, Bedürfnisse der Kunden, Preise und Kosten, Wettbewerber)
- Technik (Fahrzeugkonzept, Antriebskonzept)

Hinsichtlich des Einsatzes und der Entwicklung von Werkstoffen im Automobil sind nachfolgende Kriterien relevant, wobei in den letzten Jahren die Punkte Leichtbau, Umweltschutz, Recycling, Ressourcen, Wirtschaftlichkeit und Rationalisierung an Bedeutung gewonnen haben (Braess et.al. 1988) (Tab. 5-1).

Tab. 5-1: Anforderungen an Werkstoffe (Braess et.al. 1988)

Leichtbau	Alterung	Verfügbarkeit
Festigkeit	Prüfbarkeit	Umweltschutz
Zähigkeit	Verarbeitbarkeit	Recycling
Thermische Eigenschaften	Qualitätssicherung	Wirtschaftlichkeit
Verschleißbeständigkeit	Reparaturfreundlichkeit	Rationalisierung
Korrosionsbeständigkeit		

5.1.3 Baugruppenspezifischer Werkstoffeinsatz

5.1.3.1 Motor und Antrieb

Pkw-Dieselmotoren

Dieselmotoren weisen gegenüber Otto-Motoren eine bessere Kraftstoffausnutzung auf. Dies ist gegenüber vergleichbaren Otto-Motoren mit einer ca. 20% geringeren CO₂-Emission verbunden. Allerdings bedarf es besonderer Maßnahmen, die Schadstoffemission (insbesondere Partikel, HC und NO_x) zu beschränken.

Dieselmotoren sind insbesondere in Kleinwagen vertreten (Deutschland: 61%). Steuerpolitische Maßnahmen sowie die Diskussion um die Gesundheitsgefährdung durch Partikelemission haben jedoch in Deutschland dazu geführt, daß der Anteil von Dieselfahrzeugen an Neuzulassungen z.T. erheblichen Schwankungen unterworfen ist.

Einen wesentlichen Entwicklungsschwerpunkt bei Dieselmotoren stellt die Begrenzung der Schadstoffemission gemäß gesetzlicher Vorgaben dar. Zur Lösung dieser Aufgabe werden verschiedene, sich ergänzende Maßnahmen eingesetzt.

Hinsichtlich der Emissionswerte und des Kraftstoffverbrauchs hat sich die Direkteinspritzung gegenüber dem Wirbelkammerverfahren als das günstigere Verfahren dargestellt und beginnt sich trotz Einbußen im Komfort durchzusetzen. Einen weiteren wichtigen Schwerpunkt der Dieselmotorenoptimierung stellt die Brennraumgestaltung dar. Hierbei kommen neuerdings auch Werkstoffneuentwicklungen wie faserverstärktes Aluminium für Kolben zum Einsatz.

Begleitend zu diesen motortechnischen Maßnahmen ist zur Erreichung der Emissions- und Verbrauchsziele ein elektronisches Dieselmotorenmanagement erforderlich, das ab ca. 1990 zunehmend Einsatz findet.

Die zuvor genannten Maßnahmen führten zu einer weitgehenden Reduzierung der Schadstoffemissionen bei Diesel-Pkws und erleichterten dadurch die Abgasnachbehandlung. So hat sich der Einsatz von Abgasrußfiltern als nicht notwendig erwiesen. Die Abgasbehandlung besteht in einer direkten Abgasrückführung mit anschließender katalytischer Nachoxidation zur Reduzierung der HC- und CO-Konzentration. Zwar werden die Rußpartikel durch den katalytischen Trockenvorgang gewichtsmäßig reduziert, das mögliche Gesundheitsrisiko durch die Rußpartikel bleibt jedoch weiterhin bestehen (Menne et.al. 1994).

Pkw-Otto-Motoren

Otto-Motoren haben bereits einen hohen Entwicklungsstand erreicht, konnten aber in den letzten Jahren auf einigen Gebieten noch weiterentwickelt werden.

Der Einsatz der Vierventiltechnik hat weite Verbreitung gefunden. Diese Technik gestattet einen schnelleren und vollständigeren Ladungswechsel, was wiederum zu einer Verbesserung der spezifischen Motorleistung und einer Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs führt. Gleichzeitig ist damit eine Reduzierung der Emissionswerte verbunden.

Bei der Ventilsteuerung fand ein tendenzieller Übergang von Kipphebeln auf Tassenstößel bzw. Schleppehebel statt. Zur Optimierung der Steuerzeiten wurden z.T. verstellbare Nockenwellen eingesetzt.

Zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs wird neben anderen Maßnahmen auch eine Minimierung der Reibleistung angestrebt. Dies erfolgt über die Steuerung (Tassenstößel bzw. Schleppehebel), die Kolben (Kolbenhöhe, Spannung der Kolbenränge) sowie über eine Reduzierung der Breite der Kurbelwellengleitlager.

Das elektronische Motormanagement hat weite Verbreitung gefunden und dient u.a. der Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der Abgasemission.

Zur Erfüllung der Abgasvorschriften wird die bekannte Katalysatortechnik eingesetzt. Ein Problem stellt derzeit noch die Emission in der Kaltstartphase dar. Eine Emissionsreduzierung wird z.B. durch elektrisch vorbeheizte Katalysatoren angestrebt (Brüggemann et.al. 1995).

Kurbelgehäuse

Das Kurbelgehäuse bestimmt wesentlich das Motorengewicht. Im Rahmen des Leichtbaus findet daher eine fortschreitende Substitution von Grauguß (GG) durch Aluminiumgußwerkstoffe statt. Dies betrifft insbesondere Otto-Motoren, in geringerem Maße Dieselmotoren.

Bei Al-Kurbelgehäusen stellt die verschleißfeste Zylinderlauffläche die wesentliche Herausforderung dar. Hierbei bestehen grundsätzlich drei unterschiedliche Konzepte:

- monolithische Kurbelgehäuse
- quasi-monolithische Kurbelgehäuse
- heterogene Kurbelgehäuse

Für kleine und mittlere Motoren haben sich das quasi-monolithische und das heterogene Al-Kurbelgehäuse durchgesetzt. Bei heterogenen Kurbelgehäusen kommen GG-Büchsen zum Einsatz. Bei quasi-monolithischen Kurbelgehäusen wird eine galvanisch aufgebraute Ni-Si-C-Dispersionsschicht eingesetzt. Dies stellt allerdings besondere Anforderungen an die Gußqualität und ist mit einem größeren anlagentechnischen Aufwand verbunden. Mittelfristig wird der Einsatz von Preformlingen aus Aluminiumoxidfasern mit eingelagerten Si-Partikeln zum Verschleißschutz der Zylinderoberflächen an Bedeutung gewinnen.

Bei quasi-monolithischen und heterogenen Kurbelgehäusen können leicht zu vergießende quasi-eutektische Al-Si-Legierungen eingesetzt werden (z.B. AlSi_9Cu_3). Die monolithischen Al-Kurbelgehäuse mit übereutektischen Legierungen (z.B. $\text{AlSi}_{17}\text{Cu}_4\text{Mg}$) werden im Niederdruckverfahren hergestellt und müssen anschließend zur Freilegung der Siliziumkristalle nachbehandelt werden. Die Anwendung dieses relativ teuren Herstellungsverfahrens beschränkt sich auf größere Motoren mit geringer Stückzahl (Köhler et.al. 1995a,b).

5.1.3.2 Werkstoffzusammensetzung von Personenkraftwagen

In der veröffentlichten Literatur liegen Angaben über die Werkstoffzusammensetzung von Pkws ausschließlich in Form von Schätzungen vor.

Die Werkstoffzusammensetzung im Automobil ist einer kontinuierlichen Veränderung unterworfen. Es interessieren dabei sowohl die absoluten Werte der Werkstoffhauptgruppen (Fe-Werkstoffe und deren Legierungen, Aluminium, Magnesium und Kunststoffe) als auch deren anteilige Veränderung. Desweiteren ist eine Tendenz in Richtung einer Verringerung der Werkstoffvielfalt zu verzeichnen.

Fe-Werkstoffe

Der Anteil der Fe-Werkstoffe ist zwischen 1985 und 1995 von ca. 65% auf 60% abgesunken. Bemerkenswert ist bei Stahlblechen der intensive Anstieg der höherfesten Bleche von 5% auf ca. 15%. Höherfeste Bleche werden im Karosserie- und im Fahrwerksbereich eingesetzt und tragen durch die höhere Materialausnutzung zu einer kostengünstigen Gewichtserleichterung von Fahrzeugen bei.

Über die Veränderung des Einsatzes von Eisengußwerkstoffen und Stahlschmiedeteilen liegen keine detaillierten Angaben vor. Tendenziell hat jedoch der Anteil von Schmiedeteilen zugenommen, was insbesondere auf die aus der Schmiedehitze vergütbaren Werkstoffe zurückzuführen ist. Bei Gußwerkstoffen ist ein tendenzieller Anstieg von hochfesten Gußlegierungen zu verzeichnen.

Al-Legierungen

Aufgrund von Leichtbauaspekten hat der Anteil von Aluminium im Automobil zugenommen. Der Einsatz von Aluminiumblechen beschränkt sich jedoch nach wie vor auf Fahrzeuge der Oberklasse. Zur Erreichung bestimmter Gewichtslimits findet Aluminium hier vielfach Anwendung in Anbauteilen der Karosserie, wie z.B. Türen und Heckdeckeln.

Im Motoren- und Getriebebereich hat der Einsatz von Aluminiumgußwerkstoffen zugenommen. Während vor ca. 10 Jahren Al-Kurbel-

gehäuse nur in großvolumigen Motoren zum Einsatz kamen, findet dieser Werkstoff neuerdings auch bei Mittelklassefahrzeugen Anwendung. Der Schwerpunkt liegt hier bei Otto-Motoren; der Einsatz bei Dieselmotoren ist aufgrund der Geräuschemission derzeit noch begrenzt. Bei Getriebegehäusen nimmt aus Gewichtsgründen der Anteil von Al-Gußwerkstoffen gegenüber Grauguß zu.

Im Bereich des Fahrwerks kommt Aluminium zunehmend bei Fahrzeugen der Oberklasse zum Einsatz und hat Fe-Werkstoffe (Bleche, Schmiedeteile, Gußteile) weitgehend ersetzt. Beim Fahrwerk führt der Einsatz von Aluminium neben der Reduzierung des Gewichts zu einer Reduzierung der zu beschleunigenden Massen und trägt somit zu einer Erhöhung von Sicherheit und Komfort bei.

Auch in anderen Teilen des Automobils (z.B. Lenkrad, Sitzkonstruktionen) hat der Einsatz von Aluminium tendenziell zugenommen.

Ein vollkommen neues Konzept stellt das auf Aluminium basierende *space frame*-Konzept der Firma Audi dar (Audi A 8). Das bei Stahlblechkarosserien bestehende Prinzip der selbsttragenden Konstruktion wird hierbei verlassen und statt dessen eine Rahmenkonstruktion gewählt, die mit Al-Karosserieblechen beplankt wird.

Die *space frame*-Konstruktion machte insbesondere den Einsatz neuer Verbindungstechniken notwendig. Hierzu zählen insbesondere die Al-Gußknoten der Rahmenkonstruktion wie auch neue Fügetechniken (Clinchen, Durchsetzfügen) für Blechteile.

Die *space frame*-Konstruktion wird kontrovers diskutiert. Andere Konzepte zur konsequenten Gewichtsreduzierung propagieren den sogenannten intelligenten Leichtbau. Hierbei wird die Stahlkarosserie beibehalten, und Aluminiumwerkstoffe werden nur für Anbauteile eingesetzt. Der Vorteil solcher Konzepte besteht u.a. darin, daß die bestehende Produktionsstruktur eines Karosseriewerks beibehalten werden kann.

Magnesium

Der Einsatz von Magnesium dient der Gewichtsreduzierung und beschränkt sich bislang auf Bauteile bei Fahrzeugen der Oberklasse. Beispiel hierfür ist der Einsatz in Zylinderkopfschalen und in Sitzkonstruktionen. Aufgrund des Leichtbaupotentials von Magnesium (Dichte, dünnwandige Spritzgußteile) ist in Zukunft ein verstärkter Einsatz dieses Werkstoffes zu erwarten, was durch die Politik der Magnesium-Industrie, die sich um eine langfristig kalkulierbare, seriöse Preisgestaltung des Werkstoffes bemüht, zusätzlich begünstigt wird.

Kunststoffe

Der Anteil von Kunststoffen im Automobil ist in den letzten zehn Jahren von ca. 9% (1985) auf ca. 12% (1995) gestiegen. Zwischenzeitlich (ca. von 1989-1993) war durch die Diskussion im Rahmen der Altautoverordnung eine Stagnation des Kunststoffanteils zu verzeichnen.

A) Fahrzeuginnenraum

Der Kunststoffeinsatz im Fahrzeuginnenraum ist hoch, und es fand aus Kosten- und Funktionsgründen im wesentlichen nur eine anteilige Verschiebung zwischen den einzelnen Polymerwerkstoffgruppen statt. Unabhängig davon geht aufgrund der umweltpolitischen Diskussion um PVC die Bestrebung dahin, im Fahrzeuginnenraum auf diesen Werkstoff zu verzichten.

Neue Anwendung fanden die Polymerwerkstoffe in Strukturbauteilen, wie z.B. Instrumententafelträger und Sitzanlage, wo ein zunehmender Einsatz von Kunststoffen (Spritzguß, R-RIM und PP-GM) zu beobachten ist.

B) *Motorraum*

Die Bauteile im Motorraum sind hohen thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt, weshalb der Einsatz von Kunststoffen in diesem Bereich umfangreiche ingenieurtechnische Entwicklungen voraussetzt.

Ungeachtet dessen ist der Kunststoffanteil an motornahen Bauteilen von ca. 6% im Jahre 1985 auf ca. 7-12% im Jahre 1995 angestiegen. Schwerpunkte desstoffeinsatzes liegen bei Saugrohr und Zylinderkopfhaube; hierbei wurden Aluminiumkonstruktionen vielfach ersetzt, wodurch sich Kosten-, Gewichts- und Funktionsvorteile ergaben.

Zur Reduzierung der Geräuschemission und des Luftwiderstandes wurden zunehmend Geräuschkapseln und Unterbodenverkleidung auf Basis PP-GM bzw. SMC eingeführt.

C) *Karosserie*

Die seit ca. 1980 wirksamen gesetzlichen Vorgaben (Auffahrtests) konnten nur durch eine deformierbare und energieverzehrende Stoßfängerkonstruktion erfüllt werden, und es ergab sich nahezu zwingend der Einsatz von Stoßfängern aus Kunststoff. Die Entwicklungen der letzten Jahre führten zu kostengünstigeren Ausführungen mit geänderter Konstruktion und Werkstoffzusammensetzung. Als Werkstoffe der Außenverkleidung des Stoßfängers werden PC/PBT-Blends (gute Lackhaftung, hohe Wärmeformbeständigkeit, hoher Preis) bzw. in zunehmendem Maße PP/EPDM (geringe Lackhaftung, eingeschränkte Wärmeformbeständigkeit, niedriger Preis) eingesetzt.

Der Einsatz von Kunststoffen in anderen Karosserieteilen befindet sich im Versuchsstadium bzw. ist auf Einzelanwendungen begrenzt (Fronthaube, Heckdeckel, Kotflügel). Nur in *einem* Ausnahmefall wurde eine Gesamtkunststoffkarosserie verwandt: beim Großraumfahrzeug Renault Espace wird eine Voll-SMC-Karosserie mit Erfolg

eingesetzt. Allerdings ist zu berücksichtigen, daß bei diesem Fahrzeug die hohen Anforderungen an die Oberflächen- und Lackqualität, die an die herkömmlichen Pkws gestellt werden, nicht gegeben sind.

D) Frontend

Eine neue Anwendung von Kunststoff (SMC? GMT?) ergab sich beim Frontend (VW Passat). In diesem Bauteil sind die Leuchteneinheit sowie Teile des Kühlsystems integriert, und es ergibt sich dadurch eine einfache Montage des Gesamtmoduls.

5.1.4 Gewichtsentwicklung

Begrenzte Energieressourcen und steigende Abgasbelastung führten in den letzten Jahren zu einem wachsenden Umweltbewußtsein in Gesellschaft und Politik. Vor dem Hintergrund neuer Emissionsbestimmungen hat die Automobilindustrie ihre Anstrengungen forciert, verbrauchs- und emissionsarme Fahrzeuge zu entwickeln. Nach ersten Ansätzen im Bereich der Triebwerkoptimierung hat inzwischen der Leichtbau maßgebliche Bedeutung erlangt.

Eine Gewichtssteigerung des Fahrzeugs um 100 kg führt zu einer Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs um ca. 0,6 l pro 100 km im Drittelmix (Piech 1992). Entgegen dieser Tatsache haben sich in den letzten 15 Jahren die Fahrzeuggewichte aller Baureihen stetig nach oben entwickelt (Köhler et.al. 1995a,b) (Abb. 5-2). Damit in Zukunft eine ökologisch verträgliche Mobilität gewährleistet ist, muß eine Umkehr der steigenden Gewichtsspirale herbeigeführt werden (Piech 1992) (Abb. 5-3).

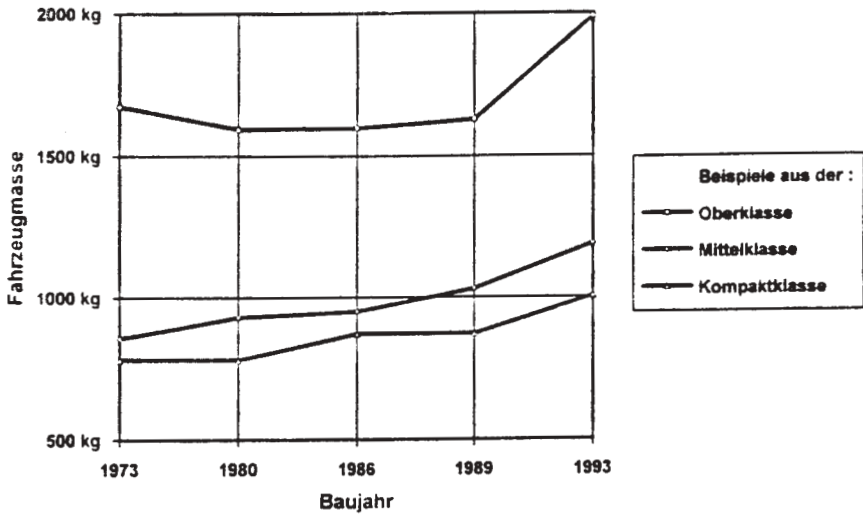


Abb. 5-2: Beispiele für die sicherheits- und komfortbedingte Erhöhung der Pkw-Fahrzeugmasse während der letzten 20 Jahre (Köhler et.al. 1995a,b)

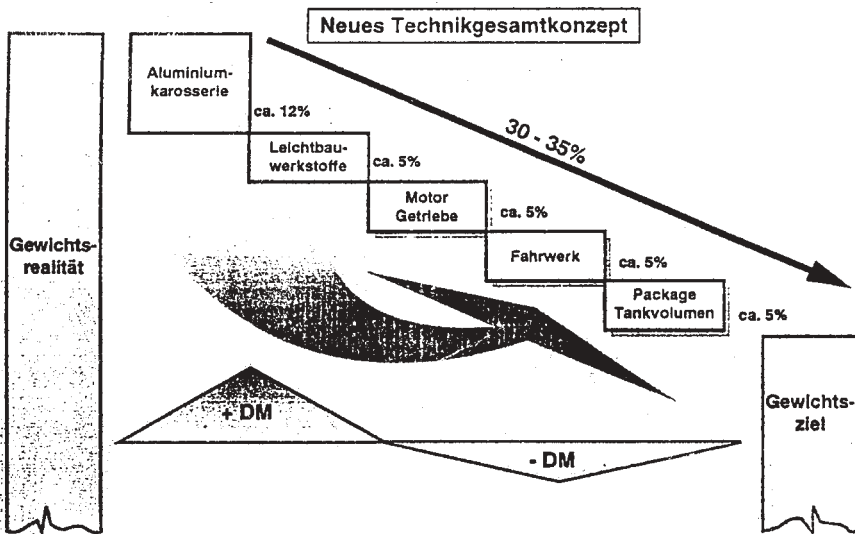


Abb. 5-3: Neues Technikgesamt-konzept unter Berücksichtigung von Gewichtsziel und Kosten (Theissen et.al. 1992)

Einfluß von Sicherheit und Komfort auf das Fahrzeuggewicht

Die Wünsche des Kunden nach sicherheits- und ausstattungsverbessernden Maßnahmen sowie nach höheren Fahrleistungen führten in den letzten Jahrzehnten zu einer deutlichen Erhöhung des Fahrzeuggewichts. Die Aufteilung des Mehrgewichts wird anhand der BMW-Modelle 2000 (Baujahr 1966) und 520i (Baujahr 1988) an einigen Beispielen verdeutlicht (Braess 1993) (Tab. 5-2).

Tab. 5-2: Einfluß von Sicherheit und Komfort auf das Fahrzeuggewicht (Braess 1993)

Schwingungs- und Innengeräuschverbesserung (Übergang von 4-Zylinder- auf 6-Zylinder-Motor, Geräuschisolierung)	+ 95 kg
Insassenschutz (Rohkarosserie, Ausstattung, etc.)	+ 80 kg
Alltagsbrauchbarkeit (viele Einzelmaßnahmen)	+ 45 kg
Umweltschutz (Abgas, Außengeräusch)	+ 35 kg
Konsequenz erhöhter Fahrleistungen	+ 30 kg
Korrosionsschutz	+ 25 kg
Füllmengen	+ 25 kg
Klimakomfort	+20 kg
Gesamtes Mehrgewicht	+ 405 kg

Einfluß von Leichtbaumaßnahmen auf das Fahrzeuggewicht

Der gezielte Einsatz leichter Werkstoffe wirkt dem sicherheits- und ausstattungsbedingten Gewichtstrend entgegen. Allerdings wird durch die Verwendung von Leichtbaumaterialien die Gewichtserhöhung nur zu 30 bis 35 % kompensiert, so daß der Zielkonflikt zwischen Gewichtsreduzierung und Erhöhung von Sicherheit und Komfort weiterhin besteht. Der in Serie gegangene Audi A 8 kann durch den konsequenten Einsatz von Aluminium bereits beachtliche Erfolge bei der Gewichtsreduzierung verzeichnen.

Für die oben genannten BMW-Modelle führt der Leichtbau zu einer Gewichtseinsparung von 140 kg. Beispiele für die Gewichtsreduzierung im Motoren- und Antriebsbereich des 2,0 Liter 6-Zylindermotors von BMW sind in Tab. 5-3 genannt (Krappel et.al. 1995):

Tab. 5-3: Gewichtsreduzierung im Motoren- und Antriebsbereich (Krappel et.al. 1995)

Bauteil	Gewichtsreduzierung	
	[kg]	[%]
Kurbelgehäuse	22,7	50
Abgaskrümmer	3,8	42
Zündspulen (6x)	0,7	26
Ventiltrieb	0,7	23
Lagerleisten Ein-/Auslaß	0,5	14
Pleuel (6x)	0,5	13
Kettenspanner / Spannschiene	0,3	59

Leichtbau-Materialien

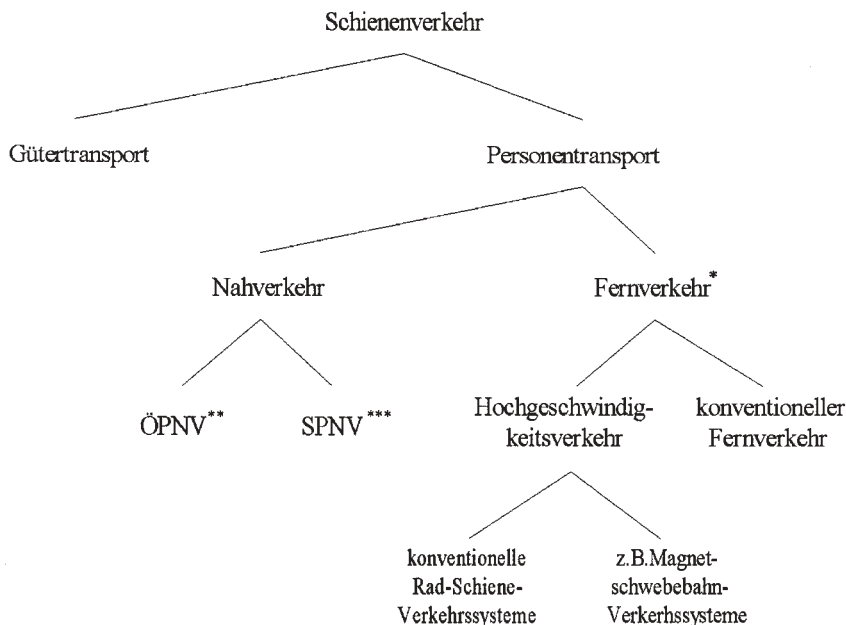
Aluminium, höherfeste Stähle und Kunststoffe konkurrieren in steigendem Maße miteinander in Bezug auf Gewichtsreduzierung und beanspruchungsgerechtem Werkstoffeinsatz. Aluminiumlegierungen für Karosserie, Kurbelgehäuse, Sitzschienen und Felgen reduzieren das Fahrzeuggewicht um einen deutlichen Betrag (Krappel et.al. 1995, Automobil-Produktion 1995). Durch die Verwendung von höherfesten Stählen (Bake-hardening, Dual-Phasen, Trip, IF) für nahezu alle Strukturteile der Fahrgastzelle und der Crashstruktur kann ebenfalls eine Gewichtseinsparung erzielt werden (Janssen 1994). Kunststoffe werden beispielsweise für Stoßfänger, Kühlergrill, Scheinwerfer- und Luftfiltergehäuse (PC-PBTP, PP-GF), für Instrumententafel und Armlehne (PUR) sowie für Sitz- und Innenverkleidung (PVC) verwendet (Walter 1990).

5.2 Schienengebundener Verkehr

5.2.1 Einleitung

Der Schienenverkehr wird traditionell in die Bereiche Gütertransport und Personentransport unterteilt. In Abb. 5-4 ist diese Einteilung schematisch dargestellt.

Der Gütertransport umfaßt beispielsweise Container, Fahrzeuge, Stückgüter, Schüttgüter, Schwerlasten, Flüssigkeiten und in abnehmendem Maße Tiere. Spezialfahrzeuge dienen dem Transport metallischer Schmelzen oder gekühlter Güter. Von daher leiten sich an den Wagenpark sehr unterschiedliche Anforderungen ab.



* alle Schienenfahrzeuge ab D-Zug aufwärts. Z.B. D-Zug, Interregio, IC, ICE

** Öffentlicher Personen Nah-Verkehr

*** Schienengebundener Personen Nah-Verkehr

Abb. 5-4: Einteilung des Schienenverkehrs

Der Personentransport teilt sich in zwei Hauptgruppen mit unterschiedlichen Entfernungen zwischen den Haltepunkten, dem Nahverkehr und dem Fernverkehr, letzterer mit dem Hochgeschwindigkeitsbereich. Die Magnetschwebbahnsysteme werden als spurgeführt einbezogen.

5.2.2 *Personentransport*

5.2.2.1 *Fernverkehr*

Die technische und werkstoffliche Entwicklung im Schienenfahrzeugbau wird vorrangig durch neue Anforderungen bestimmt, die sich aus dem Hochgeschwindigkeitsverkehr ergeben (Cabos 1992). Folgende Ziele stehen im Vordergrund:

- Massereduzierung
- Auslegungen der Fahrzeugkästen unter Berücksichtigung der aerodynamischen Zusatzbelastungen und des Brandschutzes
- hohe Wirtschaftlichkeit: Herstellungskosten, Instandhaltungskosten, Vorhaltungskosten
- hoher Fahrkomfort: Laufruhe, Schallschutz, Klimatisierung, Schutz des Innenraums vor Druckschwankungen, allgemeine Ausstattung
- ökologische Verträglichkeit: Entsorgung und Recycling, Integrale Betrachtung des gesamten Stoffkreislaufs unter Einbeziehung des Energiehaushaltes, Schadstoffbelastung

Im künftigen Schienenfahrzeugbau sind spezifische Werkstoffeigenschaften differenzierter zu berücksichtigen.

Massereduzierung durch Leichtbau

Zur Beurteilung geeigneter Konzepte zur Reduzierung der Fahrzeugmasse empfiehlt es sich, die Verteilung der Gesamtmasse auf die einzelnen Baugruppen zu beachten. In Abb. 5-5 ist dieser Zusammen-

hang für drei Reisezugwagen des Fernverkehrs unterschiedlicher Generation dargestellt.

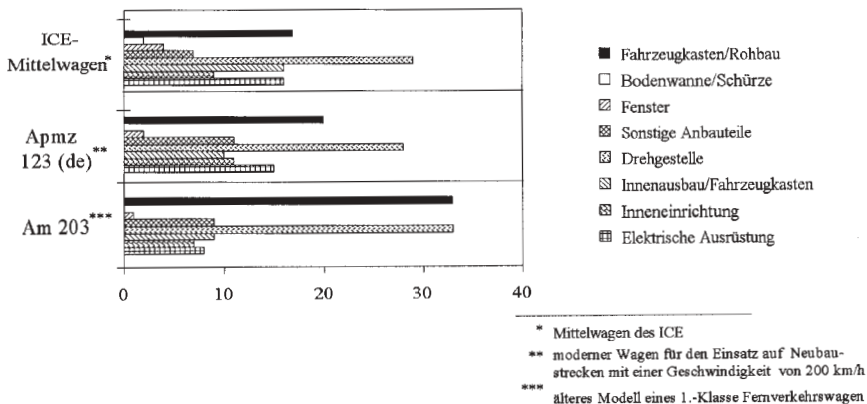


Abb. 5-5: Verteilung der Masse auf die Hauptkomponenten verschiedener Reisezugwagen des Fernverkehrs unterschiedlicher Generationen (Cabos 1992)

Wie Abb. 5-5 zu entnehmen ist, liegt der Masseanteil des Wagenkastens im Rohbaustadium zwischen 15 und 35%. Weiterhin ist zu erkennen, daß dieser Anteil bei neueren Fahrzeugkonzepten reduziert werden konnte. Die Drehgestelle der Fahrzeuge stellen, bezogen auf die Gesamtmasse, mit 25 bis 35% den größten Masseanteil dar. Möglichkeiten zur Reduzierung werden in neuen Werkstoff- und Konstruktionskonzepten gesehen.

Obwohl bei neueren Fahrzeugkonzepten die Anteile der Gesamtmasse, die aus dem Wagenkasten im Rohbau und den Drehgestellen stammen, reduziert werden konnten, wurden insbesondere die Massen des Innenausbaus und der elektrischen Ausrüstung erhöht. Diese Entwicklung ist durch die bereits genannte Forderung an den Fahrkomfort von Schienenfahrzeugen für den Hochgeschwindigkeitsverkehr zu begründen.

In Zukunft muß durch geeignete Bauweisen und Werkstoffauswahl dieser Anteil reduziert werden. Möglichkeiten ergeben sich durch eine Multifunktionalität von Bauteilen, d.h. Integration mehrerer Systeme wie Schalldämmung, Wärmedämmung, Klimatechnik und Elektrotechnik in tragende Strukturen.

Vor dem Hintergrund, daß Schienenfahrzeuge eine Lebensdauererwartung von über 30 Jahren haben, ist ein Leichtbau „um jeden Preis“ nicht sinnvoll. Vielmehr sollte eine Wirtschaftlichkeitsanalyse über die gesamte Nutzungsdauer des Fahrzeugs durchgeführt werden (Life-Cycle-Cost-Analyse) (Cabos 1992).

In die Life-Cycle-Cost-Analyse gehen vorwiegend quantitativ erfaßbare Größen ein. Zur Bewertung von werkstofftechnischen Entwicklungen und alternativen Werkstoffen und Konstruktionen sind qualitative Kriterien ebenfalls notwendig, wie z.B. in Zukunft stärker die Vorgaben zur Zuordnung externer Kosten nach dem Verursacherprinzip (Umweltschutz) berücksichtigt werden müssen.

A) Entwicklungsstand im Bereich der Fahrzeugkästen

Sowohl Stahl als auch Aluminiumlegierungen haben sich beim Bau der Fahrzeugkästen von Schienenfahrzeugen bewährt. Neben der Aluminiumbauweise konnte auch die Stahlbauweise durch geeignete Konstruktionen und besondere Stahllarten und Wärmebehandlungen zu beachtlichen Gewichtsreduzierungen beitragen.

Der Entwicklungsstand der Stahl- und der Aluminiumbauweise bei Fahrzeugwagen läßt sich folgendermaßen charakterisieren:

- die Aluminiumkonstruktion mit Großstrangpreßprofilen (längsgeschweißt) ist relativ schwer, sie ist jedoch 20–30 % leichter als eine vergleichbare Stahlkonstruktion
- die Differenz Stahl zu Aluminium verringert sich durch Verwendung höherfester Stähle

- die vorgeschriebene Einhaltung einer Höchstmasse kann zur Aluminiumbauweise führen
- die LCC-Analyse kann wegen günstigerer schweißtechnischer Verarbeitung zur Stahlbauweise führen
- brandschutztechnische Forderungen werden auch durch Aluminiumlegierungen erfüllt
- Leichtbau mit Stahl erfordert
 - kaltgeformte Profile aus dünnwandigen Blechen
 - Blechfelder hoher Steifigkeit
 - Punktschweißen
 - wegen Spaltkorrosion nichtrostende Stähle
 - Stähle: 1.4301 (AISI 304), 1.4318 (AISI 301 L) bis 700 N/mm²

Bei modernen Konzepten für Hochgeschwindigkeitsreisezüge des Fernverkehrs kommt sowohl die Stahl- als auch die Aluminiumbauweise zum Einsatz.

In Abb. 5-6 sind zum Vergleich der Massen von Rohbauten in Stahl- und Aluminiumbauweise verschiedene Reisewagen des Fernverkehrs gegenübergestellt.

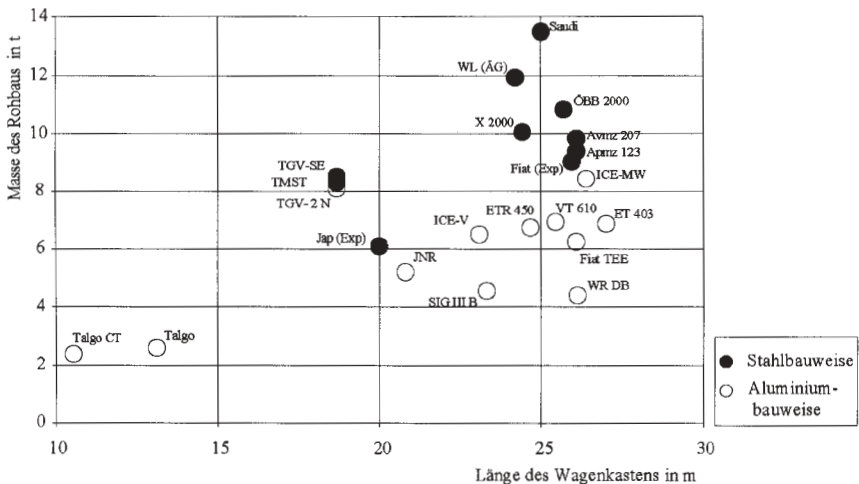


Abb. 5-6: Vergleich der Massen von Rohbauten in Stahl- und Aluminiumbauweise für Reisewagen des Fernverkehrs (Cabos 1992)

Der Mittelwagen des ICE kann als Beispiel für die Bauweise mit Aluminium-Großstrangpreßprofilen (Hohlprofile AlMgSi0,7, Höhe bis 800 mm, Wanddicke 3 mm, Länge 23 m; durchlaufende Längsnähte in Boden-, Wand- und Dachgruppe, Seitenwandstützen im Fensterbereich geschweißt) angeführt werden.

Weitere Beispiele für den Einsatz von Aluminium für Fahrzeugwagen im Fernverkehr sind in Italien, Japan, Norwegen, Spanien, Deutschland, Frankreich (TGV 2N, doppelstöckig) zu finden. Interessant ist in diesem Zusammenhang, daß der doppelstöckige TGV 2N im Gegensatz zur einstöckigen Bauweise aus Aluminium gebaut werden mußte. Dies hängt damit zusammen, daß bei der Stahlbauweise die maximale Radsatzlast von 17 Tonnen nicht eingehalten werden konnte.

Wie bereits erwähnt, ist der Mittelwagen des TGV Atlantique in Stahlbauweise realisiert worden. Ebenso der Triebkopf des TMST, wobei die Profile des Untergestells aus St E 490 und die übrigen Bereiche aus St 52 – 3 gefertigt wurden. Beim Triebkopf des TGV konnte durch die Verwendung höherfester Stähle eine Wandstärkenverminderung und Massenreduzierung um 435 kg erreicht werden.

Für die Entwicklung im Bereich des Baus der Fahrzeugkästen steht weniger die reine Werkstoffentwicklung im Mittelpunkt als vielmehr die Weiterentwicklung der Werkstoffverarbeitung (Umformen, Strangpressen, Fügen) und die Anpassung und Qualifizierung für die speziellen Anwendungsbedingungen.

Bei der Aluminiumbauweise werden folgende Legierungen verwandt:

- AlMgSi0,7 F 27 bzw. F 26 (dünnwandige Profile großer Breite)
- AlZn4,5Mg1 F 35 (wiederaushärtende Schweißnahtbereiche)
- AlMgSi0,5Mn F 25 (Reduzierung der Wanddicke)
- AlCu4Ti Gußwerkstoff (in Triebköpfen für dickwandige Gußteile)

Bei der Stahlbauweise kommen folgende Stähle zum Einsatz:

- unlegierte Stähle (weich)
- allgemeine Baustähle
- mikrolegierte Stähle mit höheren Streckgrenzen
- ferritische nichtrostende Stähle (1.4512/1.4003/1.4589)
- austenitische nichtrostende Stähle (1.4301/1.4318)

Zusammenfassend ist festzuhalten, daß der Erfolg von Innovationen im Schienenfahrzeugbau maßgeblich von der Beherrschung der Fertigungstechnik abhängen wird. In diesem Zusammenhang sind spezielle Umform-, Füge- und Richttechniken, zur Herstellung großflächiger Tragwerke mit engen Toleranzen notwendig. Eine hohe Flexibilität der Fertigungstechnik ist wegen kleiner Losgrößen beim Schienenfahrzeugbau erforderlich (Cabos 1992).

B) Entwicklungsstand im Bereich der Laufwerke

Für den Hochgeschwindigkeitsverkehr ist eine Reduzierung der Laufwerksmassen zwingend erforderlich. In Abb. 5-7 ist die Verteilung der Masse des Drehgestells MD 530 für den ICE-Mittelwagen grafisch dargestellt. Es handelt sich um eine Stahlkonstruktion.

Zukünftig ist eine Massereduzierung – neben konstruktiven Vereinfachungen – durch den Einsatz von höherfesten, schweißbaren Feinkornbaustählen zu untersuchen. Es ist allerdings zu beachten, daß die Schwingfestigkeit der Schweißverbindung durch Einsatz von Stählen höherer Streckgrenzen nicht zu steigern ist. Es bleibt aber eine Optimierung der Schweißkonstruktion. Als Rad- und Radreifenwerkstoffe kommen unlegierte Stähle zum Einsatz. Als Alternativbauweisen sind bereits heute ein Drehgestellrahmen aus faserverstärkten Polymeren und ein Einzelrad-Doppelfahrwerk zu nennen. Bereits bei dem Prototyp des faserverstärkten Drehgestells konnte eine Massereduzierung von einer Tonne je Drehgestell im Vergleich zum konventionellen

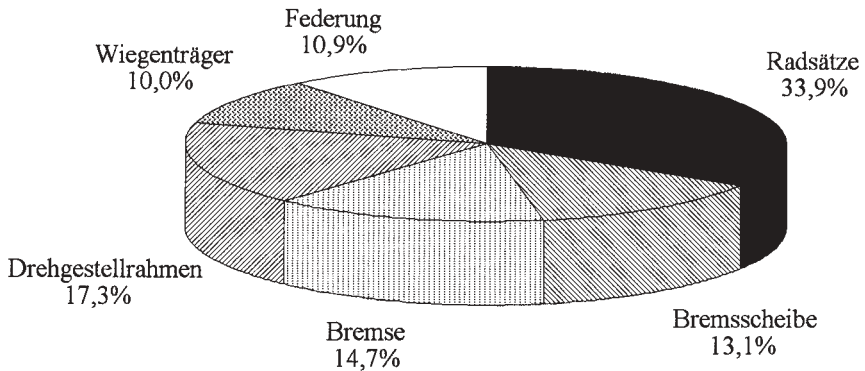


Abb. 5-7: Verteilung der Masse des Drehgestells MD 530 für den ICE-Mittelwagen (Cabos 1992)

Drehgestell erreicht werden (Eisenbahntechnische Rundschau 1987). Die wesentlichen Entwicklungsziele für das Drehgestell sind im folgenden aufgeführt:

- deutliche Gewichtseinsparung
- Verminderung von Schallweiterleitung und Schallabstrahlung
- Einsparung bisher notwendiger Bauteilgruppen durch gezielte Ausnutzung der Strukturelastizitäten des Drehgestellrahmens.

Es wurde ein klar aufgebauter und sehr leichter, integraler Doppel-H-Rahmen mit einer im Mittelteil angeordneten Zentralplatte entwickelt. Als Herstellungsverfahren wurden die Naßlaminieretechnik, die Faserwickeltechnik und die Prepregtechnik eingesetzt. Zur Überwachung der Rahmenstruktur im Betriebseinsatz kommt ein neuentwickeltes Prüfverfahren zum Einsatz. Hierbei werden lichtleitende Glasfasern in die am höchsten beanspruchten Bereiche des Rahmens einlamiert. Dadurch soll erreicht werden, daß während des Betriebseinsatzes entstehende Anrisse und Beschädigungen detektiert werden können (Nowak/Leo 1987). Die bisherigen Ergebnisse waren sehr positiv. Die Weiterentwicklung mündete in das wirtschaftlich besser vertret-

bare Modulkonzept des HLD300 (Eisenbahntechnische Rundschau 1991).

Beim Einzelrad-Doppelfahrwerk sind je zwei hintereinanderliegende, einzeln aufgehängte Räder zu einem Radblock zusammengefaßt. Der rechte und der linke Radblock sind über dreieckförmig angeordnete Träger und ein Gelenk im Langträger des Rahmens gelagert. Federn, Dämpfer, Bremsen und weitere Bauteile usw. sind als Standardbauteile eingesetzt (Eisenbahntechnische Rundschau 1991). Im Vergleich zu herkömmlichen Drehgestellen verfügt das Einzelrad-Doppelfahrwerk über folgende Vorteile:

- Massereduzierung
- bessere Spurführung
- niedriger Verschleiß
- höhere Wirtschaftlichkeit

Bei einer Masse von 5,7 Tonnen ist das Einzelrad-Doppelfahrwerk für eine maximale Radpaarlast von 16 Tonnen ausgelegt. Die dabei integrierte Bremsanlage ist für Züge mit einer Geschwindigkeit bis 330 km/h konzipiert (Eisenbahntechnische Rundschau 1991).

C) Entwicklungsstand im Bereich des Fahrzeugwageninnenbaus

Der größte Anteil der Polymere im Schienenfahrzeugbau wird in Personenfahrzeugen im Bereich der Innenausstattung eingesetzt. Als Vorteile für den Einsatz von Kunststoffprodukten im Fahrzeugwageninnenbau sind zu nennen (Cabos/Fischer 1988):

- die Formbarkeit
- die freie Gestaltbarkeit
- die Integralbauweise
- die Möglichkeit der Massereduzierung
- die Montage- und Demontagefreundlichkeit und
- die Wartungs- und Reinigungsfreundlichkeit

Zum Einsatz kommen überwiegend glasfaserverstärkte Polyesterharze, die im Kalt- oder Heißpreßverfahren verarbeitet werden.

5.2.2.2 Nahverkehr

S-Bahnsystem in Stahlleichtbauweise

Als Beispiel für die aktuelle Entwicklung von Schnellbahnsystemen (S-Bahn) unter Verwendung der Stahlleichtbauweise soll das Berliner S-Bahnkonzept erläutert werden (Kramer 1986).

Nach der Übergabe der Betriebsdurchführung der S-Bahn Berlin(West) von der Deutschen Reichsbahn an die Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) am 9. Januar 1984 bestand die Aufgabe, den fast 60 Jahre alten Triebwagenpark durch Neuentwicklungen zu ersetzen. Die geplanten Neuentwicklungen sollten mit den bestehenden Systemen in Berlin (Ost) kompatibel sein.

Ausgehend von sogenannten Viertelzügen wurde als optimale Zugkonfiguration der Doppeltriebwagen (Dtw) gewählt. Durch die Kombination von vier Viertelzügen kann ein sogenannter Vollzug aufgebaut werden. In Tab. 5-4 sind die Daten der alten und der neuen S-Bahnzüge ET 275 und ET 480 als Doppeltriebwagen vergleichend gegenübergestellt.

S-Bahnzüge fallen unter die Kategorie Vollbahnfahrzeuge und haben der Eisenbahnbau- und Betriebsordnung zu entsprechen. Für Triebwagen wird vorgeschrieben, daß der Wagenkasten einer statischen Längskraft von 1.500 kN ohne bleibende Verformung standhalten muß. Die Richtigkeit dieser Bemessungsgröße insbesondere für den Nahverkehr wird immer häufiger diskutiert.

Um von den statischen, durchschnittlichen Auslegungskriterien abzurücken und den dynamischen Verkehrsbeanspruchungen gerechter zu werden, wurde zur Prüfung des S-Bahnzuges ET 480, abweichend von der statischen Längskraft, ein Auflaufstoß in zwei Stufen

Tab. 5-4: Vergleich der alten und neuen S-Bahnzüge ET 275 und ET 480 der Berliner Verkehrsbetriebe (Kramer 1986).

	ET 275	ET 480
Baujahr	1928 bis 1930	1986
Höchstgeschwindigkeit	80 km/h	100 km/h
Leistung	4*90 kW	8*90 kW
Länge	34.560 mm	36.800 mm
Breite (über Schutzborde)	3.150 mm	3.120 mm
Platzangebot:		
Sitzplätze	112	96
Stehplätze (4 Pers./m ²)	190	196
Gewicht:		
leer	ca. 65 t	ca. 57 t
besetzt (6 Pers./m ²)	ca. 96 t	ca. 88 t

Alle Angaben gelten für Doppeltriebwagen

definiert. Durch die Integration von sogenannten Energieverzehrelementen soll ein Großteil der Kraft in Verformungsenergie umgewandelt werden. Der verbleibende Teil der aufgebrachten Kraft dient als Bemessungsgröße für die Längsfestigkeit des Wagenkastens.

Mit dem Ziel, einen leichten Wagenkasten unter realistischen Bedingungen und vertretbarem Aufwand realisieren zu können, wurde sowohl die Aluminium- als auch die Stahlleichtbauweise berücksichtigt.

Der Vorschlag, den Wagenkasten aus Aluminiumgroßstrangpreßprofilen zu fertigen, wurde nicht weiterverfolgt, da eine Verringerung der Masse durch die Gegebenheiten der Großstrangpreßprofile nicht möglich erschien.

Bei der Stahlbauweise schieden die im Waggonbau häufig verwendeten rostenden Stähle aus. Stahlbleche mit verzinkten Oberflächen wurden aus Gründen der bei der Verarbeitung entstehenden toxischen Dämpfe nicht berücksichtigt. Beim Spannen derartiger Bleche besteht daneben die Gefahr der Oberflächenbeschädigung. Bei der Auswahl einer geeigneten Stahlsorte wurde auf einen Stahl zurückgegriffen, der bisher nicht im Waggonbau eingesetzt wurde, den ferritischen Stahl X 5 CrNiMoTi 15 2 (1.4589). Daneben wurde ein schweißbarer Feinkornbaustahl eingesetzt.

Zur Beurteilung der Eignung von Stahl und Aluminium wurde eine Bewertungsmatrix erstellt, die in Tab. 5-5 dargestellt ist. Für beide Konstruktionen wurde ein etwa gleiches Schwingungsverhalten zugrunde gelegt. Bei der dargestellten Beurteilung durch den Hersteller zeigte sich ein leichter Vorteil für den Stahl. Eine zweite Gewichtung durch den Abnehmer ergab einen ungefähren Gleichstand zwischen beiden Werkstoffen.

Zum Aufbau des Untergestells wurden gekantete Langträger mit einfachen Querträgern verwendet. Die Seitenwände wurden aus gekanteten Z-Profilen mit aufgepunkteten Blechen gefertigt. Für die Fensterrahmen wurden vorgebogene Z-Profile verwendet. Nacharbeiten waren nicht erforderlich. Das Dach wurde aus gekanteten Obergurten und Spriegeln aufgebaut. Dachpfetten und Dachblech wurden durch Punktschweißen miteinander verbunden und an den Dachrahmen angeschweißt. Der Innenausbau erfolgte zum Teil mit glasfaserverstärktem Kunststoff.

Die Drehgestelle haben einen Rahmen aus geschweißten Hohlträgern in verwindungsweicher, H-förmiger Anordnung. Es wurde ein Feinkornbaustahl verwendet.

Zusammenfassend ist festzuhalten, daß der Wagenkasten mit gekanteten Profilen und Blechen durch Punktschweißen aus einem ferritischen, korrosionsbeständigen Stahl aufgebaut wurde, während die Drehgestelle aus einem Feinkornbaustahl gefertigt wurden.

Tab. 5-5: Bewertungstabelle des Herstellers zum Vergleich Stahl Aluminium am Beispiel der alten und neuen S-Bahnzüge ET 275 und ET 480 der Berliner Verkehrsbetriebe (Kramer 1986)

		Stahl		Aluminium	
<i>Kriterium</i>	<i>Gewichtung</i>	<i>Pkt</i>	<i>G*Pkt</i>	<i>Pkt</i>	<i>G*Pkt</i>
Energiekosten	0,150	8	1,200	8	1,200
Oberbaubearbeitung	0,025	7	0,175	7	0,175
E-Antrieb	0,025	7	0,175	7	0,175
Materialkosten	0,125	6	0,750	4	0,500
Fertigungskosten	0,275	5	1,375	7	1,925
Durchbiegung	0,030	7	0,210	7	0,210
Eigenschwingung	0,030	7	0,210	7	0,210
Dauerfestigkeit	0,010	7	0,070	7	0,070
Korrosionsverhalten	0,020	8	0,160	6	0,120
Energieaufnahmevermögen	0,010	8	0,080	5	0,050
Reparaturaufwand	0,050	8	0,400	5	0,250
Brandverhalten	0,050	8	0,400	5	0,250
Materialverfügbarkeit	0,010	8	0,800	8	0,800
Unterhaltungsaufwand	0,050	7	0,350	6	0,300
Eigenproduktionsanteil	0,050	7	0,350	5	0,250
<i>Ergebnis</i>	<i>1,000</i>		<i>6,705</i>		<i>6,485</i>

U-Bahnsystem in Aluminiumleichtbauweise

Als Beispiel für die aktuelle Entwicklung von Untergrundbahnsystemen (U-Bahn) unter Verwendung der Aluminiumleichtbauweise soll das U-Bahnkonzept aus Singapur und Tokio beschrieben werden.

Zusätzlich dienen diese Beispiele zur Darstellung der Entwicklung der Strangpreßtechnik und der Fortschritte der Wagenkastenfertigung. Die wichtigsten Gründe für einen wachsenden Einsatz von Aluminiumfahrzeugen sind im folgenden aufgeführt (Kawazoe 1992):

- Verbesserung der Strangpreßtechnik
- Entwicklung neuer Aluminiumlegierungen
- Fortschritte der Wagenkastenfertigung

Vor 1971 erfolgte das Strangpressen auf 3000 t-Strangpressen. Die maximal herstellbare Breite von Vollstrangpreßprofilen betrug 200 mm. Durch die Entwicklung einer 9500 t-Presse können Vollprofile mit 600 mm und Hohlprofile mit 550 mm Breite produziert werden. Hierdurch stieg die Wirtschaftlichkeit der Wagenkastenfertigung stark an.

Die Entwicklung neuer Aluminiumlegierungen war eng an die Verarbeitbarkeit im Strangpreßprofilverfahren gebunden. Ausgehend von Aluminiumlegierungen vom Typ A5083 und A6061 wurden später AlZnMg-Legierungen verwendet, die über eine gute Strangpreßbarkeit bei gleichzeitig hoher Festigkeit verfügen. Somit konnten große Strangpreßprofile in Vollprofilform hergestellt werden. Ende der 70er Jahre wurden AlMgSi-Legierungen entwickelt, die es ermöglichten, Profile mit komplizierteren Querschnittsformen zu produzieren. Hierdurch wurde die Herstellung von dünnen und breiten Strangpreßprofilen mit hohlem Querschnitt möglich, was insbesondere eine effektivere und wirtschaftlichere Herstellung der Wagenkästen erlaubte.

Die Entwicklung der Wagenkastenfertigung läßt sich grob in vier Generationen aufteilen:

1. Generation (ab 1962): der Aufbau des Wagenkastens erfolgte aus Aluminiumblechen und geformten Profilen. Die Verbindung wurde mittels Aluminiumnieten, kontinuierlichem Schweißen und MIG-Punktschweißen realisiert.

2. Generation (ab 1963): die Produktion wurde an das Widerstandspunktschweißen angepaßt. Der Wagenkasten wurde als Blech-Gerippe-Konstruktion ausgelegt. Die Bauteile wurden mittels Schmelzschweißen unter Schutzgas gefügt.
3. Generation (ab 1970): die ersten Integralbauweisen kamen zum Einsatz. Die großen offenen Profile hoher Festigkeit wurden aus Blechen mit Längsversteifungen realisiert.
4. Generation (ab 1980): bei den neueren Wagenkästen kommen große Profile mit komplexen Querschnittsformen zum Einsatz, die sich über die gesamte Länge des Wagenkastens erstrecken. Die Verbindung der einzelnen Profile erfolgt durch automatisches, kontinuierliches Schweißen.

Die bereits genannten U-Bahnkonzepte in Singapur und Tokio sind Vertreter der 4. Generation, die Ende der 80er Jahre zum Einsatz kamen. Die U-Bahn-Wagen für Singapur verfügen über die folgenden Eigenschaften:

- Energieersparnis durch Leichtbau: Strangpreßprofilbauweise mit Aluminiumlegierungen
- integrale Bauweise: die Doppelverglasung der Fenster kann ohne speziellen Rahmen in die Öffnung des Wagenkastens integriert werden. Die Profile der Fenstersäule dienen hierbei als Rahmen.
- geringerer Wartungsaufwand: die Fahrzeugwagen haben keinen Außenanstrich. Die Oberflächen sind glaskugelgestrahlt.
- Erfüllung von Brandschutzanforderungen (US-Norm): unterhalb des Bodens aus Aluminiumprofilen befindet sich eine Schicht aus Glasfaserdämmprodukten, die durch ein Stahlblech abgedeckt wird. Hierdurch wird die Aluminiumlegierung (Schmelzpunkt ca. 600°C) vor höheren Temperaturen bei Bränden unterhalb des Bodens geschützt.
- Eignung der Fahrzeuge und der Innenausstattung für heißes Klima

Bei der Planung der U-Bahn-Wagen für Tokio standen unter Berücksichtigung der Aluminiumleichtbauweise vor allem die folgenden Aspekte im Vordergrund:

- Herstellung dünnwandiger Aluminiumprofile bei hoher Präzision
- Beibehaltung der Steifigkeiten bekannter Rohbauwagenkästen
- Aufrechterhaltung eines hohen Fahrkomforts
- Reduzierung des durch das Schweißen entstehenden Verzuges

Durch den Einsatz von Großstrangpreßprofilen aus Aluminium konnte, im Vergleich zu vorhandenen Fahrzeugwagen aus rostfreiem Stahl, eine Gewichtsreduzierung des Rohbaus um 12% erreicht werden. Weiterhin verringerte sich durch den Einsatz der Aluminiumfahrzeuge der Verbrauch an elektrischer Energie um 5 bis 10%.

Aus den Erfahrungen der beschriebenen Aktivitäten im Aluminiumleichtbau lassen sich für zukünftige Entwicklungen folgende Ansätze zusammenfassen:

- es sollten Schweißverfahren entwickelt werden, die zu niedrigeren Eigenspannungen im Werkstoff und zu noch höheren Festigkeiten der Verbindung führen
- weiterhin sind andere Fügetechniken zu integrieren
- die integrale Bauweise ist noch besser zu nutzen (Profile mit vielseitigen Funktionen)
- generell sind die Kosten der Ausrüstung zu minimieren; dies kann z.B. durch das bessere Reinigungsverhalten nicht lackierter Wagen erfolgen
- die Gewichtsreduzierung ist immer vor dem Hintergrund der LCC-Analyse zu betrachten (Leichtbau nicht um jeden Preis)
- der Einsatz von Verbundwerkstoffen ist stärker zu berücksichtigen

5.2.3 Gütertransport

Die im Güterverkehr eingesetzten Wagen sind so verschieden, wie die Art der zu transportierenden Güter. Von einem deutschen Hersteller werden alleine 150 verschiedene Güterwagen angeboten. Neuentwicklungen werden zum Teil speziell nach entsprechenden Kundenwünschen gefertigt. Die folgende Auflistung einiger Arten von Schienenfahrzeugen für den Güterverkehr kann demnach nicht vollständig

sein und dient nur als Orientierung für die zum Teil extrem unterschiedlichen Anforderungen an die eingesetzten Werkstoffe (Deutsche Waggonbau AG 1996):

- Tragwagen mit Wechselbehältern
- Flachwagen
- Spreizhauben-Schiebewandwagen
- Schiebewandwagen
- Güterwagen mit austauschbaren Wagenaufbauten und Schiebewänden
- Großraumgüterwagen mit öffnungsfähigen Systemen
- Güterwagen für den kombinierten Verkehr
- Doppelstockwagen für den Autotransport
- Selbstentladewagen
- Kesselwagen
- Druckgaskesselwagen
- Eisenbahnwagen für den Pulvertransport
- Tiefladewagen für den Schwertransport
- Standardgüterwagen
- Kühlwagen und Kühlcontainer
- Kohle selbstentladewagen

Der Werkstoffeinsatz im Güterfahrzeugbau soll am konkreten Beispiel einer Spreizhauben-Schiebewandwageneinheit beschrieben werden. Der Grundaufbau sowie die Drehgestelle sind aus hochfesten Stählen gefertigt. Die Wahl fiel auf diese Werkstoffgruppe, um bei Einhaltung der geforderten Festigkeiten eine Gewichtsreduzierung zu erreichen. Gleiches gilt für den Aufbau, der aus Gründen des Leichtbaus aus einer Aluminiumlegierung gefertigt ist. Zur noch deutlicheren Gewichtsreduzierung ist geplant, die Spreizhauben und Schiebewände aus Wabenstrukturen mit beidseitiger Aluminiumkaschierung zu fertigen. Als Nachteil wird hier jedoch der extrem hohe Preis genannt. Bei der Suche nach einem geeigneten Boden fiel die Wahl nicht auf einfache Holzböden, sondern auf spezielle Holzsandwichstrukturen (Socke 1996).

Insbesondere seit der Einführung der Großraumgüterwagen können die aufgestellten Mindestanforderungen für Waggonfußböden beim Befahren mit Gabelstaplern oft nicht mehr eingehalten werden. Der häufig eingesetzte einfache Holzboden weist durch die hohe punktuelle Belastung durch Gabelstapler eine Zerstörung der Oberfläche auf. Die Schädigungen können nach einer gewissen Zeit zum Bruch der Waggonfußböden führen. Durch den Einsatz geeigneter Holzsandwichstrukturen, die aus Birkensperrholz mit einer Mittellage aus Spezialkork bestehen, können die gewünschten Anforderungen und die für den Güterwaggonbau übliche Lebensdauer erreicht werden (Rost 1996, Abschnitt 3 und 6).

Die Entwicklung des schienengebundenen Güterverkehrs ist durch einen stark abnehmenden Massenguttransport charakterisiert. In Deutschland schrumpfte die mit der Bahn bewegte Masse der transportierten Güter zwischen 1985 und 1995 von 672 Mio. t. auf etwas über 300 Mio. t.. Infolge des Rückgangs der deutschen Schwerindustrie sind die großen Bereiche des Massentransports zum Teil weggefallen. Eine einschneidende Änderung ist durch das „just in time“-Konzept eingetreten. Durch die Verlagerung von Produktionsschwerpunkten haben sich die Anforderungen an die Güterverkehrssysteme verändert. Dem schienengebundenen Güterverkehr wird nur dann eine Chance gegen den Hauptwettbewerber LKW eingeräumt, wenn durch automatisierte Logistik und moderne Systeme eine vergleichbare Flexibilität und Geschwindigkeit erreicht wird (Heinrich 1996a).

In Abb. 5-8 ist die Verteilung des Gütertransportes auf die Verkehrssysteme LKW, Eisenbahn und Binnenschiff dargestellt. Die Vormachtstellung des Verkehrssystems LKW wird hierdurch sehr deutlich. Von Seiten der Industrie wird die Verhinderung einer Verlagerung des Transportes von der Straße auf die Schiene durch mangelnde zeitliche Flexibilität, begrenzte Fähigkeit zur Bewältigung immer kleinerer Sendungsgrößen und durch das unzureichende Angebot der Güterbahn an umfassenden Logistikdienstleistungen erklärt (Heinrich 1996b).

Gütertransport in Deutschland 1995

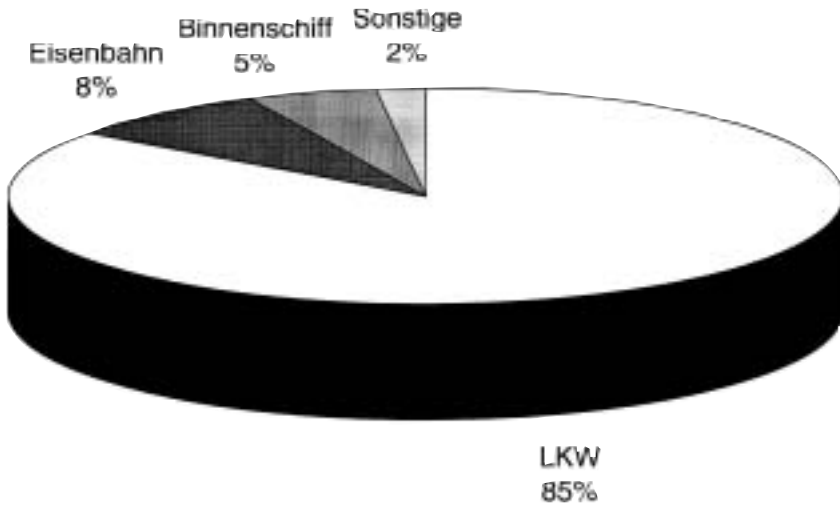


Abb. 5-8: Verteilung des Güterverkehrs in Deutschland 1995 (Heinrich 1996b)

Möglichkeiten, den Gütertransport unter heutigen Gesichtspunkten attraktiver zu gestalten, werden zum Beispiel in einer Kombination des Straße/Schienenverkehrs gesehen (Heinrich 1996b,c). Ein weiterer Ansatz ist die Entwicklung von Güterzugkonzepten, die eine hohe Flexibilität aufweisen und mit dem LKW-Verkehr in Konkurrenz treten können.

Kombinierter Verkehr Schiene / Straße

A) System LaSa

Als Beispiel für ein innovatives Konzept zur Verbindung des Güterverkehrs von Straße und Schiene kann das System LaSa (Schienenlaufwerk-Sattelanhängers) angeführt werden. Bei dem genannten Konzept wird ein LKW-Sattelaufleger beim Bahntransport auf Schienenlaufwerke aufgesattelt. Der Aufleger des LKW bildet während des Bahntransportes die Zugbrücke zwischen zwei Schienenlaufwerken, die beim Leertransport mittels Hilfsrahmen ver-

bunden werden. Der Hilfsrahmen soll so ausgelegt sein, daß er mit Containern oder sogenannten Wechselbehältern bestückt werden kann. Die Verbindung zur Lokomotive oder zu Wagen mit konventioneller Kupplung erfolgt mit einem Adapterwagen, der ebenfalls den Transport der notwendigen Hilfsrahmen übernimmt. Damit ein LKW-Sattelaufleger im LaSa-System eingesetzt werden kann, müssen folgende Modifikationen vorgenommen werden (Eisenbahntechnische Rundschau 1986):

- Fahrgestellverstärkung
- Integration einer Aufnahme für die Schienenlaufwerkskupplung
- Anbau einer Einziehvorrichtung für den Straßenradsatz
- Ausführung des Aufliegers mit klappbarem Unterfahrschutz
- Anordnung einer Hauptluftleitung für die Druckluftversorgung der Bremsen des Schienenlaufwerkes

B) PKW-Verladesystem

Um den kombinierten Verkehr zwischen Straße und Schiene auch im Bereich der privaten Kraftfahrzeuge attraktiver zu gestalten, muß die Be- und Entladung auf schienengebundene Wagen flexibler und schneller erfolgen. Eine Möglichkeit stellt ein neues PKW-Verladesystem aus Aluminiumpaletten dar. Der PKW-Fahrer fährt das Fahrzeug auf eine Aluminiumpalette und verläßt sein Fahrzeug. Die Palette mit dem PKW wird mittels Gabelstapler quer in den Autoreisezug verladen und auf dem Waggon fixiert. Für den Reisenden und den Verloader ergeben sich erhebliche Vorteile (Falk 1992).

- Verlademöglichkeit in jedem beliebigen Bahnhof
- vermehrtes Zugangebot im Taktverkehr
- gleicher Bahnsteig für Auto und Reisezugwaggon
- Verkürzung der Gesamtreisezeit, da die Verladung erst kurz vor Zugabfahrt erfolgen muß
- Erhöhung der Beförderungskapazität

5.3 Luftverkehr

5.3.1 Übersicht

Die zukünftigen Anforderungen an Werkstoffe und Werkstofftechnologien ergeben sich aus dem Zwang zu Systemänderungen in den beschriebenen Flugzeugen, die sich aus dem Spannungsfeld von Kosten-Leistungs-Verhältnis, Umwelt, Sicherheit und Technologischen Entwicklungspotentialen ableiten.

Die Studie wird sich auf konventionelle, größere, hauptsächlich strahlgetriebene Flugzeuge (>30 Sitze) mit primär zivilem Charakter konzentrieren, da in diesem Bereich das entscheidende Markt- und Entwicklungspotential der nächsten zwei Jahrzehnte gesehen wird.

Daneben gibt es eine Reihe von Spezialentwicklungen mit bescheidenem Marktpotential und unsicherer umweltpolitischer Akzeptanz (z.B. Überschallflugzeug nächster Generation). Andere Entwicklungen erfordern substantielle Veränderungen der Flughafeninfrastruktur oder der Zulassungsverordnungen (z.B. Wasserstoff-Flugzeug oder Dreiflächen-Flugzeug). Forderungen an die Werkstoffe und die Werkstoff-Technologie für diese Entwicklungen werden in getrennten Kapiteln beschrieben.

Zunächst werden Werkstofftechnologien für weitgehend gesichert absehbare, subsonische, mit Kerosin betriebene Entwicklungen beschrieben. Diese Entwicklungen beinhalten auch subsonische konventionelle Flugzeuge mit Sitzkapazitäten über 500 Sitzen je Flugzeug.

5.3.1.1 Motivator Kosten-Leistungs-Verhältnis (DLR 1996)

Für die Bewertung des Kosten-Leistungs-Verhältnisses von Flugzeugen sind in den vergangenen Jahren wesentliche Veränderungen eingetreten, deren Fortschreibung in absehbarer Zukunft erwartet wird. Während die Verminderung des Kosten-Leistungs-Verhältnisses

zunächst vorrangig durch die Steigerung der Leistung angestrebt wurde, ist in den letzten Jahren durch die Veränderungen des militärischen Szenarios und die Globalisierung des Wettbewerbs die Senkung der Kosten in den Vordergrund getreten. Hierbei werden generell die „life cycle“-Kosten betrachtet, wobei für einzelne Wertschöpfungsschritte durchaus momentane Gesichtspunkte (z.B. aktueller Gerätebedarf, Ersatzteilgeschäft u.ä.) entscheidend sein können. Die Entwicklungsziele basieren auf Forderungen nach preisgünstiger rascher Entwicklung und Produktion der Systeme, geringem Verbrauch und Wartungsaufwand, hoher Verfügbarkeit und preisgünstig gesteigertem Passagierkomfort.

Beispiele neuer kostensenkender Bauweisen sind nietfreie Flugzeugrümpfe aus schweißbaren Al-Legierungen sowie Kompressor- und Turbinenscheiben mit integrierter Beschau felung. Verminderte Betriebskosten können auch direkt durch einen verminderten Treibstoffverbrauch erreicht werden. Hierzu tragen Gewichtseinsparungen mittels geschweißter anstelle genieteteter Strukturen oder der Einsatz von faserverstärkten Werkstoffen wie CFK, aber auch widerstandsvermindernde Maßnahmen wie adaptive Flügelkomponenten oder widerstandsarmes Design mit Laminarflächen bei.

Wesentlich für den optimalen Einsatz, d.h. ein optimales Gewichts-Leistungs-Verhältnis, der Werkstoffe in Zelle und Antrieb ist auch die exakte Kenntnis ihres werkstoffmechanischen Verhaltens unter Betriebsbedingungen. Betriebskostensparende, verlängerte Wartungsintervalle sind ebenfalls eng mit der exakten Lebensdauervorhersage durch verbesserte Methoden der Schädigungsvorhersage als Folge neuer Entwicklungen in der Werkstoffmechanik verknüpft.

Im Triebwerksbereich werden ein geringerer direkter Verbrauch und Verbesserungen des Gewichts-Leistungs-Verhältnisses unter anderem durch ein erhöhtes Nebenstromverhältnis, neue Trommelbauweisen im Kompressor, neue Brennkammerkonzepte mit Pilot- und Hauptbrenner, höhere Turbineneinlaßtemperaturen und geringeren Kühlluftverbrauch angestrebt.

In Flugzeugen ermöglicht ein geringerer Verbrauch die Steigerung des Verhältnisses von Nutzlast zu Gesamtgewicht oder den Einsatz leichter bzw. kleinerer Systeme.

5.3.1.2 Motivator Sicherheit (DLR 1996)

Das Versagen sicherheitsrelevanter Komponenten in Triebwerks- und Zellensystemen führt zu hohen Personen- und Sachschäden. Die Sicherheit der Komponenten und des Gesamtsystems ist daher ein bleibendes unverzichtbares Grundziel. Dies bedeutet, daß bei der Einführung neuer Werkstoffe nicht nur deren Leistungsfähigkeit allgemein, sondern insbesondere ihr Versagensverhalten genau charakterisiert und bestimmt sein muß. Gleiches gilt für die Auswirkungen neuer Herstellverfahren. Werkstoffe mit hohen Festigkeiten und geringer Verformbarkeit (z.B. Keramiken) und solche mit komplexem Schädigungsverhalten (z.B. Langfaser-Verbundwerkstoffe oder Schichtsysteme) erfordern einen besonders hohen Charakterisierungsaufwand. Zuverlässige Vorhersagen zum Versagen benötigen neben exakten Eigenschaftsmessungen auch analytische Ansätze zur Beschreibung des Schädigungsablaufs. Der Aufwand für die Erarbeitung und Verifikation solcher Ansätze steigt mit der Komplexität der Werkstoffe und Werkstoffsysteme überproportional an.

Für die Praxis unumgänglich ist die Sicherstellung der Übertragbarkeit von gemessenen Materialdaten auf das Bauteilverhalten.

5.3.1.3 Motivator Umweltverträglichkeit (DLR 1996)

Die Umweltaspekte sind für Flugzeuge mit den Hauptfragen der Emissionen, des Lärms und der ökologischen Verträglichkeit bei der Herstellung und im Betrieb verknüpft. Bei integraler Betrachtung des gesamten Stoffkreislaufs unter Einbeziehung des Energiehaushalts und der Schadstoffbelastung der Systeme ergibt sich für die Kreislaufprozesse der Werkstoffe in Zelle und Triebwerk meist nicht die

oberste Priorität. Dies ergibt sich auch aus den hohen Anforderungen an den Sicherheits- und Leistungsstandard der verwendeten Werkstoffe und der Langlebigkeit der Flugsysteme (bis auf wenige Ausnahmen wie Rezyklierung der CFK-Bauteile).

Mit einem geringeren Kraftstoffverbrauch oder höheren Wirkungsgrad ist in der Regel eine lineare Verminderung von Schadstoffemissionen verbunden. Dies bedeutet, daß sich Maßnahmen zur Senkung der Betriebskosten durch Verbrauchsreduktion gleichzeitig umweltschonend auswirken.

Bei gegebenem Kraftstoffverbrauch ist für die Verminderung der Umweltbelastung jedoch eine qualitative Veränderung der Emissionen notwendig, wie sie z.B. durch verbesserte Brennkammerkonzepte angestrebt wird.

5.3.1.4 Evolutionäre und revolutionäre Entwicklungen (DLR 1996)

Aus der Vielzahl von Problemen der Werkstoffforschung und -technologie für Lufttransportsysteme sind evolutionäre Fragestellungen gegen solche abzugrenzen, deren erfolgreiche Bearbeitung mandatorisch für die Verwirklichung substantiell innovativer Zielstellungen ist. Wie in vielen Bereichen der Werkstoffentwicklung und -technologie ergeben sich Vorteile aus der interdisziplinären Zusammenarbeit von ingenieurwissenschaftlichen und naturwissenschaftlichen Einrichtungen.

5.3.2 Technologietransferpotential (DLR 1996)

Das Technologietransferpotential der verschiedenen Entwicklungen ist unterschiedlich. Die in Flugzeugen je kg Werkstoff akzeptierten Kosten liegen einen Faktor 5 bis 100 über den in den meisten anderen technischen Systemen akzeptierten Werten. Entsprechend sind direkte Übertragungen nur in Systeme wahrscheinlich, bei denen ein veränderter Werkstoffeinsatz eine hohe 'Wertsteigerung' ergibt.

5.3.3 *Derzeitiger Werkstoffeinsatz*

5.3.3.1 *Zellen (Hatch 1984, Rendigs 1996, Hyatt/Axter 1991)*

Die Verwendung von CFK-Werkstoffen in der Zelle neuentwickelter Flugzeuge ist stetig gestiegen. Jedoch wird nach wie vor die Flugzeugzelle überwiegend aus Aluminiumlegierungen gebaut. Hauptsächlich werden die aushärtbaren Legierungen vom Typ AlCuMg (2024) und AlZnMgCu (7075) eingesetzt. Eine Verringerung des Gehaltes der Verunreinigungen Eisen und Silizium führte zu den Varianten 2X24 und 7X75, die verbesserte Schadenstoleranzeigenschaften aufweisen.

Die Entwicklungen der Aluminiumlegierungen der letzten 30 Jahre führten zu erheblichen Verbesserungen der großen Zivilflugzeuge. Zielrichtungen waren Steigerungen des Leistungsverhaltens und die Verminderung der „life cycle“-Kosten. In jüngster Zeit hat die enge Zusammenarbeit von Werkstoffherstellern, Zellenkonstruktoren, der Herstellungs-, Design- und Kostenexperten zu einem Einsatz von spezifischen Legierungen geführt, die weitgehend dem jeweiligen anwendungsspezifischen Leistungsprofil entsprechen. Dabei spielen neben dem reinen mechanischen und korrosiven Leistungsverhalten auch die Kosten eine wesentliche Rolle. Wie erwähnt, ist der Gewichtsanteil der Aluminiumlegierungen in großen Zivilflugzeugen leicht rückläufig. Dies zeigt die Familie der Boeing Flugzeuge 747, 757, 767 und 777 sehr deutlich. In dieser chronologischen Entwicklungsreihe verringerte sich der Aluminiumanteil von 81 auf 70%; gleichzeitig erhöhte sich der Anteil der CFK-Werkstoffe von 1 auf 11% und der des Ti von 4 auf 7%. Der Stahlanteil blieb mit etwa 12% nahezu konstant.

Seit 1945 hat sich die AlCuMg Legierung 2024-T3 als Standardblech für die Rumpfhaut etabliert. Bei Kampfflugzeugen werden aufgrund erhöhter Festigkeitsanforderungen Bleche der Legierung 7075-T6 verwendet. Mit Einführung der Schadenstoleranzkonzepte in den

70er Jahren werden reinere Legierungsvarianten wie 7475 benutzt, da eine Verringerung der Eisen- und Siliziumanteile die Bruchzähigkeit erhöht und den Ermüdungsrißfortschrittswiderstand verbessert. Bestrebungen, die Legierung 2024-T3 durch leichtere Werkstoffe mit vergleichbaren Eigenschaften zu ersetzen, führten zu den neuentwickelten AlLiCuMg Legierungen 8090 und 2091. Schadenstolerante Bleche dieser Legierungen werden jedoch nicht in großem Umfang eingesetzt. Neben wirtschaftlichen Gesichtspunkten, lithiumhaltige Halbzeuge sind deutlich teurer als konventionelle, sind hierfür auch werkstoffkundliche Probleme ausschlaggebend. So weisen Bleche lithiumhaltiger Legierungen eine ausgeprägte Anisotropie der mechanischen Eigenschaften auf, sind anfällig gegen Spannungsrißkorrosion und zeigen bei Ermüdungsrißfortschrittsuntersuchungen eine nicht akzeptable Rißabweichung. Insbesondere verändert sich ihr Gefüge bei Auslagerungen bei leicht erhöhten Temperaturen (1000h/85°C), was auf Probleme der Langzeitstabilität dieser Werkstoffe während einer langjährigen Einsatzdauer hinweist. In jüngster Zeit haben russische AlMgLi-Legierungen wieder verstärkt Interesse gefunden; diese Legierungen besitzen gute Korrosionseigenschaften, sind schadenstolerant und schweißbar. Spezielle Neuentwicklungen dieses Legierungstyps scheinen auch eine hinreichende thermische Stabilität zu gewährleisten.

Derzeit wird auch die AlMgSiCu-Legierung 6013-T6, die gegenüber 2024-T3 um 3% leichter ist, für den Einsatz als Rumpfhaut evaluiert. Sie besitzt höhere Streckgrenzen bei Zug- und Druckspannungen als 2024-T3 bei vergleichbaren Werten für Bruchzähigkeit und Ermüdungsrißfortschritt. Der Preis entspricht dem herkömmlicher Aluminiumblechen. Darüberhinaus läßt sich diese Legierung schweißen und strangpressen, jedoch ist sie bedingt durch Korngrenzenausscheidungen anfällig gegen interkristalline Korrosion. Um das Korrosionsverhalten zu verbessern, werden zur Zeit leichte Modifikationen der Legierungszusammensetzung untersucht. Aufgrund spezieller Festigkeit-Zähigkeitsanforderungen wurde für die Rumpfhaut der Boeing 777 eine neue AlCuMg Legierung 2524

(C188) entwickelt; sie ist im wesentlichen eine verbesserte Variante der Legierung 2024 mit höherer Bruchzähigkeit und besserem Ermüdungsrißfortschrittsverhalten. Dies wird durch eine gezielte Kontrolle der chemischen Zusammensetzung und der Herstellungsrouten erreicht.

Im Bereich des Flügels und für Stringer werden aus Festigkeitsgründen aushärtbare Legierungen der 7xxx Reihe eingesetzt. Bei dickeren Halbzeugen wie Platten und Strangpreßprofile verhindert eine hohe Anfälligkeit gegen Schicht- und Spannungsrißkorrosion die Ausnutzung des möglichen Festigkeitspotentials. Um das Korrosionsverhalten zu verbessern, wurden ausgeklügelte Wärmebehandlungen eingeführt, die jedoch meist eine Verringerung der Festigkeit bedingen. So zielen neue Legierungsvarianten der 7xxx Reihe darauf ab, für spezielle Anwendungen Festigkeit, Schadenstoleranz oder Verformbarkeit zu steigern bei gleichbleibenden guten Eigenschaften der anderen Kenngrößen. Beispiele hierfür sind Platten und Strangpreßteile der Legierungen 7150-T77 und 7055-T77, die für Stringer und im oberen Flügelbereich eingesetzt werden.

Durch den vermehrten Einsatz von CFK-Bauteilen wurde insbesondere das Zellengewicht verringert. Allerdings bleiben die Detektion kleiner Delaminationsschäden und die umweltgerechte Recyclierung dieser Bauteile zu lösende Fragestellungen. Neue Familien von Al-Legierungen wären attraktiv, wenn dadurch das gesamte Herstellungsverfahren deutlich billiger und das Zellengewicht deutlich verringert würden.

Eine reale Möglichkeit dafür wird in der Anwendung integraler Bauweisen durch den Einsatz schweißbarer oder strangpreßbarer Al-Legierungen gesehen. Diesbezüglich werden zur Zeit große Hoffnungen auf scandiumhaltige AlMg-Legierungen gesetzt, die eine reduzierte Dichte und ausgezeichnete Korrosionseigenschaften besitzen und darüber hinaus schadenstolerant sind.

Die im Zellenbau eingesetzten Titanlegierungen und Stähle entsprechen allgemeinen Standards und liegen aus Kostengründen nicht immer an der Obergrenze der Leistungsfähigkeit dieser Werkstoffklassen.

5.3.3.2 Antriebe (Buhl 1992, Hocking et.al. 1989, Peters/Winkler 1992)

Wohl nur wenige ingenieurmäßige Systeme stellen heute ähnlich herausfordernde und komplexe Anforderungen an fortschrittliche Strukturwerkstoffe wie ein modernes Triebwerk.

Im Triebwerksbereich nehmen die Titan- und Nickellegierungen sowie Stähle etwa gleiche Gewichtsanteile ein. Trotz aller anderslautenden Prognosen sind alternative Werkstoffe wie Intermetallics und Verbundwerkstoffe bis jetzt nur in geringem Umfang vertreten.

Werkstoffe für hohe Temperaturen und einzigartige Herstellmethoden haben zur Realisierung effektiver Fluggastrriebwerke in wenigen Jahrzehnten geführt. Ein wesentlicher Punkt der Effektivitätssteigerung der Triebwerke war dabei die Erhöhung der Gaseinlaßtemperatur in die Turbine. Generell sind unterschiedliche Bereiche der Triebwerke unterschiedlichen Temperaturanforderungen ausgesetzt, die von verschiedenen Werkstoffen ertragen werden. Die Legierungselemente sind im wesentlichen für die Hochtemperaturfestigkeit, die Oxidations- und Korrosionsbeständigkeit sowie die Thermoschockunempfindlichkeit eingesetzt. Hierbei steht der Leichtbau absolut im Vordergrund.

Aluminiumlegierungen werden bis zu 260°C eingesetzt. Aufgrund des ausgezeichneten Verhältnisses von Festigkeit/Gewicht werden geschmiedete und gegossene Aluminiumteile auf breiter Basis für Kompressoren, Zentrifugalräder und -gehäuse, Lufteinlaßteile und im Bereich der Hilfsgeräte eingesetzt. Leichte Al-Li-Legierungen, deren Preis über den traditionellen Aluminiumlegierungen liegt, besitzen aufgrund der erhöhten spezifischen Festigkeit und des guten Ermüdungsverhaltens Chancen zum Einsatz auch in Flugtriebwerken. Es besteht die konkrete Aussicht, daß Fe- und Ce-legierte Aluminiumle-

gierungen den Einsatzbereich dieser Werkstoffgruppe auf weitere Baugruppen im Triebwerk erweitern.

Titanlegierungen gehören zu den klassischen Triebwerkslegierungen. Nur halb so schwer wie Stähle oder Nickel-Superlegierungen, besitzen sie herausragende Eigenschaften in Bezug auf Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Sie werden bevorzugt dort verwendet, wo Festigkeit, Korrosions- oder Temperaturbeständigkeit der Aluminiumlegierungen unzureichend sind. Die Erhöhung der Warmfestigkeit spielt hierbei eine zentrale Rolle. Im Verlauf der letzten 35 Jahre ist es gelungen, die konventionellen Ti-Legierungen so weit zu optimieren, daß die maximalen Einsatztemperaturen von etwa 400°C auf knapp 600°C gesteigert wurden, wodurch ein Teil der fast doppelt so schweren Ni-Superlegierungen ersetzt werden konnte. Für höhere Einsatztemperaturen bieten sich Titanaluminide auf Basis der intermetallischen Phasen Ti_3Al (Alpha-2) und $TiAl$ (Gamma) an. Bei noch geringerer Dichte weisen diese intermetallischen Legierungen verbesserte Hochtemperaturfestigkeit, höheren Oxidationswiderstand und höhere Zeitstandfestigkeit auf, dem jedoch eine geringere Duktilität bei Raumtemperatur gegenübersteht. Dies hat für die derzeit favorisierten $TiAl$ -Legierungen zur Folge, daß für die Anwendung als Strukturwerkstoff nur zweiphasige Legierungen in Frage kommen mit einem Al-Gehalt von weniger als 49 at.-%, die zusätzlich in geringem Maße mit Cr, V oder W legiert werden zur Erhöhung der Festigkeit oder auch mit Nb, Ta oder Mn zur weiteren Steigerung des Oxidationswiderstandes.

Sehr häufig wird die maximale Einsatztemperatur bei Titanlegierungen nicht durch mangelnde Festigkeit begrenzt, sondern durch ihr schlechtes Oxidationsverhalten. Ein geeigneter Oxidationsschutz, der auch mechanischen Belastungen standhält, steht derzeit nicht zur Verfügung und ist von daher Gegenstand weltweiter Forschungsaktivitäten.

Stähle mit hohen Chrom- oder Nickel/Eisen-Gehalten werden neben niedriglegierten Stählen eingesetzt. Für den Einsatz als rotierende und statische Triebwerkskomponenten, wie Kompressorschaufeln, Räder,

Abstandshalter und andere Strukturbauteile sind insbesondere der niedrige Preis und die gute Verarbeitbarkeit dieser Legierungen, aber auch ihre guten mechanischen Eigenschaften verantwortlich. Die niedriglegierten Stähle können bei Temperaturen bis 550°C, Nickel-Chrom-Stähle bis 675°C eingesetzt werden. Der Umfang des Stahleinsatzes nimmt zugunsten von Titan- und Aluminiumlegierungen ab.

Nickelbasis-Legierungen stellen die besten verfügbaren Legierungen für den Temperaturbereich zwischen 650 und 980°C dar. Ihre exzellenten Hochtemperatureigenschaften beruhen auf der Ausscheidung von Intermetallischen Phasenteilchen, die zugleich die hervorragenden Kriecheigenschaften verursachen. Die guten Korrosions- und Oxidationseigenschaften ergeben einen weiten Einsatzbereich im Zentralbereich des Triebwerks mit Scheiben und in Turbinenrädern, Abstandshaltern und -wellen.

Kobaltbasis-Legierungen sind eine weitere Gruppe von Hochtemperaturlegierungen mit hoher Festigkeit und guter Oxidationsbeständigkeit. Sie werden in Bereichen sehr hoher Temperaturen eingesetzt. Typische Beispiele sind Nachbrenner, Leitkränze in der Hochdruckturbinen und andere Teile. Der Einsatz des Kobalts ist durch den hohen Preis und die strategische Bedeutung eingeschränkt.

Die Teile mit den höchsten Anforderungen an die Hochtemperaturfestigkeit sind die Turbinenscheiben und -schaufeln. Die Zentrifugalkräfte steigern sich mit dem Quadrat der Umdrehungsgeschwindigkeit. Hinzu kommen Belastungen durch hohe Biegemomente, die als Folge der hohen Impulse durch die enormen Gasströme zustande kommen. Die hohen Gasströme verursachen darüber hinaus Flattern der Schaufeln und dadurch hervorgerufen Ermüdungserscheinungen. Dadurch ergeben sich hohe Anforderungen an die Steifigkeit und die Ermüdungsfestigkeit der Schaufelmaterialien.

Zur Verbesserung des Kriechverhaltens werden Turbinenschaufeln heute in einkristalliner Bauweise hergestellt. Dünne keramische Wärmedämmschichten sind in Entwicklung, die einen weiteren Anstieg der Prozeßtemperaturen und so eine zusätzliche Steigerung des Wir-

kungsgrades der Triebwerke erlauben.

Ein weiterer kritischer Punkt sind die Temperaturgradienten zwischen Welle, Scheibenkern und -rand sowie Schaufelfuß und -oberkante. Die einsetzbaren Werkstoffe müssen sich daher durch die entsprechenden Eigenschaften in unterschiedlichen Temperaturbereichen auszeichnen.

5.4 Recycling am Beispiel von Personenkraftwagen

5.4.1 Einleitung

Fragen des Recyclings berühren insbesondere PKW. Das Recycling von LKW ist von nachgeordneter Bedeutung, da es sich um sehr langlebige Investitionsgüter handelt. Schienenfahrzeuge sind aufgrund ihrer hohen Langlebigkeit hinsichtlich des Recyclings ebenfalls von geringer Bedeutung. Das gleiche gilt prinzipiell auch für Flugzeuge, allerdings führt der zunehmende Einsatz von Verbundwerkstoffen auch hier zu Recyclingproblemen.

5.4.2 Automobilrecycling

Für das Recycling von Automobilen kann prinzipiell die Shreddertechnologie, die Totalzerlegung zum stofflichen Recycling und die Zerlegung zum Produktrecycling eingesetzt werden.

5.4.2.1 Shreddertechnologie

Die Shreddertechnologie ist die etablierte Technologie zum Automobilrecycling. Nach der Trockenlegung, der Schadstoffentfrachtung und dem Ausbau von wiederverwendbaren Teilen wird die Restkarosse dem Shredder zugeführt, zerkleinert und anschließend verfahrenstechnisch aufbereitet. Die Shreddertechnologie ist ausgerichtet auf die Rückgewinnung metallischer Fraktionen; die Rückge-

winnungsquoten für die metallischen Fraktionen sind hoch (Tab. 5-6). Die anorganisch-nichtmetallische sowie organische Fraktionen können nicht mehr oder nur unter aufwendiger Aufbereitung wieder gewonnen und stofflich verwertet werden.

Tab. 5-6: Rückgewinnungsquoten der Metalle

Werkstoffe	Rückgewinnungsquote ausgehend von der Restkarosse in [%]
Stahl und Gußeisen	99%
Kupfer/Cu-Legierungen	60%
Kabel und Cu-Misch	70%
Aluminium	97%
Sonstige NE-Metalle	35%

Allerdings tritt eine Verunreinigung der einzelnen Metallfraktionen durch die anderen metallischen Elemente und durch die weiteren Inhaltsstoffe des Automobils auf. Dies ist mit qualitativen Einbußen der einzelnen Metallfraktionen verbunden (Tab. 5-7).

Die anorganisch-nichtmetallischen und organischen Bestandteile stellen die Problemfraktionen der Shreddertechnologie dar. Diese werden derzeit noch deponiert. Es bestehen jedoch intensive Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zur Reduzierung der Deponiemenge. Dies soll erreicht werden durch weitere Aufbereitung und / oder durch thermische und rohstoffliche Verwertung der Restfraktionen. Diese Aktivitäten hängen einerseits zusammen mit den hohen Deponiekosten in Deutschland, andererseits mit der Vorgabe, daß im Jahre 2015 nur 5% des Fahrzeuggewichts deponiert werden dürfen („Gemeinsames Konzept“). Ein weiterer Beweggrund ist die Vorschrift der TA Siedlungsabfall, in deren Zuge nur noch Abfälle mit weniger als 5% organischem Anteil deponiert werden dürfen (ab 2005).

Tab. 5-7: Verunreinigungen der metallischen Fraktionen nach dem Shredder

Fraktionen	Fe-Fraktion	Cu-Fe-Fraktion	Cu-Kabel-fraktion	Al-Fraktion	NE-Misch-fraktion
Werkstoffe	Angaben in [%]				
Fe	97,20	76,59	0,10		29,72
Cu	0,10	13,40	29,06		11,72
Al	0,05	0,10	0,72	91,88	1,10
Zn	0,60				48,84
NE-Metalle	0,01	0,03	0,31	0,17	0,62
Thermoplaste	1,50	6,40	67,70		2,22
Duroplaste	0,02	0,09	0,91		0,02
Elastomere	0,10	0,01	0,02		
Inertstoffe	0,01	2,07	0,87		2,80
Sonstige Reststoffe	0,07	0,36	0,14	3,34	1,63
organische Reststoffe	0,34	0,84	0,17	4,59	1,31
Flüssigkeiten		0,11		0,02	0,02

Als besonders attraktive Technologie ist dabei die Schwelbrenntechnik bzw. die Verbrennung der organischen Fraktionen im Zementwerk anzusehen. Die Schwelbrenntechnik hat neben der überschaubaren und effektiven Behandlung der Abgasströme den Vorteil, daß die metallischen und inerten Bestandteile der Shredderleichtfraktion (SLF) vollständig stofflich wiedergewonnen werden können. Da die Verwertung noch zu wirtschaftlich vertretbaren Bedingungen durchgeführt werden kann würde dies wohl eines der Verfahren der Wahl in der Zukunft darstellen. Bei der Verwertung der SLF im Zementwerk hingegen gehen die metallischen Bestandteile dem Kreislauf verloren, da sie im Klinker eingebunden werden. Probleme der Einbringung in das Zementwerk bereiten die hohe Anteile von Halogenen in der SLF (Herkunft u.a. aus PVC, Elektronik).

5.4.2.2 Totalzerlegung

Es werden Untersuchungen durchgeführt, Fahrzeuge in ihre Einzelbestandteile zu zerlegen, um die reinen Fraktionen einer direkten Verwertung zuzuführen. Hierdurch würde die Zerkleinerung und Trennung durch den Shredder überflüssig. Die Totalzerlegung setzt jedoch bei Fahrzeugen, wie sie heute konzipiert sind, eine Demontagezeit von ca. 2-3 Stunden voraus und ist daher unwirtschaftlich. Es verbleiben auch nach einer Totaldemontage immer noch Reste organischer Herkunft der Restkarosse eingebunden. Allerdings könnte bei Neufahrzeugen durch geeignete Konstruktion eine einfache Zerlegung in die wesentlichen Stofffraktionen erreicht werden.

5.4.2.3 Produktrecycling

Die Demontage und Wiederverwendung von Bauteilen stellt die höchste Stufe des Recyclings dar, da sie nicht mit den Umweltbelastungen durch die Erzeugung der Primär- und Sekundärwerkstoffe, deren Verarbeitung und weiteren Belastungen bei der Produktion verbunden ist. Es zeigt sich allerdings, daß bei neueren Fahrzeugkonzepten eine ähnliche Lebensdauer der verschiedenen Baugruppen vorliegt und nach der Stilllegung (12-15 Jahre Nutzungsdauer) alle wesentlichen Teile einen ähnlichen Verschleißgrad aufweisen und zur Wiederverwendung mehr oder weniger ungeeignet sind. Jedoch ergibt sich durch das Ausschachten von Unfallfahrzeugen die Möglichkeit eines qualifizierten Produktrecyclings, das auch zunehmend im Rahmen der „zeitwertgerechten Reparatur“ an Bedeutung gewinnen wird.

5.4.2.4 Langzeitauto

Durch die extrem lange Nutzungsdauer speziell konzipierter Langzeitautos könnte ebenfalls die Umweltbelastung reduziert werden. Bei der derzeit noch hohen Innovationsrate im Automobilbereich ist dies jedoch auch unter ökologischen Aspekten nicht sinnvoll.

5.4.2.5 Umwelt- und recyclinggerechte Produktgestaltung des Automobils

Beim Automobil entfallen ca. 85% des Energieverbrauchs auf die Nutzungsphase und ca. 15% auf die Herstellung. Erste Priorität der umweltgerechten Produktgestaltung stellt daher die Reduzierung des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase dar. Dies kann zu einem Zielkonflikt hinsichtlich der Werkstoffauswahl führen. So tragen Kunststoffe und Verbundwerkstoffe wesentlich zur Gewichts- und damit zur Kraftstoffeinsparung bei, weisen jedoch nicht das hohe Recyclingpotential metallischer Werkstoffe auf.

Im Rahmen des neuen Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes wurde für die Altkaroverwertung von Seiten der Industrie das sog. „Gemeinsame Konzept“ vorgeschlagen, das demnächst rechtsgültig wird. Hierin wird als wesentliches umweltrelevantes Kriterium die Restdeponiemenge bei der Verwertung von Fahrzeugen vorgeschrieben: ab dem Jahr 2015 dürfen bei der Verwertung des Automobils nur max. 5 % des Fahrzeuggewichts deponiert werden. Durch die Shreddertechnologie werden die metallischen Fraktionen der Aufbereitung weitgehend zurückgewonnen, während die anorganisch-nichtmetallische bzw. die organische Fraktion den Shreddermüll darstellt, der derzeit noch deponiert wird. Dieser macht bei derzeitiger zur Verwertung anstehenden Fahrzeugen ca. 25% des Fahrzeuggewichts aus (Abb. 5-9).



Abb. 5-9: Werkstoffanteile von PKW

Wesentliches Problem der Altautoverwertung stellt die organische Fraktion (Kunststoffe, Elastomere, Textilien) dar. Eine rechnerische Analyse der deponieorientierten Abfallströme bei der Automobilverwertung zeigt, daß unter Verwendung spezieller Verwertungsverfahren für den Shredderleichtmüll, z.B. Zementwerk oder Schwel-Brenntechnik, die erreichbare, minimale Restdeponiemenge sich in der Nähe von den geforderten 5% bewegen kann.

Da zur Erreichung der gesetzlichen Rahmenbedingungen (5% Restdeponiemenge) ein wesentlicher Beitrag durch die Wahl geeigneter thermisch-rohstofflicher Verfahren bestimmt wird, obliegen darüber hinausgehende Anforderungen hinsichtlich einer recyclinggerechten Konstruktion der Verantwortung der Automobilindustrie.

In einem möglichen zukünftigen Szenario könnte davon ausgegangen werden, daß neben der als Pflicht zu erfüllenden 5 % Restdeponiemenge die „Kür“ darin besteht, unter marktwirtschaftlichen Bedingungen eine hohe stoffliche Verwertungsquote insbesondere bei den nichtmetallischen Bestandteilen des Automobils zu erzielen. Dies kann nur durch recyclinggerechte Produktgestaltung erreicht werden. Allerdings erlauben die scharfen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in der Automobilindustrie nicht oder nur in geringem Umfang, daß Mehrkosten für eine recyclinggerechte Konstruktion aufgebracht werden. Daraus ergeben sich Anforderung an die recyclinggerechte Produktgestaltung, die plakativ beschrieben werden können mit den Worten: besser, billiger, recyclingfähig.

Um bei der Altautoentsorgung eine Verwertung der nichtmetallischen Fraktionen auf hohem Niveau, d.h. eine stoffliche Wiederverwendung sicherzustellen, muß diese wertschöpfend sein. Dies setzt hinsichtlich einer recyclinggerechten Konstruktion eine schnelle Demontage und kostengünstige Aufbereitung voraus.

5.4.2.6 Recyclingverhalten von Werkstoffgruppen und ausgewählten Bauteilen

Recycling von Polymerwerkstoffen

Grundsätzliche Tendenzen beim Einsatz von Polymerwerkstoffen unter dem Aspekt der umweltgerechten Produktgestaltung sind die Reduzierung der Sortenvielfalt, die Vermeidung kritischer Flammschutzmittel und die Bemühungen zur maßvollen Reduzierung des Halogengehalts (insbesondere PVC).

Die Reduzierung der Sortenvielfalt erfolgt vielfach jedoch unter wirtschaftlichen Aspekten. Ein Beispiel hierfür ist der Werkstoff Polypropylen, der in einem weiten Bereich hinsichtlich seiner Eigenschaften modifiziert werden kann, kostengünstig ist und darüberhinaus ein gutes Recyclingverhalten aufweist.

Im wesentlichen werden in Fahrzeugneukonstruktionen nur Polymerwerkstoffe eingesetzt, die recyclingfähig sind. Thermoplaste können aufgrund ihrer linearen Struktur wiederaufgeschmolzen werden und sind daher prinzipiell einfach rezyklierbar. Bei Duroplasten ist z.B. durch das Partikelrecycling ebenfalls ein hochwertiges Recycling gegeben. Kunststoffe mit globularem Füllstoff bzw. Faserverstärkung weisen prinzipiell eine geringere Bruchdehnung auf und sind daher beim Recycling unempfindlich gegen Verunreinigungen (Thermoplaste, Duroplaste). Unverstärkte Thermoplaste sind sowohl empfindlich gegenüber Verunreinigungen als auch in gewissen Fällen gegenüber Veränderungen der Mikrostruktur bei der Wiederverwertung. Es sind daher beim Recycling besondere Anstrengungen notwendig.

Für großflächige Außenteile an heutigen und zukünftigen Fahrzeugen bieten sich aufgrund des toleranten Deformationsverhaltens unverstärkte Thermoplaste an, die allerdings aus stilistischen Gründen sowie aus Gründen der Lichtstabilität lackiert werden müssen. Da der Lack auf Duroplastbasis beruht, werden beim Recycling Verunreinigungen in das Bulkmaterial eingetragen, was z.T. zu einer erheblichen Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften führt. Polypropy-

len weist dabei folgende Vorteile auf: zum einen ist die Haftung des Lackes gering, was zu einem gewissen Abplatzen des Lackes führt; zum anderen ist die Mikrostruktur relativ unempfindlich gegen Verunreinigungen. Demgegenüber weisen polycarbonatbasierte Systeme eine gute Lackhaftung auf, wodurch bei der Aufarbeitung der Eintrag von Lackpartikeln in das Substrat erhöht wird. Darüberhinaus ist dieser Werkstoff empfindlich gegenüber Verunreinigungen. Für PC-Blends sind daher Maßnahmen zur Entlackierung notwendig, um ein Recyclat von ausreichender Qualität herstellen zu können.

Recycling auf hohem Niveau kann prinzipiell nur mit sortenreinen Werkstoffen erreicht werden. Nur wenige Polymerwerkstoffe sind miteinander verträglich und führen beim Recycling zu Produkten von ausreichender Qualität. Allerdings kann durch sogenannte Verträglichkeitsvermittler eine Dispergierung und Haftung der Phasen erreicht werden, wodurch das Werkstoffniveau deutlich angehoben wird. Dies ist jedoch mit Mehrkosten verbunden, was den Einsatz dieser Variante einschränkt.

Recycling von Faserverbundwerkstoffen

Faserverbundwerkstoffe treten im Fahrzeugbau in unterschiedlichen Erscheinungsformen auf. Wesentliche Gruppen sind wirrfaserverstärkte Kunststoffe (SMC und GMT) und langfaserverstärkte Verbundwerkstoffe (Mehrschichtverbundwerkstoffe mit unidirektionalen Faserlagen). Matrixwerkstoff können Thermo- wie Duroplaste sein, als Fasern sind Glasfasern im Einsatz. Unter dem Gesichtspunkt des Fahrzeugleichtbaus kann der Anteil der Kohlenstofffaser deutlich zunehmen.

Wirrfaserverstärkte Werkstofftypen lassen sich gut recyceln. Bei SMC ist das Partikelrecycling etabliert; bei GMT bieten sich sowohl Recyclingtechniken über das Zumischen von Recyclatpartikeln bei der Verarbeitung in der Schmelzphase an als auch das Verpressen von GMT-Recyclatpartikeln direkt zu Halbzeug bzw. Neuprodukten. Ohne wesentliche Einbußen der Materialeigenschaften können bei beiden

Werkstoffen ca. 20-30% Recyclat beigemischt werden.

Bei langfaserverstärkten Kunststoffen liegt dieses günstige Recyclingverhalten prinzipiell nicht vor. Beim Recycling werden die Fasern verkürzt, evtl. auch geschädigt, und es können daher die unidirektional endlos faserverstärkten Strukturen nicht wieder erzeugt werden. Die Rückgewinnung der Fasern kann insbesondere bei kohlenstofffaserverstärkten Werkstoffen ein wirtschaftlich interessantes Ziel sein. Hierfür zeichnen sich derzeit folgende Verfahren ab: Pyrolyse, Trennung z.B. durch Schockwellen und ggf. Lösemittelverfahren. Bei faserverstärkten Verbundwerkstoffen auf Thermoplastbasis kann, falls Sortenreinheit sichergestellt wird, auch ein Recycling über die Schmelzphase erfolgen. In jedem Fall wird durch Faserverkürzung, evtl. Faserbeschädigung, Beeinflussung der Schlichte, eine Degradation der Eigenschaften auftreten.

Falls sich ein intensiver Einsatz von Hochleistungsverbundwerkstoffen in Fahrzeugen abzeichnet, sind Werkstoffkreisläufe aufzubauen, bei denen in Form einer Kaskade die faserverstärkten Hochleistungsverbundwerkstoffe zu kurz- bzw. wirrfaserverstärkten Produkten von geringerem mechanischem Niveau rezykliert werden.

Reifenrecycling

Die höchste Stufe des Reifenrecyclings ist die Runderneuerung. Allerdings werden runderneuerte Reifen aufgrund der Produkthaftung nicht von Fahrzeugherstellern empfohlen bzw. nicht in Neufahrzeugen eingesetzt. Dies beruht darauf, daß Reifen einen außerordentlich komplizierten Aufbau aufweisen, deren Qualitätssicherung nur durch Verfahrensüberwachung erfolgen kann und derzeit noch keine Verfahren bereitstehen, die Reifen gemäß ihrem Schädigungsgrad zu bewerten.

Das stoffliche Recycling von Reifen zu Reifengranulat kann sich durch die Weiterentwicklung von Verfahrenstechniken als wirtschaftlich attraktiv erweisen (Reifengranulat: DM 0,20/kg). Allerdings müßten für die Verwertung des Reifengranulats noch qualifiziertere Anwendungen gefunden werden als beispielsweise die Errichtung von Schallschutzwänden und die Ausstattung von Kinderspielplätzen usw..

Die thermische Verwertung von Altreifen wird heute bereits in Zementwerken und z.T. in Reifenkraftwerken praktiziert. Reifen haben einen hohen thermischen Energieinhalt und eine weitgehend definierte Werkstoffzusammensetzung, die eine sichere Prozeßführung gewährleistet. So ist bis auf das Element Zink der Anteil an Schwermetall im Reifen geringer als bei fossilen Brennstoffen.

Auch aufgrund der großen anfallenden Mengen (400.000 t/pa in D) hat die Frage des Reifenrecycling heute einen gewissen Stellenwert.

Recycling von Elastomeren

Viele Elastomere finden Anwendung in hochbeanspruchten technischen Teilen. Neben der vernetzten Molekularstruktur, die eine Aufbereitung beeinträchtigt bzw. unmöglich macht, sind vielfach die Kleinheit und die Kontamination der Teile wesentliche Gründe, weshalb Elastomere stofflich nicht rezykliert werden.

In Konkurrenz zu den herkömmlichen Elastomeren treten thermoplastische Elastomere, die durch Aufschmelzen rezykliert werden können. Sie weisen aufgrund ihrer molekularen Struktur jedoch nicht das gleich gute gummielastische Rückstellverhalten auf und haben eine höhere Kriechneigung als Elastomere. Der Einsatzbereich dieser Werkstoffe hat sich deutlich erweitert, wird jedoch durch die inhärenten Werkstoffeigenschaften eingegrenzt.

Elastomere weisen vielfach einen höheren Halogenanteil auf, was bei der thermischen Verwertung zu berücksichtigen ist.

Dämmstoffe

Für die Schwingungs- und Geräuschreduzierung werden Dämmstoffe eingesetzt, die zumeist aus Recyclingprodukten bestehen. Die Dämmstoffe führen allerdings zu einer Gewichtserhöhung des Fahrzeugs und stören aufgrund der vielfach faserigen Struktur die Aufbereitungstechnik bei der Shredderleichtmüllverarbeitung. Entwicklungsziel ist es, durch konstruktive Maßnahmen auf Dämmstoffe weitgehend zu verzichten.

Recycling von Glas

Die Scheiben im Automobil, die derzeit aus Glas hergestellt werden, wiegen ca. 40 kg. Die Sicherheitsfrontscheiben sind dreischichtig aufgebaut mit einer Mittellage aus Kunststoffolie. Durch geeignete Aufbereitungstechnik kann eine Trennung von Glas und Kunststoff erreicht werden.

Aufgrund der hohen optischen Anforderungen an Automobilglas können derzeit Automobilscheiben nicht aus Glasrecyclat hergestellt werden.

Recycling von Elektrik/Elektronik

Die Elektrik/Elektronik des Automobils ist gekennzeichnet durch den Cu-Gehalt insbesondere von Leitungen und Motoren, durch die PVC-Kabelisolierung sowie durch Leiterplattenwerkstoffe, die auf Br-Basis flammgeschützt sind. Im Shredderprozeß muß das Kupfer weitgehend aus der Metallfraktion entfernt werden, um eine hohe Qualität der Fraktionen zu gewährleisten. Die Rückgewinnungsrate von Kupfer liegt bei ca. 30-50%. Die bromhaltigen Elektronikbauteile liegen verstreut im Fahrzeug vor und werden z.T. ausgebaut und einer gesonderten Verwertung zugeführt. Ein Entwicklungsziel sind bromfreie Leiterplatten, wobei entweder auf neuartige Flammenschutzmittel oder auf Keramiksubstrate zurückgegriffen wird.

Recycling von Metallen

Beim Shreddern metallischer Werkstoffe tritt vielfach eine Qualitätsreduzierung ein, da die engen Vorgaben der Legierungszusammensetzung durch Vermischung von unterschiedlichen Legierungstypen nicht eingehalten werden können. So werden bei Aluminium Guß- und Knetlegierungen nicht getrennt, und es kann hieraus lediglich eine Gußlegierung erzeugt werden. Ähnliches gilt für Magnesium. High Purity (HP)-Legierungen können in ihrer hohen Reinheit nicht über die Verfahrensrouten Shreddertechnologie von anderen Magnesiumlegierungen getrennt werden.

Es wurden schnelle Identifizierungsverfahren entwickelt, die eine Identifizierung unterschiedlicher Legierungstypen ermöglichen und dadurch eine qualifizierte Sortierung gewährleisten. Diese Verfahren sind allerdings noch in Erprobung.

5.4.2.7 Neue Fahrzeugkonzepte

Im Rahmen neuer Fahrzeugkonzepte werden insbesondere das 3-1-Automobil sowie elektrisch angetriebene Fahrzeuge diskutiert. Bei beiden Konzepten ist die Gewichtsreduzierung von entscheidender Bedeutung für einen geringen Energieverbrauch. Die Entwicklung geht daher in Richtung kleinerer Fahrzeuge, die in Leichtbauweise konzipiert sind.

Leichtbaukonzepte können mit unterschiedlichen Werkstoffen realisiert werden. Als Werkstoffe kommen hierbei Aluminium, Magnesium und Kunststoffe/Verbundwerkstoffe in Betracht. Jedoch kann auch durch geeignete Stahlkonstruktionen ein hochwertiges Leichtbaukonzept realisiert werden.

Für ein hochwertiges Recycling dieser Fahrzeugtypen müssen sowohl demontagegerechte Konstruktionen wie auch eine optimierte legierungsspezifische Trennung bei der Shreddertechnologie vorgesehen werden.

5.4.2.8 Allgemeine Bemerkung

Das Recycling im Rahmen der Altautoentsorgung hat in Deutschland an Bedeutung gewonnen. Bei Neukonstruktionen werden Recyclingaspekte gezielt berücksichtigt. Angesichts der sich abzeichnenden Motorisierung in Ländern der Dritten Welt und der GUS sollten hierbei Überlegungen hinsichtlich recycling- und umweltgerechter Produktgestaltung ebenfalls Berücksichtigung finden.

6 Gesamtbilanz / Ausblick

Die Arbeitsbasis stellen die analysierten und weiter präzisierten vorhandenen Fragestellungen im Zusammenhang mit neuen Materialien. Die vorliegende Studie erschöpft sich nicht allein in einer Bestandsaufnahme des gegenwärtigen Stands in der Materialwissenschaft, sondern befaßt sich mit den Fähigkeiten und Entwicklungstendenzen des herausragenden Komplexes *Neue Materialien*. An verschiedenen Stellen wird exemplarisch gezeigt, daß die Materialwissenschaft für sich selbst ein dynamisch innovativer Bereich ist, der darüber hinaus den Entwicklungsprozeß in anderen technisch-innovativen Feldern (Informationstechnik, Umwelttechnik etc.) und der Gesellschaft bestimmt.

Bei der Fragestellung des gegenwärtigen Materialeinsatzes in Verkehrssystemen wird auf die materialspezifischen Probleme im Straßenverkehr, schienengebundenen Verkehr, Luftverkehr und beim Recycling eingegangen. Der Schwerpunkt der Diskussionen liegt auf der heutigen Leistungsfähigkeit, wobei neben den klassischen Materialien wie Stahl und Leichtmetalle auch auf keramische und faserverstärkte Materialien eingegangen wird.

Die Untersuchungen der Vorstudie können in der knapp einjährigen Vorprojektphase nur bestimmte *Schlüsselgebiete* umfassen. Die Weiterentwicklung der bearbeiteten Themenblöcke und die zur Bearbeitung vorgesehenen Fragestellungen wird im Rahmen des sich anschließenden, zweijährigen Hauptprojekts durchgeführt. Die Untersuchungsbereiche werden folgende Problemfelder umfassen:

- **Entwicklung neuer Materialien:** Voraussetzung für den Einsatz neuer Materialien ist, daß sie wirtschaftlich herstellbar und verarbeitbar sind und daß die notwendigen Informationen für die Konstrukteure vorliegen. Hierzu bedarf es moderner Verfahren und Methoden. Dazu sind Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen Strukturen und Eigenschaften sowie über die maßgebenden Schädigungsmechanismen in Materialien erforderlich. Dabei sind die gegenwärtigen Prüf- und Bewertungsmethoden für die Bedürf-

nisse der Qualifizierung von neu entwickelten Materialien weiterzuentwickeln. Die Weiter- und Neuentwicklung von Materialien erfolgt heute nicht empirisch, sondern nur unter Einbeziehung der Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung.

- **Industrieller Produktionsprozeß:** Neue Materialien machen einen Wandel in den Produktionsprozessen und -anlagen erforderlich (z.B. durch Fügetechniken). Es geht nicht um bloße Substitution von Stoffen, sondern um Systeminnovationen. Ganze Herstellungsprozesse sind neu zu gestalten und Reparaturtechniken sind neu zu entwickeln. Wie ist dieser Strukturwandel genauer zu charakterisieren? Wie verhält er sich zur Realisierung einer Kreislaufwirtschaft in Bezug auf Stoffströme? Gibt es hier Synergien oder gegenläufige Effekte? Hat dies soziale Auswirkungen, z.B. auf die Gestaltung von Arbeitsplätzen? Hierfür werden u.a. die Aussagen aus arbeitsmedizinischer Sicht des TAB-Berichtes herangezogen.
- **Neue Materialien im Straßenverkehr:** Die Ansprüche an den Materialeinsatz in Kraftfahrzeugen stehen zunehmend in der Diskussion. Es sind die Erwartungen der Kunden (an Funktionalität, Sicherheit, Qualität etc.), gesetzliche Rahmenbedingungen (Verbrauch, Verwertung etc.) sowie Anforderungen an Funktion, Haltbarkeit, Gewicht etc. von Materialien, mit denen sich die Industrie konfrontiert sieht.
- **Neue Materialien im schienengebundenen Verkehr:** Moderne, zuverlässige und schnelle Schienenbahnen – in Nordamerika vernachlässigt, in Europa und Japan gefördert – erweisen sich als notwendige Ergänzung zum Straßen- und Luftverkehr. Die Anforderungen nach Gewichtsreduzierung, Wirtschaftlichkeit, Fahrkomfort, Ökologie etc., die daraus erwachsen, bestimmen die technische und materielle Entwicklung im Schienenfahrzeugbau.
- **Neue Materialien im Luftverkehr:** Die Gesellschaft sorgt sich im Luftverkehr vor allem um die Sicherheit, den Schadstoffausstoß und die Lärmentwicklung. Zusammen mit Verbesserungen bei den Flugleistungen und der Wirtschaftlichkeit ergeben sich hohe Anforder-

derungen – extrem leicht und temperaturbelastbar – an neue Materialien. Der verstärkte Einsatz innovativer Materialien in der Flugzeugtechnik soll auf europäischer Ebene die Wettbewerbsfähigkeit verbessern, wobei die Mobilitäts- und Sicherheitsansprüche der Passagiere nicht vernachlässigt werden dürfen.

- **Kreislaufwirtschaft:** Bereits erfolgte Material-, Konstruktions- und Fertigungsentwicklungen haben zu Reduktionen beim Einsatz von Struktur und Funktionswerkstoffen mit der Folge einer Entlastung im Ressourceneinsatz und Energieverbrauch geführt. An Grenzen stößt die Rezyklierbarkeit jedoch aufgrund der Heterogenisierung sowohl der inneren Werkstoffstrukturen wie auch der komplexen technischen Systeme. Die Eigenschaften der Materialien sind im Zusammenhang vollständiger Materie- und Energiebilanzen zu betrachten. In dieser Frage soll die Zielhierarchie der Entwicklung (z.B. geschlossene Stoffkreisläufe, minimaler Energieeinsatz, größter Nutzen etc.) kritisch im Hinblick auf Synergien und konkurrierende Effekte analysiert werden.
- **Nachwachsende Rohstoffe:** Dem Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen in neuen Materialien wird gesonderte Beachtung gewidmet, um die Möglichkeiten auszuloten, hierdurch die Ökobilanzen im Hinblick z.B. auf den CO₂-Ausstoß und die Energiebilanzen zu optimieren.
- **Europäische Arbeitsteilung in der Materialforschung:** Die öffentlich geförderte Forschung in den Materialwissenschaften in Europa ist vorwiegend national orientiert. Im Hinblick auf das Zusammenwachsen der EU und den Wirtschaftsstandort Europa ist dieser Zustand unbefriedigend. Es sollen Szenarien entwickelt werden, wie einerseits der Transfer von Forschungsergebnissen in der EU verbessert werden kann und wie andererseits eine kohärente Förderungspolitik aus europäischer Sicht aussehen könnte.

Zitierte Literatur

Kapitel 1:

Europäische Union (1996, Hg.): Grünbuch zur Innovation. Bulletin der Europäischen Union, Beilage 5/95, ISBN 92-827-6082-0

Socher, M. et.al. (1994): TA-Projekt „Neue Werkstoffe“ – Endbericht. TAB-Arbeitsbericht Nr. 26 – Langfassung. Bonn: TAB, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag

Kapitel 2:

Ayres, R.U. (1971): Prognose und langfristige Planung in der Technik. München

Bayerische Rück (1993, Hg.): Risiko ist ein Konstrukt. München

Bechmann, G. (1994): Technikfolgenabschätzung – die Achillesferse von TA? In: Grunwald/Sax 1994, S. 88-101

BMFT, Bundesministerium für Forschung und Technologie (1993, Hg.): Deutscher Delphi-Bericht zur Entwicklung von Wissenschaft und Technik. Bonn

DLR, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V. (1993, Hg.): Technikfolgenbeurteilung der bemannten Raumfahrt. Systemanalytische, wissenschaftstheoretische und ethische Beiträge; ihre Möglichkeiten und Grenzen. DLR – TB – 318 – 1993 – 01B, Köln-Porz

Eckell, A. (1994): Die Kunststoffindustrie – ihre wirtschaftliche und technologische Bedeutung aus regionaler und globaler Sicht. Vortrag, Colloquium International Salzburg (CSI), 8. September 1994. Salzburg

Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen Bundestages (1994, Hg.): Die Industriegesellschaft gestalten. Bonn

Foster, R.N. (1986): Innovation. London

Gethmann, C.F. (1979): Proto-Logik. Formale Pragmatik von Begründungsdiskursen. Frankfurt

Gethmann, C.F. (1982): Proto-Ethik. Zur formalen Pragmatik von Rechtfertigungsdiskursen. In: Ellwein, T., Stachowiak, H. (Hgg.): Bedürfnisse, Werte und Normen im Wandel. München/Paderborn, Bd. 1, S. 113-143

Gethmann, C.F. (1993): Langzeitverantwortung als ethisches Problem im Umweltstaat. In: Gethmann, C.F. et.al. (Hgg.): Langzeitverantwortung im Umweltstaat. Bonn, S. 1-21

Gethmann, C.F. (1994): Die Ethik technischen Handelns im Rahmen der Technikfolgenbeurteilung. Am Beispiel der bemannten Raumfahrt. In: Grunwald/Sax 1994, S. 146-159

Gomeni, R., Gomeni, C. (1980): A Conversational Graphic Program for the Analysis of the Sigmoid Curve. Computers and Biomedical Research 13, S. 489-499

Grunwald, A. (1994): Wissenschaftstheoretische Anmerkungen zur Technikfolgenabschätzung: Prognose- und Quantifizierungsproblematik. Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie 25, Heft 1, S. 51-70

Grunwald, A. (1996a): Sozialverträgliche Technikgestaltung. Kritik des deskriptivistischen Verständnisses. Europäische Akademie, Graue Reihe 3. Bad Neuenahr-Ahrweiler

Grunwald, A. (1996b): Ethik der Technik. Systematisierung und Kritik vorliegender Ansätze. Ethik und Sozialwissenschaften 7, Heft 2/3, S. 191-204

Grunwald, A. (1996c): Erkenntnistheoretischer Status und kognitive Grenzen der Technikfolgenabschätzung. In: Böhm, H.-P. et.al. (Hgg.): Leitbilder für nachhaltige Technikgestaltung. Dettelbach, S. 29-42

Grunwald, A. (1997a): Das prädiskursive Einverständnis. Prozedurale Rechtfertigung und seine Bedeutung in den Wissenschaften. Zeitschrift für allg. Wissenschaftstheorie (im Druck)

Grunwald, A. (1997b): Kulturalistische Planungstheorie. Handlungstheoretische Rekonstruktion des Planens (in Vorbereitung)

Grunwald, A. (1997c): Pragmatik von Prognosen. In: Schriftenreihe der Europäischen Akademie, Bd. 1 (in Vorbereitung)

Grunwald, A., Sax, H. (1994, Hgg.): Technikbeurteilung in der Raumfahrt. Berlin

Hempel, C.G. (1965/1977): Aspects of Scientific Explanation and other Essays in the Philosophy of Science. New York/London. Dt. Fassung: Aspekte wissenschaftlicher Erklärung, Tübingen 1977

Hempel, C.G., Oppenheim, P. (1948): Studies in the Logic of Explanation. Philosophy of Science 15, S. 135

Jungermann, H., Slovic, P. (1993): Charakteristika individueller Risikowahrnehmung. In: Bayerische Rück 1993, S. 89-107

Kemp, R. (1993): Risikowahrnehmung: Die Bewertung von Risiken durch Experten und Laien – ein zweckmäßiger Vergleich? In: Bayerische Rück 1993, S. 109-127

Kersting, W. (1992): Moralphilosophie und Dezsionismus. Ethik und Sozialwissenschaften 3, S. 23-36

Knapp, H.G. (1978): Logik der Prognose. Freiburg/München

Kretschmer, Th., Kohlhoff, J. (1995, Hgg.): Neue Werkstoffe. Berlin

Krohn, W., Rammert, W. (1985): Autonomer Prozeß und industrielle Strategie. In: Lutz, B. (Hg.): Soziologie und gesellschaftliche Entwicklung. Frankfurt/New York, S. 411-433

Kroy, W. (1988): Einfaches Neues finden und in Produkte umsetzen. MBB-Jahrbuch 1988, S.21-26

Küttner, M. (1989): Prognose, Voraussage. In: Seiffert, H., Radnitzky, G. (Hgg.): Handlexikon zur Wissenschaftstheorie München, S. 275 – 280

Lorenzen, P. (1987): Lehrbuch der konstruktiven Wissenschaftstheorie. Mannheim

Lorenzen, P., Schwemmer, O. (1975): Konstruktive Logik, Ethik und Wissenschaftstheorie, 2. Auflage. Mannheim

Luhmann, N. (1990): Die Wissenschaft der Gesellschaft. Frankfurt

Mensch, G. (1981): Ist die technische Entwicklung ganz oder teilweise vorprogrammiert? In: Kruedener, J.v., Schubert, K.v. (Hgg.): Technikfolgen und Sozialer Wandel. Opladen, S. 103

Niemann, G. (1981): Maschinenelemente, Band I, 2.Auflage. Berlin

Rammert, W. (1994): Modelle der Technikgenese. Von der Macht und Gemachtheit technischer Sachen in unserer Gesellschaft. Jahrbuch Arbeit und Technik 1994. Bonn, S. 3-12

Rayner, S. (1993): Risikowahrnehmung, Technologieakzeptanz und institutionelle Kultur: Fallstudien für einige neue Definitionen. In: Bayerische Rück 1993, S. 213-243

Razim, C., Kaniut, C. (1988): Innovation durch moderne Werkstofftechnik. In: Deutsche Messe AG (Veranst.): Tagung „Neue Werkstoffe“ – Anwendungsbeispiele im Fahrzeugbau und Maschinen- und Anlagenbau. 22.-23. April 1988, Hannover

Renn, O. (1996): Kann man die technische Zukunft voraussagen? In: Pinkau, K., Stahlberg, C. (Hgg.): Technologiepolitik in demokratischen Gesellschaften. Stuttgart

Ropohl, G. (1982): Kritik des technologischen Determinismus. In: Rapp, F., Durbin, P.T. (Hgg.): Technikphilosophie in der Diskussion. Braunschweig, S. 3-14

Socher, M. et.al. (1994): TA-Projekt „Neue Werkstoffe“ – Endbericht. TAB-Arbeitsbericht Nr. 26 – Langfassung. Bonn: TAB, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag

SRU, Sachverständigenrat für Umweltfragen (1994): Umweltgutachten 1994. Für eine dauerhaft-umweltgerechte Entwicklung. Stuttgart

Stegmüller, W. (1983): Probleme und Resultate der Analytischen Philosophie und Wissenschaftstheorie, Bd. 1. Berlin/Heidelberg/New York

VDI, Verein Deutscher Ingenieure (1991): VDI-Richtlinie 3780. Technikbewertung – Begriffe und Grundlagen. Düsseldorf

Vitányi, P.M.B. (1985): Development, Growth and Time. Report CS-R8516, Amsterdam

Watzlawick, P. (1985): Selbsterfüllende Prophezeiungen. In: ders. (Hg.): Die erfundene Wirklichkeit. München/Zürich

Wildavsky, A. (1993): Vergleichende Untersuchung zur Risikowahrnehmung: Ein Anfang. In: Bayerische Rück 1993, S. 191-211

Wissenschaftsrat (1996, Hg.): Außeruniversitäre Materialforschung in Deutschland. Köln

Yamane, T. (1976): Statistik – Ein einführendes Lehrbuch, Band 1 & 2. Frankfurt a.M.

Zimmerli, W.C. (1982): Prognose und Wert: Grenzen einer Philosophie des ‘Technology assessment’. In: Rapp, F., Durbin, P.T. (Hgg.): Technikphilosophie in der Diskussion. Braunschweig, S. 139-152

Zimmermann, H.-J., Gutsche L. (1991): Multi-Criteria Analyse. Berlin

Kapitel 3:

Barrows, Th. (1986): Degradable implantant materials: a review of synthetic adsorbable polymers and their applications. Clinical Materials 1, S. 233-257

Chu, C.C. (1983): Survey of Clinically important Wound Closure Biomaterials. In: Szycher, M. (Hg.): Biocompatible Polymers, Metals and Composites. Technomic Publ., S. 477-523

Gethmann, C.F. (1993): Langzeitverantwortung als ethisches Problem im Umweltstaat. In: Gethmann, C.F. et.al. (Hgg.): Langzeitverantwortung im Umweltstaat. Bonn, S. 1-21

Kalbe, J., Koch, R. (1995): Kriterien für biologisch abbaubare Kunststoffe. Spektrum der Wissenschaft 2/1995, S. 78-81

Paschen, H. et.al. (1992): Technikfolgen-Abschätzung zum Raumtransportsystem ‘SÄNGER’. TAB-Arbeitsbericht Nr. 14. Bonn: TAB, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag

Rafler, G. (1995): Neue Entwicklungen bei biologisch abbaubaren Kunststoffen. Spektrum der Wissenschaft 2/1995, S. 81-84

Socher, M., Rieken, Th. (1994): Neue Rohstoffe für neue Werkstoffe – eine Bestandsaufnahme. TAB-Hintergrundpapier Nr. 3. Bonn: TAB, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag

VDI Nachrichten (1997): Mit „Clean-Tech“ bleibt die Werkstatt sauber. VDI-Nachrichten, Nr. 3, 17. Januar 1997, S.16

Weyer, J. (1994): Raumfahrt als umstrittene Großtechnologie. Technikkontroversen und Technikfolgenabschätzung in netzwerktheoretischer Perspektive. In: Grunwald, A., Sax, H. (1994, Hgg.): Technikbeurteilung in der Raumfahrt. Berlin, S. 45-64

Wissenschaftsrat (1996, Hg.): Außeruniversitäre Materialforschung in Deutschland. Köln

Kapitel 4:

Bischof, C. (1993): Nachwachsende Rohstoffe und natürliche landwirtschaftliche Abfallprodukte für die Harz- und Klebstoffherstellung. Tagungsband 'Kleben', SWISS BONDING (Rapperswil/CH, Mai 1993). Duisburg: Print Service Mühlheim

BMBF, Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (1996): Expertendiskussion des BMBF, Innovationschub aus dem Nanokosmos – Stand und Perspektiven

BML, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (1993,Veranst.): Flachs. 2. Statusseminar Flachs, Leipzig, 15. und 16. November 1993. Bonn: BML

Bochmann, M. (1996): Metal Chalkogenide Materials: Chalcogenolato Complexes as „Single-Source“ Precursors. Chem. Vap. Deposition 5, S. 85

Bonnell, D.A. (1993): Scanning Tunneling Microscopy and Spectroscopy. 1. Auflage, New York

C.A.R.M.E.N., Centrales Agrar-Rohstoffe-Marketing und Entwicklungs-Netzwerk (1995): Stärke – nachwachsender Rohstoff als Komponente für Verbundwerkstoffe. Informationsbroschüre. Rimpar: C.A.R.M.E.N.

CLAAS (1994, Verant.): Rohstoffe die unendlich sind. 2. Internationales CLAAS-Symposium, Harsewinkel, 21. September 1994. Harsewinkel: CLAAS

Corriu, R., Leclercq, D. (1996): Neue Entwicklungen der Molekülchemie für Sol-Gel-Prozesse. Angewandte Chemie 13/14, S. 1524

Daimler-Benz (1995): Umwelt und Technik – Nachwachsende Rohstoffe. Daimler-Benz High Tech Report 2, 1995. Stuttgart

Donau Tufting (1994): Produktbewertung – Greenline-Teppichböden. Aktualisierte Kurzfassung. Ingolstadt: Donau Tufting Teppichboden Vertrieb GmbH & Co. KG

Donau Tufting, Gunnar Koch GmbH (1996): Öko-Boden-Guide – Ratgeber für natürliches Wohnen mit konsequent ökologischen Bodenbelägen. Produktionformation. Ingolstadt: Donau Tufting Teppichboden Vertrieb GmbH & Co. KG

Falbe, J., Regitz, M. (1995): Römpp Chemie Lexikon, 9. Auflage. Stuttgart

Fann, W.S. et.al. (1996): Surface modification and patterning of Conjugated Polymers with Near-Field Optical Microscopy: Adv. Mat. 7, S. 573

Fölster, T. (1994): Einsatz von Naturmaterialien in technischen Produkten. In: CLAAS 1994, 4. Vortrag

Franke, W. (1989): Nutzpflanzenkunde, 4. neubearbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart

GMT, Gummi-Metall-Technik GmbH (1996a): Eine gute Verbindung. Produktinformation. Bühl: Gummi-Metall-Technik GmbH

GMT, Gummi-Metall-Technik GmbH (1996b): Einsatz von Bauteilen aus Stahl und Naturkautschuk im Schienenfahrzeugbau. Telefongespräch mit der Firma GMT, Bühl, 28. November 1996

Göpel, W. (1995): Elektrochemische Sensoren und Sensorsysteme für Gassysteme. Nachr. Chem. Tech. Lab. 3, S. 318

Herrmann, A.S. (1994): Bio-Verbundwerkstoffe – nach dem Gebrauch auf den Kompost. In: CLAAS 1994, 3. Vortrag

Herzog, R.O. (Hg., 1930): Der Flachs, Erste Abteilung: Botanik, Kultur, Aufbereitung, Bleicherei, und Wirtschaft des Flachses. Technologie der Textilfasern, Bd. V.1,1. Berlin

Kaim, W. (1996): Neue Entwicklungen der Molekülchemie für Sol-Gel-Prozesse. Angew. Chemie 13/14, S. 1524

Klein, L., Kramer, Th. (o.J.): Biologische Abbaubarkeit von Polymeren. Produktinformation. Weinheim: Firma Carl Freudenberg

Klein, L., Kramer, Th. (1994): Kompostierbare Vliesstoffe. Manuskript zum Vortrag von Dr. Lotte Klein an der Fachhochschule Niederrhein zur Vortragsreihe Recycling im WS 94/95. Weinheim: Firma Carl Freudenberg

Lieber, C.M. et.al. (1996): Anorganische Materialien mit Hilfe von Rastersondenmikroskopen verstehen und manipulieren. Angewandte Chemie 7, S. 748

Mann (1994): Nachwachsende Rohstoffe in der Gegenwart. Neue Landwirtschaft 5, S. 23-26

Michaeli, W. et.al. (1993): Einsatzmöglichkeiten von Flachsfasern in Kunststoffen. In: BML 1993, S. 316-325

Mieck, K.-P., Nechwatal, A., Knobelsdorf, C. (1993): Eigenschaften und Oberflächenmodifizierung von Flachsfasern für Verbundwerkstoffe. In: BML 1993, S. 274-290

Müssig, J. (1995): Möglichkeiten der Substitution von Chemiefasern durch Naturfasern in technischen Produkten, Diplomarbeit, SS 1995, Gerhard Mercator Universität - Gesamthochschule – Duisburg, Maschinenbau / Werkstofftechnik

Müssig, J. (1996): Neue Werkstoffe mit Naturfasern. In: Waskow, F.: Hanf & Co.: Die Renaissance der heimischen Faserpflanzen, 2. überarbeitete und aktualisierte Auflage. Göttingen: Verlag die Werkstatt, S. 139 -145

Neumann, Th. (1996): Imprägnierung von Teppichen mit Naturkautschuk: Telefongespräch mit Herrn Dr. Neumann, Weserland Textilchemie GmbH, Hannover, Oktober

Neumüller, O.-A. (1976): Römpps Chemie-Lexikon. 7. Auflage. Stuttgart

nova-Institut (1996): Das Hanfproduktlinienprojekt (HPLP) – Erarbeitung von Produktlinien auf Basis von einheimischem Hanf, die aus technischer, ökonomischer und ökologischer Sicht kurzfristig realisierbar sind. Unveröffentlichter Abschlußbericht. Hürth/Köln: nova-Institut

Ostertag, W. (1994): Effektpigmente. Nachr. Chem. Tech. Lab. 9, S. 849

Ozin, J.G.A. (1992): Nanochemistry: Synthesis in Diminishing Dimensions. Adv. Mat. 4, S. 612

Philip, D., Stoddart, J.F. (1996): Selbstorganisation in natürlichen und nichtnatürlichen Systemen. Angewandte Chemie 11, S. 1242

Prentiss, M. et.al. (1996): Fabrication of single-mode Polymeric Waveguides Using Micromolding in Capillaries. Adv. Mat. 8, S. 420

Ricken, C. et.al. (1996): Rasterelektrochemische Mikroskopie. Nachr. Chem. Tech. Lab. 5, S. 502

Rost, R. (1996): Spezialitäten für den Waggonbau. Produktinformation. Hamburg: Rudolf Rost Sperrholz GmbH

Rühe, J. (1994): Maßgeschneiderte Oberflächen. Nachr. Chem. Tech. Lab. 12, S. 1237

Sarid, D., Elings, V. (1991): Review of Scanning Force Microscopy. J.Vac.Sci.Technol. B9, S. 431

Schmid, G. (1992): Large Clusters and Colloids, Metals in the Embryonic State. Chem. Rev. 92, S. 1709

Schmid, G. et.al. (1996): European Consortium on Nanomaterials. Adv. Mat. 7, S. 555

Schnegelsberg, G. (1971): Systematik der Textilien. Verbesserter, fotomechanisch vervielfältigter Nachdruck der 1. Auflage. München

Schöllhorn, R. (1996): Übergitter, dünne Filme und kontrollierte Materialsynthese – ein mechanistischer Ansatz. Angewandte Chemie 8, S. 933

Schön, G. et.al. (1995a): A fascinating new field in colloid science: small ligand-stabilized metal clusters and possible application in microelectronics – Part I. Colloid polymer science 237, S. 101

Schön, G. et.al. (1995b): A fascinating new field in colloid science: small ligand-stabilized metal clusters and possible application in microelectronics – Part II. Colloid polymer science 273, S. 202

Seddon, A.B. (1995): Chalkogenide glasses: a review of their preparation, properties and applications. J. of non-crystalline solids 184, S. 4a

Snyder, W. (1992): Scanning Tunneling Microscopy, Atomic Force Microscopy and Related Techniques. Analytical Chemistry 12, S. 116R

Weller, H. (1996): Selbstorganisierte Überstrukturen aus Nanoteilchen. Angewandte Chemie, 10, S. 1159

Wiesendanger, R. (1994): Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy. 1. Auflage, Cambridge

Kapitel 5:

Aluminium-Zentrale e. V. (1992, Hg.): Aluminium Schienenfahrzeuge. Düsseldorf

Automobil-Produktion (1995): Meldungen aus der Branche. Automobil-Produktion, Juni 1995, S. 71

Braess, H.-H. (1993): Gedanken zur weiteren Entwicklung des Personenzugens. ATZ 95, Heft 9, S. 452

Braess, H.-H. et.al. (1988): Das Automobil und seine Werkstoffe im Spannungsfeld zwischen Wunsch, Wissenschaft und Wirklichkeit. ATZ 90, Heft 6, S.339

Brüggemann, H. et.al. (1995): Die Weiterentwicklung der Vierzylinder-Ottomotoren für die neue mittlere Baureihe von Mercedes-Benz. MTZ 56, Heft 5, S. 240

Buhl, H. (1992, Hg.): Advanced Aerospace Materials. Berlin

Cabos, H.-P. (1992): Werkstoffe für Schienenfahrzeuge – Stand und Entwicklungen. Eisenbahntechnische Rundschau 41, S. 745-752

Cabos, H.-P., Fischer, H.-J. (1988): Kunststoffe im Schienenfahrzeugbau – Stand und Aussichten der Anwendung. Kunststoffe 78, S. 242-247

Deutsche Waggonbau AG (1996): Kompetenz mit Zugkraft. Produktinformation. Berlin

DLR, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt e.V. (1996, Hg.): Statusbericht 1996, Institut für Werkstoff-Forschung. Köln

Eisenbahntechnische Rundschau (1986): Forschungsinformation Bahntechnik: Untersuchungen neuartiger Fahrzeugkonzepte für den kombinierten Verkehr Schiene/Straße, Teil 1: 35, S.782, Teil 2: 35, S. 859 – 860

Eisenbahntechnische Rundschau (1987): Roll-out der weltweit ersten FVW-Drehgestelle, 36, S. 100

Eisenbahntechnische Rundschau (1991): Forschungsinformation Bahntechnik: Statusseminar Schnellbahnen, 40, S. 845

Falk, F. (1992): Transporteinrichtungen aus Aluminium für den Bahn- und Straßenverkehr. In: Aluminium-Zentrale 1992, S. 68-71

Hatch, J.E. (1984, Hg.): Aluminum, Properties and Physical Metallurgy. Metals Park, Ohio: American Society for Metals

Heinrich, J. (1996a): Mit moderner Technik raus aus der Talfahrt. VDI Nachrichten, Nr. 40, 4. Oktober 1996, S. 6

Heinrich, J. (1996b): Bahn muß ihr Innovationspotential auch neben der Schiene suchen. VDI Nachrichten, Nr. 40, 4. Oktober 1996, S. 6

Heinrich, J. (1996c): Mercedes-Chef fordert Schulterschuß von Bahn und Brummi. VDI Nachrichten, Nr. 40, 4. Oktober 1996, S. 6

Hocking, M.G. et.al. (1989): Metallic and Ceramic Coatings: Production, HT Properties and Application. Essex

Hyatt, M.V., Axter, S.E. (1991): Aluminum Alloy Development for Subsonic and Supersonic Aircraft. In: Hirano, K. et.al. (Hgg.): Science and Engineering of Light Metals. Tokyo: Japan Institute of Metals, S. 273-280

Janssen, B. (1994): Automobil-Leichtbau: Wettbewerb der Werkstoffe. VDI-Z 136, Heft 7/8, S. 68

Kawazoe, K. (1992): U-Bahn-Wagen aus Aluminium-Großprofilen für Singapur und Tokio. In: Aluminium-Zentrale 1992, S. 109-114

Köhler, E. et.al. (1995a): Aluminium-Gießverfahren zur Darstellung leichter Motor- und Fahrzeugkomponenten. Sonderausgabe ATZ/MTZ, Leichtmetalle im Automobilbau (1995/96), S. 34

Köhler, E. et.al. (1995b): LOKASIL-Zylinderlaufflächen – Integrierte lokale Verbundwerkstofflösung für Aluminium-Zylinderkurbelgehäuse. Sonderausgabe ATZ/MTZ, Leichtmetalle im Automobilbau (1995/96), S. 38

Kramer, R. (1986): Neue S-Bahn-Züge für Berlin. Eisenbahntechnische Rundschau 35, S. 521-530

Krappel, A. et.al. (1995): Der BMW Sechszylindermotor in neuer Hubraumstaffelung und innovativer Leichtbauweise. MTZ 56, Heft 6, S. 326

Menne, R.J. et.al. (1995): Zukünftige Pkw-Antriebskonzepte. MTZ 56, Heft 3, S. 120

Menne, R.J. et.al. (1994): Entwicklungstendenzen bei Pkw-Dieselmotoren. MTZ 55, Heft 6, S. 322

Nowak, F., Leo, R.J. (1987): Fortschrittliche Faserverbundwerkstoffe – Grundlagen und Anwendungen im Schienenfahrzeugbereich. Eisenbahntechnische Rundschau 36, S. 383-388

Peters, M., Winkler, P.J. (1992): Leichtmetalle in der Luft- und Raumfahrt: I. Stand der Werkstoffentwicklung. Metall 46, S. 1226-1234

Piech, F. (1992): 3 Liter/100 km im Jahr 2000?. ATZ 94, Heft 1, S. 20

Rendigs, K.H. (1996): Aluminum Structures used in Aerospace – Status and Prospects. ICAA, Grenoble (private communication)

Rost, R. (1996): Spezialitäten für den Waggonbau. Produktinformation. Hamburg: Rudolf Rost Sperrholz GmbH

Socket, E. (1996): Werkstoffeinsatz im Güterfahrzeugbau am Beispiel einer Spreizhauben-Schiebewandwageneinheit: Gespräch mit Herrn Socket (Deutsche Waggonbau AG, Werk Niesky) während der Inno Trans 1996 in Berlin, 17. Oktober 1996

Theissen, M. et.al. (1992): Künftige Anforderungen an den Fahrzeugantrieb. ATZ 94, Heft 11, S. 562

Walter, G. (1990): Stand und Perspektiven der Kunststoffanwendung im Automobilbau. Kunststoffe 80, Heft 3, S. 293

