

DESIGNKONFLIKTE BEI DER UMWELT- UND RESSOURCENSCHONENDEN WERKSTOFFWAHL

Hans Dieter Hellige

Vortrag im Rahmen des Symposiums "Leitbilder für nachhaltige Technikgestaltung" des Zentrums für Interdisziplinäre Technikforschung der TU Dresden und der Friedrich Ebert-Stiftung, Februar 1995. In veränderter Fassung erschienen in: H.-P. Böhm, H. Gebauer, B. Irrgang (Hrsg.), Nachhaltigkeit als Leitbild der Technikgestaltung, Dettelbach 1995, S. 171-189

Die Werkstoffwahl ist aus der Fertigungs- und Gebrauchsperspektive, vor allem aber aus volkswirtschaftlicher und ökologischer Sicht eine besonders folgenreiche Entscheidung. Denn durch sie wird ein sehr großer Teil der Produktkosten festgelegt: In Produkten des Maschinenbaus sind es durchschnittlich 40-50%, bei Großmaschinen 50-70% und in der Serienfertigung von PKWs sogar über 70%. (Ehrlenspiel, Kostengünstig konstruieren, S.111-127). Über die Auswahl und Kombination der Werkstoffe werden vor allem aber auch wesentliche *Gebrauchseigenschaften* und allgemeine Wirkungspotentiale wie die Schadstoff-Emissionen, Deponieaufkommen sowie Energie- und Ressourcenverbrauch bestimmt. Werkstoffe sind das dauerhafteste Element technischer Gebilde, sie überleben den Marktzyklus, die Gebrauchsphase und meist sogar den Technologielebenszyklus.

1 Stellenwert der Werkstoffwahl in der Konstruktionsmethodik

Der strategische Charakter der Werkstoffwahl wurde in den Konstruktionsmethodiken und im Regelwerk der Ingenieurverbände nicht immer gleich hoch bewertet. In der Frühzeit betonten die Konstruktionslehren gegenüber der allseits üblichen Überdimensionierung die Notwendigkeit einer möglichst materialsparenden Auslegung. Vor allem Redtenbacher und Bach propagierten die Verhältniszahlen bzw. die exakte Festigkeitsberechnung als Methode, um eine ausreichende Material- und Gestaltfestigkeit und damit Funktionssicherheit mit geringstem Werkstoffaufwand zu erlangen. In den ersten Jahrzehnten dieses Jahrhunderts stand mit Ausnahme der rohstoffknappen Kriegsjahre das ressourcenschonende Konstruieren ganz im Schatten der Ausweitung des Angebotes an neuen Materialien und Hochleistungswerkstoffen. Erst unter dem Druck von Verfügbarkeitsproblemen von den 30er bis zu den 50er Jahren erhielt die Werkstoffwahl in den Konstruktionslehren wieder eine zentrale Stellung. So werteten Kesselring, Wögerbauer, Matousek und Tschochner sie als ein "Haupteinflußfaktor" oder eine "konstruktive Grundrealität".

In den 60er Jahren sank die Bedeutung der Werkstoffwahl im System der konstruktiven Entscheidungen. Das zunehmend reichhaltigere Angebot immer leistungsfähigerer und spezialisierterer Materialien ließ sie als ein reines Kosten- und Beschaffungsproblem, nicht aber als einen strategischen Faktor der Steuerung von Stoffströmen und von Ressourcenverbrauch erscheinen. Deshalb galt sie eher als eine Angelegenheit der Wertanalyse und ihrer vorwiegend kostenorientierten Bewertungsmethoden. Auch die sich aus der weitgehend unkontrollierten Inflation chemischer Werkstoffe häufenden Aufdeckungen von Gefahrstoffemissionen waren trotz wachsender öffentlicher Sensibilität kein Anlaß, der Werkstoffwahl unter Sicherheits- und Umweltaspekten durch entsprechende Gestaltungsrichtlinien einen zentralen Stellenwert in der Konstruktionslehre beizumessen. Lediglich für Arbeitsplatzkonzentrationen und einzelne Sicherheitsaspekte entstanden spezielle Gestaltungsempfehlungen.

Die Werkstoffwahl ist eng mit anderen strategischen Designentscheidungen verwoben, entsprechend hoch ist das Ausmaß von Zielkonflikten für den Konstrukteur. Bereits Wögerbauer zählte insgesamt sechzehn Einflußgrößen auf, die ein "bewußt arbeitender Ingenieur" bei der Stoffauswahl zu beachten habe.¹ Tschochners "Werkstoff-Prüfplan" reduzierte die Zahl zwar auf acht Faktoren, doch war auch bei ihm die Verknüpfung von Werkstoff-Funktion, Materialeigenschaften und Einsatzbedingungen nur über ein mehrstufiges Bewertungsverfahren zu erlangen (vgl. die Abb.).² Auch für Pahl/ Beitz ist die "starke gegenseitige Beeinflussung konstruktiver, fertigungstechnischer und werkstofftechnischer Gesichtspunkte und Gegebenheiten" so hoch, daß sie eine enge Zusammenarbeit zwischen Konstrukteuren, Fertigungs- und Werkstoffingenieuren fordern.³ Außer einer Einordnung der Werkstoffentscheidungen in das Phasenmodell bieten sie dem Konstrukteur jedoch kaum eine methodische Unterstützung zum Erkennen und Bewältigen der Zielkonflikte (vgl. Abb.).⁴

In neuerer Zeit gibt es eine Reihe von Bestrebungen, Konstrukteure mit Werkstoff-Datenblättern oder integrierten Werkstoff-Informationssystemen bei der Werkstoffwahl zu unterstützen. Ein sehr großer Teil der Informationsmaterialien stammt dabei von den Rohstoff- bzw-

¹ Wögerbauer, Sparstoffe im Feingerätebau, S. 154.ff.; Wögerbauer, Werkstoffsparen. Die technischen

² Tschochner, Konstruieren und Gestalten, S. 40 ff. (Form, Abmessungen, Stückzahl, Gewicht, Preis, Normung, Lebensdauer, Ästhetische Anforderungen).

³ Pahl, Beitz, Konstruktionslehre, 3. Aufl., S. 389.

⁴ Wolfgang Beitz, G. Hähn, Technische Keramik. Werkstoffgerechtes Gestalten und Verbinden, in: Neue Werkstoffe. Einsatzgebiete heute, Anwendungsmöglichkeiten morgen (VDI-Berichte 670, Bd. 1), Düsseldorf 1988, S. 109-128, Abb. S. 111.

Werkstofflieferanten selbst. Die in diversen Prospekten, Datenblättern und DV-Informationquellen von der Diskette bis zum Datenbankfernzugriff ausgebreiteten Angaben über Materialeigenschaften und Kennwerte sind jedoch sehr unübersichtlich und schlecht zugänglich. Einige Branchen wie z.B. die Kunststoffhersteller wollen deshalb den Wildwuchs der Informationsquellen durch gemeinschaftliche Produktinformationssysteme wie die CAMPUS-Datenbank eindämmen. Mit einer ergonomischen BNO und einheitlich aufbereiteten Materialkennwerten soll der Konstrukteur hier eine Materialvorauswahl für definierte Anforderungsprofile treffen können. Angaben zur Toxizität und Umweltschädlichkeit von Werkstoffen findet er in dieser Datenbank natürlich nicht. Die Hersteller konnten sich nicht einmal auf einen Vergleichsmaßstab für die Bewertung der Chemikalien-Beständigkeit und Korrosionsfestigkeit einigen. Die Unübersichtlichkeit, Interessenabhängigkeit und insgesamt geringen Benutzerfreundlichkeit veranlaßt neuerdings technische Überwachungsvereine und wissenschaftliche Institutionen, ihre seit langer Zeit gesammelten Werkstoffinformationen allgemein über Fernzugriff und Speichermedien zugänglich zu machen. Hier sind die Werkstoff-Datenbanken des RWTÜV (Solmat) und des Dresdner Informationszentrums für Werkstoffanwendung zu nennen.

Doch trotz verbesserter Softwareergonomie und einheitlicher Datenorganisation sind die Konstrukteure auch und gerade durch diese Datenbanken einer unüberschaubaren Fülle von Einzelinformationen ausgeliefert, die nicht auf Auswahlkriterien bezogen werden und daher das Auswahlproblem noch verschärfen. In den letzten Jahren hat es deshalb verschiedene Anstrengungen zu wissensbasierten Werkstoff-Informationssystemen und rechnergestützten Bewertungsmethoden gegeben, die den Entscheidungsprozeß selbst erleichtern sollen. So möchte das System für die "Rechnerorientierte Werkstoffwahl" (RUWA) zwischen relationalen Werkstoff-Datenbanken als Faktenquelle und dem Konstrukteur eine objektorientierte Entwicklungsumgebung installieren, mit der er im Dialog Werkstoff-Eigenschaftsausprägungen, Gebrauchsanforderungen, Gestaltvarianten und Fertigungsverfahren zur Deckung bringen soll. Dazu wird der gesamte Auswahlvorgang in 5 Submodelle oder Domänen untergliedert, aus deren logischer Verknüpfung unter Beachtung von Zielhierarchien und Regelmechanismen der geeignete Werkstoff aussortiert werden soll.

Die bisherigen Ansätze für einen wissensbasierten Abgleich von Anforderungs- und Eigenschaftsprofilen in der Werkstoffwahl leiden jedoch insgesamt an einem Mißverhältnis von elaboriertem Toolentwurf und völlig unzureichender Aufbereitung der Werkstoffinformationen. Wie gewaltig der Aufwand für ein die Konstrukteure in der Entscheidung wirklich unterstützendes Informationssystem wäre, wird anhand von Spezialdatenbanken deutlich, die Werkstoffverträglichkeitsmatrizen einzelner Stoffgruppen für die recyclinggerechte Werkstoffwahl enthalten oder die Teile- und Stoffkataloge zu bestimmten Konsumgütern dokumentieren.

(Beitz, Wende; Brusberg, Döring, Baur). Bei insgesamt 6 Millionen Substanzen und Legierungskombinationen (Steinhilper VDI-N, 1993, Nr.30, S. 12) und bei den allgemein verfügbaren 40.000 metallischen und ebenso vielen nicht-metallischen Konstruktionswerkstoffen zeigt sich sehr bald, wie die Informationsaufbereitung der Werkstoffinflation hinterherhinkt.

Doch die Entwickler von Werkstoff-Expertensystemen verkennen m. E. auch, daß es sich bei der Auswahl von Werkstoffen nicht nur um ein Problem der *Informationsaufbereitung und -verarbeitung* handelt, das sich ganz oder teilweise auf den Rechner übertragen läßt. Bei der Werkstoffwahl geht es vor allem um ökonomische, soziale und ökologische Prioritätensetzungen. Diese lassen nicht vorab in definierten Zielhierarchien und Entscheidungsregeln festlegen, sondern ergeben sich wesentlich aus inner- und überbetrieblichen Kooperationsprozessen sowie aus offenen oder verdeckten Entscheidungskonflikten. Die Kompromißbildung zwischen den Perspektiven und Interessenssphären der unterschiedlichen Akteure kann, so meine Grundannahme, nicht algorithmisiert werden. Auch neuere Ansätze im Rahmen des Concurrent Engineering wie das auf alternativen Selektions-Algorithmen basierende Multikriterien-Optimierungs-Modul der Design Function Deployment -Knowledge Base des Londoner "Engineering Design Centre" kann m. E. die Zielkonflikte zwischen Hersteller-, Anwender bzw. Benutzer- und allgemeinen Interessen nicht über einer rechnergestützte Polyoptimierung entscheiden. Bei der Abbildung von konfliktbehafteten kooperativen Entscheidungsprozessen im Konstruktionsprozeß, so meine These, stoßen exakte, algorithmische wie auch unscharfe formale Modellierungsansätze an ihre Grenzen. Hier führen deskriptive Methoden wie problemstrukturelle, historisch-systemische und historisch-dynamische Analyseansätze, so hoffe ich, weiter

Ich möchte deshalb frühere Ansätze zur Problemstrukturierung in der Konstruktionsmethodik aufgreifen und erweitern, insbesondere Wögerbauers und Tschochners Werkstoff-Prüfpläne, um zu testen, inwieweit deren Korrelationsnetze der konstruktiven Teilaufgaben ein adäquateres Beschreibungsmodell für die Problemstruktur, die unterschiedlichen Perspektiven und Zielkonflikte von Konstruktionsentscheidungen darstellen. Mit einer ersten Skizze der Werkstoffwahl im "Dynamischen Problemstrukturplan" möchte zugleich ich einen Überblick geben, in welche Entscheidungsprobleme und Zielkonflikte Entwickler und Konstrukteure bei der Umsetzung von Leitbildern der ressourcen- und umweltschonenden Technikgestaltung geraten. Ich betrachte sehr skizzenhaft die strategischen Designentscheidungen aus den Perspektiven der Entwickler und des Fertigungsbereiches beim Hersteller, der gewerblichen und privaten Anwender sowie der Gesamtgesellschaft und der Umwelt.

2 Zielkonflikte der Werkstoffwahl aus der Perspektive der Entwickler beim Hersteller

Im Mittelpunkt der werkstofftechnischen Betrachtung stand immer die wirkprinzipgemäße physikalische Funktion des Werkstoffes, denn nur die jeweils geforderten mechanischen Eigenschaften (Härte, Elastizität, Zug-, Biege-, Druck-, Bruch-, Verschleißfestigkeit u.a.), elektrischen, magnetischen (Leit- bzw. Isolationsfähigkeit), thermischen (Warmfestigkeit) und chemisch-physikalischen (Korrosions- und Oxydationsbeständigkeit) Eigenschaften garantierten das einwandfreie Funktionieren des technischen Gerätes oder Verfahrens. Die Hauptentwicklungsrichtung der Werkstofftechnik bestand in der Vergangenheit so auch in einer fortlaufenden Verdrängung standortgebundener rohstoffnaher Werkstoffe wie Holz, Steine und formbare Erdschubstanzen mit einem niedrigen Leistungs- und Spezialisierungsniveau. An ihre Stelle traten immer stärker aufbereitete, in ihren Werkstoffeigenschaften optimierte Materialien. Aus der Eigenaufbereitung durch den Produzenten entstand ein zunächst handwerklich-kleingewerblicher, später industrieller Gewerbezweig, der hocharbeitsteilig metallische, keramische und andere nicht-metallische, insbesondere chemische Werkstoffe herstellte. Vermehrte Arbeitsteilung und Konkurrenz der Anbieter führte zur fortlaufenden Ausdifferenzierung des Werkstoffangebotes mit jeweils sehr speziellen Eigenschaftsprofilen und verbessertem Leistungsvermögen, aber auch mit höherem Schadstoff- und Abraumaufkommen. (Schaubild: Substitutionskette)

Durch die Anpassung an unterschiedliche konstruktive und funktionale Anforderungen sind die Werkstoffe zum stofflichen Pendant der verschiedenen Gestaltungsmerkmale und -richtungen geworden. Sie entsprechen ganz dem Niveau und Spezialisierungsgrad der Produkt-Funktionalität und sind daher kaum ohne gründliches Redesign substituierbar. Komplexe oder variierende Funktionsanforderungen können mit Hilfe einer Werkstoffkombination oder Strukturierung von Werkstoffschichten erfüllt werden. Die Materialien sind jeweils stark abhängig von der Bauteilgeometrie und der Baustruktur. Sie folgen dem Niveau der Leistungsparameter und Größendimensionierung und gliedern sich dementsprechend in konventionelle bzw. Standardwerkstoffe für normale Beanspruchungen und Hochleistungswerkstoffe. Je größer ein technisches Aggregat oder Konstrukt und je höher das Leistungsniveau der Wirkparameter, desto größer sind die funktionellen Anforderungen an die jeweiligen Werkstoffe bzw. Werkstoffkombinationen: "Je höher die Belastung, desto schärfer die Einengung der Stoffwahl, bis schließlich für höchste Ansprüche jeweils nur der zur Zeit leistungsfähigste Werkstoff in Betracht kommt." (Benkert)

Größtdimensionierung und Grenzleistungsstrategien führen naturgemäß eher zu Materialbrüchen und Werkstoffversagen und zu einem entsprechenden Einsatz von hochfesten, hoch-

temperaturbeständigen Konstruktions- und Funktionswerkstoffen. Dies kann - wie zeitweise im Bereich von Kraftwerkskesseln - sogar ausgesprochene Fehloptimierungen nach sich ziehen (austenitischer Stahl). Ähnliches gilt für immer extremere Leichtbauweisen, die vor allem von der Luft- und Raumfahrt mit ihrem Bedarf an äußerster Leistungssteigerung und Werkstoffausnutzung ausgingen. Gewichts- und Betriebsenergieeinsparung sind hier oft verbunden mit hohem Energieeinsatz bei der Werkstoffherstellung (Aluminium, Faserverbundwerkstoffe), sowie mit teilweise riskanter Materialbeanspruchung und entsprechend höherem Wartungs- und Sicherheitsaufwand. Vielfach aber auch mit vermehrten Schadstoffanteilen und verschlechterter Recycling-Qualität, dies gilt besonders für die kaum recyclebaren Faserverbundwerkstoffe. Ökologische Gestaltungsziele wie die Materialeinsparung, Gewichtsreduzierung, Senkung des Transportenergieaufwandes und Recyclingfähigkeit können somit nicht nur mit den traditionellen Optimierungskriterien sondern auch untereinander konkurrieren (OTA, S. 8, 23-30).

Werkstoffe korrelieren schließlich auch in hohem Maße mit dem Skalierungsniveau. Preiswerte Massenwerkstoffe und standardisierte, zum Teil sogar national und international genormte Werkstoffqualitäten stehen Spezialwerkstoffen mit begrenztem Einsatzspektrum und entsprechend höherem Preis gegenüber. Wie bei den Produkten besteht auch in der stofflichen Entwicklung eine Tendenz zu kleineren 'Losgrößen' bzw. zu anwendungsspezifischen Materialien. Werkstoff-Spezialisten großer Unternehmen beklagen immer wieder den Hang vieler Konstrukteure und Werkstoffwissenschaftler zu ausgefallenen Spezial- oder gar "Superwerkstoffen", während die Verwendung und Weiterentwicklung der preiswerten Standardwerkstoffe vernachlässigt wird (Razim, S.1 ff.). Dieser Konstruktionsstil, der betriebswirtschaftlichen Ökonomie und den Recycling-Anforderungen gleichermaßen widerspricht, ist das Resultat eines insbesondere für die USA und Westeuropa typischen Innovationsmusters der Werkstoffentwicklung: Militär, Luft- und Raumfahrt und die Kernenergie übernahmen hier die Vorreiterrolle im Werkstoffsektor und lenkten die Entwicklungsrichtung ohne Rücksicht auf Kosten und ökologische Folgen in den Hochleistungsbereich. Aufgrund skalenökonomischer Erfordernisse diffundierten die Hochleistungswerkstoffe dann in zivile Techniken. Hierzu waren aufwendige Anpassungs- und Downgradingprozesse notwendig. In Japan geht man vielfach den umgekehrten Weg: neue Werkstoffe werden zunächst in Massen- und Konsumgütern erprobt und dann erst für anspruchsvollere Produkte hochgezüchtet. Die ökonomisch in vieler Hinsicht erfolgreichere japanische Upgrading-Strategie birgt freilich die Gefahr in sich, daß noch unausgereifte Werkstoffe mit umweltschädlichen Substanzen aufgrund der frühen Massendiffusion weiter verbreitet und weniger rückholbar sind.

3 Zielkonflikte der Werkstoffwahl aus der Perspektive des Fertigungsbereiches beim Hersteller

Neben der ausschlaggebenden Bedeutung der Werkstoffwahl für die technisch-physikalische und konstruktive Produktstruktur ist ihr Einfluß auf die Fertigungsgerechtigkeit schon früh erkannt worden. Vor allem der Übergang zur Serien- und Massenfabrikation wie zum Schnellbetrieb hat an der Jahrhundertwende den Zusammenhang von Werkstoffqualität, Fertigungseigenschaften und Materialökonomie deutlich werden lassen. Der Übergang zu höheren Drehzahlen und kürzeren Taktraten bei Werkzeugmaschinen war jeweils nur bei größerer Festigkeit und Steifigkeit der eingesetzten Werkstoffe möglich. So besteht zwischen der Steigerung der Schnittgeschwindigkeiten von Drehmaschinen und der Weiterentwicklung der Schneidstoffe eine rekursive Beziehung. Während die Fertigungsanforderungen im Maschinenbau die Tendenz zu Qualitätssteigerungen eher verstärkte, kamen in den feinwerktechnischen Massenprodukten anstelle der früher verwendeten metallischen Werkstoffe vielfach einfachere Preßmaterialien und neue chemische Stoffe zum Einsatz, die sich besser für die automatische oder halbautomatische Bearbeitung eigneten. Die stärkere Beachtung von Fertigungs- und Kostenaspekten bei der Werkstoffwahl war und ist bei Konsumgütern meist mit Zugeständnissen bezüglich langfristiger Gebrauchsqualitäten insbesondere Reparierbarkeit, Lebensdauer und Recyklierbarkeit verbunden.

4 Zielkonflikte der Werkstoffwahl aus der Perspektive der privaten und gewerblichen Nutzer

Gegenüber der lange Zeit dominierenden Perspektive der rein technischen Funktionstüchtigkeit und der Fertigungseigenschaften von Werkstoffen sind die Kriterien der Gebrauchsphase erst spät in den Blick der Konstruktionsmethoden gekommen. Dabei wirkt sich die Werkstoffwahl über mögliche Schadstoffbelastungen und Sicherheitsrisiken unmittelbar auf die gewerbliche und private Nutzung aus. Die Fallgeschichten der Schwermetalle Blei, Quecksilber und Cadmium, der Isoliermaterialien bzw. Kühl- und Flammenschutzmittel Asbest, PCP und FCKW demonstrieren nicht nur einen äußerst sorglosen Umgang mit diesen Schadstoffen über lange Zeiträume hinweg, sie zeigen darüber hinaus die Verdrängungsmechanismen und das ausschließlich wirtschaftlich motivierte Festhalten an ihnen auch noch nach der Entdeckung und dem wissenschaftlichen Nachweis ihrer Schädlichkeit. Die Verbandsaktivitäten für einen produkt- bzw. produktionsintegrierten Umweltschutz und die Forderungen nach einer konsequenten Schadstoffvermeidung und der Auswahl verwertungsgerechter Werkstoffe im Rahmen des recyclinggerechten Konstruierens sind aber

deutliche Signale dafür, daß sich auch die Konstrukteure "von Altlasten befreien" (Steinhilper) und von sich aus eine umweltbewußte Werkstoffgestaltung anstreben.

Die Werkstoffwahl bestimmt wesentlich die Kosten, Qualität und Sicherheit des Gebrauchs, indem sie die Bearbeitungseigenschaften, die Beanspruchungsgrenzen, die Bruchfestigkeit, schädliche Nebenwirkungen sowie Verbrauchsmaterialien, Instandhaltungs- und Wartungsaufwand festlegt. Über den Werkstoffeinsatz begrenzt der Konstrukteur vor allem auch die Gesamtlebensdauer des Produktes. So sind extreme Materialeinsparung, der Einsatz schnell korrodierender Materialien und die Verwendung von Kunststoffen statt Metallen in stark beanspruchten Konstruktionselementen in vielen Produkten des alltäglichen Bedarfs lebensverkürzende Faktoren. Dabei erzwingen mangelnde Korrosionsfestigkeit und ungünstige Verschleißigenschaften nicht nur einen vorzeitigen Produktaustausch wie z.B. bei der berühmten "Rostlauben-Generation" in den 70er Jahren, einer gezielten Obsoleszenz-Strategie der Automobilhersteller gegen den stagnierenden Autoabsatz, fehlende Dauerbelastbarkeit und vorzeitige Materialermüdung können darüber hinaus auch die Gebrauchssicherheit in den Spätphasen des Produktlebenszyklus erheblich beeinträchtigen.

Aufgrund ihrer Einbindung in betriebswirtschaftliche Kalküle und gestützt durch kurzsichtiges Kundenverhalten neigen die Konstrukteure noch immer zu einer herstellungs- und anschaffungskosten-orientierten Kurzzeitperspektive, die die Betriebskosten und den späteren Aufwand für Reparaturen und vorzeitige Neuanschaffung nicht berücksichtigt. Diese Tendenz wird durch die Politik schneller Produktwechsel bei Konsumartikeln, insbesondere im Bereich der I- und K-Techniken, noch gefördert. Auch die Wertanalyse und die technisch-wirtschaftlichen Bewertungsmethoden vernachlässigten bislang die langfristigen Gebrauchseigenschaften zugunsten von Herstellungs- und Investitionskosten. Erst die Öko-Bilanzen und die Ansätze für eine integrierte Produktlinienanalyse bilden hier ein notwendiges Korrektiv, da sie den gesamten Technologielebenszyklus zugrundelegen und zusätzlich den Energieverbrauch auf allen Stufen der Herstellung, des Transportes und Gebrauches der Materialien einbeziehen. Infolge der zusätzlichen Berücksichtigung schädlicher Folgen bei der Stoffgewinnung im Ursprungsland (z.B. Abraumengen, toxische Rückstände) überschreitet die konsequente Öko-Bilanzierung aber die "Systemgrenze" marktwirtschaftlicher Kalkulation und bürdet so den Konstrukteuren Zielkonflikte auf, die eigentlich nur auf gesamtgesellschaftlicher, politischer Ebene zu lösen wären.

5 Zielkonflikte der Werkstoffwahl aus der Perspektive der Gesamtgesellschaft und der Umwelt

Alle mit der Werkstoffnutzung verbundenen Probleme gewinnen mit der Massenausbreitung der Produkte eine neue, über den unmittelbaren Nutzungsbereich hinausgehende Dimension. Summierungs-, Kombinations- und Kumulationswirkungen machen viele Werkstoffe zu einem regelrechten Diffusionsrisiko (vgl. Hellige, Von der programmatischen zur empirischen Technikgeneseforschung, S.216 ff.). Selbst kleinste Mengen schädlicher Substanzen in Produkten werden durch massenhafte Vermehrung und Verteilung zu ökologischen Belastungen. So hat die in dem Umfang nicht erwartete Ausbreitung der Faxtechnik zu einer unkontrollierten Vermehrung und Verteilung umweltschädlicher Chemo- bzw. Thermopapiere geführt. Selbst bei neu entwickelten Fabrikaten sind nach Feststellung des Umweltbundesamtes über die Hälfte bei der späteren Deponierung nicht trinkwasserverträglich. Der schon seit längerem verfügbare und seit Beginn der 90er Jahre als preiswertes Massenprodukt angebotene Tintenstrahldruck auf Normalpapier wird dagegen erst seit 1993/94 auf die Fauxgabe übertragen, allerdings zu einem gegenüber den Normalgeräten doppelt so hohen Preis. Doch auch die Tintenstrahldrucker waren aufgrund der toxischen Eigenschaften der meisten Tinten nicht für den Allgemeinverbrauch gestaltet. Besonders diffusionsriskant war die Entscheidung der Hersteller von Laser- und Tintenstrahldruckern sowie Trockenkopierern, Einweg-Tonerkartuschen zu verwenden. Bereits 1991 summierte sich der weltweite Kartuschenverbrauch zu einem Güterzug von 400 km Länge.

Der Konstrukteur hätte demnach bei Produkten, für die eine allgemeine Nutzung anvisiert wird, vorab auf eine massenverbreitungsgerechte Wahl von Produktwerkstoffen und Verbrauchsmaterialien zu achten. Doch gerät er dann in ein schwer lösbares Dilemma: Eine sofortige Verwendung diffusionsgerechter Materialien erfordert einen zusätzlichen F&E-Aufwand und meist auch höhere Anschaffungskosten. Dies gefährdet u. U. die Wettbewerbschancen gegenüber Anbietern, die die Produktfolgen externalisieren. Eine auf den Zeitpunkt der beginnenden Diffusion verschobene Werkstoffumstellung zugunsten ökologisch unbedenklicherer Materialien zieht dagegen meist weitergehende Änderungen am Produkt und Herstellungsprozeß nach sich, die der Kostensenkungsstrategie für den Massenabsatz zuwiderlaufen.

Die Perspektive der Gesamtgesellschaft und der Umwelt spielte in bezug auf Werkstoffe in der Vergangenheit meist nur bei extremen Schadstoffbelastungen und bei Verfügbarkeitslücken in Kriegszeiten eine Rolle. Staatliche Interventionen waren meist punktuell und sporadisch, so daß bis heute kein technisches Regelwerk für eine sozial- und umweltverantwortliche Werkstoffwahl zustandekam. Erst die massiven Deponierungsprobleme seit den 80er Jahren führten dazu, daß die Endphase des Produktlebenszyklus zu einem unübersehbaren Faktor der

Werkstoffwahl geworden ist. Die nun geforderten guten Recyclingeigenschaften der verwendeten Materialien lassen sich aber in der Regel nicht - wie bei zusätzlichen Anforderungen in der Vergangenheit - über bloße Eigenschaftsanpassungen, Leistungssteigerungen und Spezialisierungen erreichen. Vielmehr erfordert die Zielvorgabe konsequenten Recyclings eine Trendwende in der werkstofftechnischen Entwicklung insgesamt. Das Entstehen immer neuer Einsatzfelder, die ständig steigenden funktionalen und gebrauchsbetonten Anforderungen und nicht zuletzt die Überkapazitäten bei Massenwerk- bzw. kunststoffen haben bisher die Entwicklung in Richtung hochspezialisierter "Werkstoffe nach Maß" gedrängt: "Der unübersehbare Trend geht dahin, Materialien mit immer genauer vorausbestimmbar, einem vorher definierten Bedarf entsprechenden Stoffeigenschaften zu erzeugen. Die Werkstoffentwicklung nach dem Prinzip von 'Versuch und Irrtum' wird mehr und mehr abgelöst durch 'Material Tailoring' (maßgeschneiderte Werkstoffe)" (Rempp, 1976). Das "Material Design" soll damit die geforderten Materialeigenschaften an die geplante Funktion anpassen und nicht mehr umgekehrt die Konstruktion werkstoffgerecht gestalten.

Dieser Trend geht einher mit einer immer breiteren Verwendung von Faser- und Keramik-Verbundwerkstoffen und Verbundkonstruktionen sowie mit einem überproportionalen Wachstum von Oberflächenbeschichtungen. Auch hier setzen sich zunehmend der "Mehrschichtencompound" und die "Oberfläche" mit maßgeschneiderten Eigenschaftsprofilen durch sowie neuerdings funktionelle Gradientenwerkstoffe, die abrupte Stoffübergänge vermeiden und infolgedessen seltener versagen sollen. Auf diese Weise können widersprüchliche Anforderungen platzsparend erfüllt, längere "Lebensdauern" erzielt, oft aber auch nur besonders raffinierte optische Wirkungen hervorgerufen werden. Der nächste Schritt in der stofflichen Funktionsspezialisierung sind die sogenannten intelligenten Materialien ("smart materials"), die keine festen Eigenschaften mehr besitzen, sondern sich aufgrund funktioneller Differenzierung der Verbundstruktur und Oberfläche sowie durch gezielte Dotierung mit Fremdstoffen an Umgebungsbedingungen anpassen können. Den Höhepunkt bildet dann die "Nanotechnologie", d. h. das Maßschneidern von Werkstoffen auf atomarer und molekularer Ebene mit einem scheinbar unbegrenzten Potential an stofflicher Leistungssteigerung und funktioneller Anpaßbarkeit (Grupp). Hier ist die Werkstofftechnik, wie Erhard Hornbogen es treffend formuliert hat, in ihr "postmodernes Stadium" getreten: alles scheint möglich, die individuelle Anwendung bestimmt die Werkstoffgestaltung, die Grenzen des natürlichen Stoffangebotes werden endgültig überwunden. Doch gerät die fortschreitende Werkstoff-Individualisierung dadurch möglicherweise in einen verstärkten Konflikt mit dem Kreislaufprinzip und ökologischen Kriterien.

Denn durch "Designer-Werkstoffe" erzielte und erzielbare Nutzensgewinn einer Gewichts- und Betriebsenergie-Einsparung und Lebensdauer-Verlängerung wird bislang mit ökologisch be-

sonders problematischen Ausrüstungschemikalien, Materialverunreinigungen und deutlich verschlechterten Wiederverwertungseigenschaften erkaufte. Die Tendenz zu maßgeschneiderten Werkstoffen bzw. Werkstoffkombinationen und zur chemischen "Veredelung" läuft nämlich wegen ihres stark dissipativen Charakters den Bedingungen eines rationellen Recycling diametral entgegen. Denn die Werkstoffindividualisierung führt zu immer kleineren Materialeinsatzmassen, die weit verstreut sind und daher einen wesentlich höheren Sammlungs-, Entmischungs- und Wiederaufbereitungsaufwand erfordern. Die Komplexitätssteigerung und Maßfertigung beim "Material Design" verkompliziert die entsprechenden Prozesse beim Altstoffrecycling, wobei im Extremfall das Know-how und die Aufbereitungskosten dem Gestehungsaufwand entsprechen.

Recycling benötigt dagegen anstelle hochdifferenzierter Werkstoffsortimente mit immer komplexeren Materialkombinationen und feinkörnigeren Durchmischungen Sortenreinheit, einheitliche Einsatzmaterialien, wenn möglich Normwerkstoffe, und leicht trennbare Werkstoffverbunde. Aufgrund dieser die traditionelle Entwicklungsrichtung hemmenden Effekte konsequenter Recycling-Orientierung plädieren die Anhänger einer fortschreitenden Werkstoff-Individualisierung für eine Aufrechnung von Energieeinsparungs- und Recyclingaspekten: Für eine volle Ausschöpfung der Gewichts- und Transportenergie-sparenden Wirkung von Faserverbundwerkstoffen beispielsweise in Automobilen sollen die Defizite beim Recycling bewußt in Kauf genommen werden. Die sogenannte thermische Verwertung wird dabei im Kunststoffbereich als gleichwertiger Entsorgungsweg und zugleich als Mittel der Öleinsparung propagiert. Setzt sich diese Strategie durch und dafür spricht einiges, dann wird ein ähnlicher Effekt eintreten wie bei der Müllentsorgung in den 70er Jahren: Der weiträumige Übergang zur Müllverbrennung hatte damals den Müllnotstand vorübergehend gelöst und dadurch für fast zwei Jahrzehnte den Druck zu absoluten Sparstrategien und weitergehenden Recycling-Maßnahmen genommen. Auch diesmal dürften aus der skeptischen Sicht des Historikers nur Problemverlagerungsstrategien Erfolg haben, die die dominante Entwicklung in Richtung Material Tailoring nicht beeinträchtigen. Die Vielzahl und teilweise Widersprüchlichkeit ökologischer Kriterien macht es den Vertretern der Entwickler und Hersteller von Hochleistungswerkstoffen leicht, aus dem Sortiment an Argumenten die ihnen genehmen Einsparungskriterien auszuwählen. Ob die neuerdings viel beschworenen "Ökomaterialien" den bisherigen grundlegenden Widerspruch zwischen Werkstoff-Individualisierung und recyclinggerechter Werkstoff-Vereinfachung zu lösen vermögen ist selbst bei den Verfechtern "Neuer Werkstoffe" noch offen. (TAB-Studie über Neue Werkstoffe, Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftlich-Technische Trendanalysen). In der Vergangenheit erwiesen sich in der Werkstofftechnik "Eier legende Wollmilchsäue" jedenfalls meist als so teuer, daß sie als Standardtechniken für den Alltagsbedarf nicht in Frage kamen.

Der Konstrukteur muß sich also auch künftig im Normalfall zwischen funktionalen Optimalitätskriterien und Materialspezialisierung einerseits und hoher Verwertungsgerechtigkeit, Werkstoffverträglichkeit und Materialvereinheitlichung andererseits entscheiden. Er soll nach der VDI-Richtlinie für Recyclinggerechtes Konstruieren 2243 nicht oder schlecht recyclebare oder abbaubare Werkstoffe vermeiden und stattdessen weiterverwendbare, wenn möglich nachwachsende, wenig energieintensive Materialien bevorzugen. Wenn darüber hinaus das Downcycling, also die üblichen Qualitätseinbußen bei recycelten Stoffen verringert werden sollen, sind die Qualitätsanforderungen der künftigen "Sekundärwerkstoffe" schon bei der primären Werkstoffwahl einzuplanen: "Der Konstrukteur muß bei der Produktentwicklung bereits an die Rückgewinnung der Werkstoffe und an sonstige Entsorgungsmaßnahmen nach Gebrauchsende denken. Dazu ist es erforderlich, den Produktlebenszyklus und den geeigneten Recyclingweg von vornherein einzuplanen und in der Anforderungsliste festzulegen" (VDI-Richtlinie 2243). Zu beachten sind dabei ein Qualitätsniveau, das die Wiederaufarbeitbarkeit garantiert, also Einschmelzbarkeit oder Trennbarkeit, Werkstoffverträglichkeit untereinander und mit anderen Materialien, Vermeidung dauerschädlicher Stoffe und eventuelle Aufbereitungshilfen für die Wiederverwertung. Doch die bestehende Prognoseunsicherheit im Hinblick auf den möglichen Stand der Recyclingtechnologie zum Ende der Gebrauchsphase - bei langlebigen Produkten ist immerhin eine Voraussicht auf Jahrzehnte erforderlich - bietet sehr oft den Vorwand, auf eine hohe Materialverwertungswertigkeit zu verzichten und stattdessen auf künftige werkstoffchemische Fortschritte zu hoffen.

6 Die Werkstoffwahl im Schnittpunkt von Produktlebenszyklus und Werkstoffströmen

Die Zuständigkeit der Konstruktion wird hiermit auf einen separaten Werkstofflebenszyklus ausgedehnt, der sich zusammen mit der Wiederverwendung neben dem bisherigen primären als ein sekundärer Produktlebenszyklus etabliert. Dazu muß aber die bisherige Kalkulationsbasis vom Herstellungs-, Anschaffungs- und Betriebskostenansatz auf die Produktentsorgungskosten ausgeweitet werden. Wird diese Strategie des langen Atems aber nicht durch staatliche Auflagen und Normen massiv unterstützt, gerät der Konstrukteur bei der Verfolgung des Leitbilds der Ressourcen- und Umweltschonung in einen kaum lösbaren Zielkonflikt zwischen der nach wie vor herrschenden marktpreis-orientierten Kalkulation und einer gesamtgesellschaftlich und umweltbezogenen Werkstoffwahl. Dieser Zielkonflikt verschärft sich, wenn der Appell zur Werkstoffeinsparung von den gewohnten relativen Sparstrategien (kleine Abmessungen, höchste Werkstoffausnutzung) - die aber leicht zur verkürzter Lebensdauer und, wegen besserer Diffusionschancen, zu einem höheren Gesamtverbrauch führen - zu absoluten Sparstrategien übergeht, die den Werkstoffverbrauch mit Hilfe besonders langlebiger Produkte einschränken sollen. Der immer deutlicher hervortretende Sachverhalt, daß die Werkstoffmassen der Produkte selber die mengenmäßig umfangreichsten Emissionen darstellen, zeigt den Konstrukteuren, daß sie als Werkstofflenker im Schnittpunkt konträrer Interessenlagen von Unternehmen, Kunden, Volkswirtschaft und Ökologie stehen, daß sie aber die gesamtgesellschaftlichen Zielkonflikte zwischen kurz- und mittelfristigen Wirtschaftsinteressen und langfristigen Technikfolgen nicht alleine lösen können.

LITERATUR

- Alting, L., Life cycle design, in: Concurrent Engineering (1991) 1, S. 19-27.**
- Beitz, W., Möglichkeiten zur material- und energiesparenden Konstruktion, in: Konstruktion 42 (1990), S. 378-384**
- Eversheim, W.; Böhlke, U. H.; Adams, M.; Die Auswahl des "richtigen" Produktionswerkstoffes, in: VDI-Z 136 (1994) 4, S. 118-121**
- Fabrycky, W.J., Designing for the life cycle, in: Mechanical Engineering (1987/Jan), S. 72-74**
- Garbe, E.; Salomon, D., Recyclinggerechtes Konstruieren. Erfordernis moderner Produktgestaltung, in: VDI-Z 131 (1989) 4, S. 79-83**
- Grosch, J., Werkstoffauswahl als Weg zur technischen und wirtschaftlichen Optimierung festigkeitsbeanspruchter Bauteile, in VDI-Berichte 214 , Düsseldorf 1974, S. 123-132**
- Grupp, H. (Hrsg.), Technologie am Beginn des 21. Jahrhunderts, Heidelberg 1993**
- Hornbogen, E., Werkstoffe. Aufbau und Eigenschaften von Keramik, Metallen, Kunststoffen und Verbundwerkstoffen, 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York 1979**
- Hornbogen, E.; Bode, R.; Donner, P. (Hrsg.), Recycling. Materialwissenschaftliche Aspekte, Berlin, Heidelberg, New York 1993**
- Kesselring, F., Die 'starke' Konstruktion. Gedanken zu einer Gestaltungslehre, in: ZVDI 86 (1942) 21/22, S. 330**
- Meyer, H.; Beitz, W., Konstruktionshilfen zur recyclingorientierten Produktgestaltung, in: VDI-Z 124 (1982) 7, S. 255-267**
- Mikosch, Falk, "Grüne" Produkt- und Systemgestaltung, in: VDI-Z 136 (1994) 1/2, S. 23-27**
- OTA- E-541 (Office of Technology Assessment, Green Products by Design: Choices for a Cleaner Environment, Washington 1992**
- Overby, C. M., Sustainability through Design for the Entire Life Cycle, in: Burkhardt, H.; Vanderburg, W. H., Preparing for a Sustainable Society, ISTAS '91, New York 1991, S. 463-473**
- Pahl, G., Material- und energiesparende sowie die recyclinggerechte Gestaltung durch methodisches Konstruieren, in: Optimale Rohstoffnutzung - eine Aufgabe für den Ingenieur, VDI-Berichte 277, Düsseldorf 1977, S. 1-7**
- Pahl, G.; Beitz, W., Konstruktionslehre, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York 1993**
- Razim, C., Neue Werkstoffe im Automobilbau, in: Neue Werkstoffe. Einsatzgebiete heute, Anwendungsmöglichkeiten morgen (VDI-Berichte 670, Bd. 1), Düsseldorf 1988, S. 1-19**
- Rempp, H., Werkstoffe, in: H. Rumpf, H. Rempp, M. Wiesinger, Technologische Entwicklung, Bd. 2 (Kommission für wirtschaftlichen und sozialen Wandel, 109/2), Göttingen 1976, S. 237-274**

Steinhilper, R., Produktrecycling im Maschinenbau, Berlin, Heidelberg, New York 1988

Tschochner, H., Konstruieren und Gestalten, Essen 1954

VDI (Hrsg.), VDI-Richtlinie 2243, Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte, Entwurf, Mai 1991

Wögerbauer, H., Die Technik des Konstruierens (1942), 2. Aufl. Berlin 1943

Wögerbauer, H., Werkstoffsparen. Die technischen Zusammenhänge, Widerstände und Fortschritt, in: Maschinenbau 19 (1940) 8, S. 321-324

Young, S. B.; Vanderburg, W. H., A Materials Life Cycle Framework for Preventive Engineering, in: IEEE Technology and Society Magazine, 11 (Fall 1992), S. 26-31