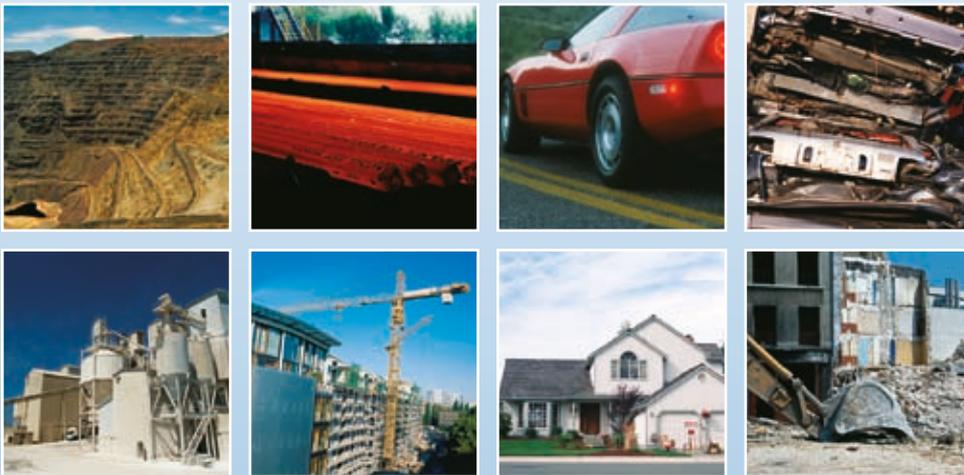


*„Steigerung der Ressourcenproduktivität  
als Kernstrategie einer nachhaltigen Entwicklung“*

Projekt im Auftrag des BMBF



Projekt **Ergebnisse**

## **Technologien zur Ressourceneffizienzsteigerung: Hot Spots und Ansatzpunkte**

Wuppertal, Juni 2007

**Bearbeitet von:**

Dipl.-Ing. Michael Ritthoff

Dr. Christa Liedtke

Dipl.-Umw. Claudia Kaiser



**Projektlaufzeit:** 07/2005 – 06/2007

**Projektleitung:**

Prof. Dr. Raimund Bleischwitz / Dr. Kora Kristof / Dr. Christa Liedtke  
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie GmbH  
Forschungsgruppe Stoffströme und Ressourcenmanagement  
Forschungsgruppe Nachhaltiges Produzieren und Konsumieren

42103 Wuppertal, Döppersberg 19

Tel.: 0202-2492 -256 /-183, Fax: 0202-2492 -250

E-Mail: [raimund.bleischwitz@wupperinst.org](mailto:raimund.bleischwitz@wupperinst.org)  
[kora.kristof@wupperinst.org](mailto:kora.kristof@wupperinst.org)

Weitere Informationen zum Projekt „Steigerung der Ressourcenproduktivität  
als Kernstrategie einer nachhaltigen Entwicklung“  
finden Sie unter [www.ressourcenproduktivitaet.de](http://www.ressourcenproduktivitaet.de)

Gefördert wird das Vorhaben im Rahmen des Förderprofils  
„Technologie und Innovationsförderung“ durch das BMBF  
(Projekträger: GSF)  
Förderkennzeichen: 07RP001



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



GSF – Forschungszentrum  
für Umwelt und Gesundheit  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Ressourcenproduktivitätsprojekt – der Hintergrund</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Ziel und Aufbau des Papiers</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Ökoeffizienz, Ressourceneffizienz und Materialeffizienz</b>	<b>9</b>
3.1	Wertschöpfungskettenorientierung	13
3.2	Betrachtungsebenen – Meso- und Mikrobene	15
<b>4</b>	<b>Technologien zur Ressourceneffizienzsteigerung</b>	<b>18</b>
4.1	Rohstoffe – Verfügbarkeit und Auswahl	19
4.1.1	Metallische Rohstoffe	19
4.1.2	Ressourceneffizienz von Energieträgern	25
4.1.3	Industrieminerale	28
4.1.4	Nachwachsende Rohstoffe	29
4.1.5	Fazit: Rohstoffe – Verfügbarkeit und Auswahl	31
4.2	Werkstoffe	32
4.2.1	Erzeugung von Werkstoffen	32
4.2.2	Recycling	34
4.2.3	Kaskadennutzung	39
4.2.4	Neue Werkstoffe	40
4.2.5	Werkstoffauswahl	42
4.2.6	Fazit: Werkstoffe	44

4.3	Produktion und Fertigung	45
4.3.1	Produktdesign	49
4.3.2	Dienstleistungsorientierung	53
4.3.3	Innovationen und Innovationstempo	55
4.3.4	Fazit: Produktion und Fertigung	56
4.4	Querschnittstechnologien	57
4.4.1	Biotechnologie	57
4.4.2	Nanotechnologie	58
4.4.3	Informations- und Kommunikationstechnologien	59
4.4.4	Fazit: Querschnittstechnologien	61
4.5	Forschung und Entwicklung	61
4.6	Ressourceneffizienz und Infrastrukturen	62
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick</b>	<b>65</b>
<b>6</b>	<b>Literatur</b>	<b>68</b>

## Abbildungen

Abb. 1:	Entwicklung des Eisengehalts der in Deutschland eingesetzten Eisenerze _____	20
Abb. 2:	Lang- und mittelfristige Entwicklung der weltweiten Bauxitqualität, dargestellt am Beispiel $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalt. _____	23
Abb. 3:	Entwicklung der Erträge von Weizen und Roggen in Deutschland _____	29
Abb. 4:	Energieverbrauch bei der Herstellung ausgewählter Werkstoffe _____	33
Abb. 5:	Primärenergiebedarf in MJ bei der Erzeugung technischer Keramik _____	34
Abb. 6:	Aluminiumproduktion und Sekundärmaterialanteil in den USA _____	36
Abb. 7:	Abiotischer Materialverbrauch bei der Herstellung unterschiedlicher Karosserien. _____	41
Abb. 8:	Wahl des Fertigungsverfahrens auf der Basis der Herstellungskosten in Abhängigkeit von der Stückzahl _____	45
Abb. 9:	Materialersparnis durch Wahl von Fertigungsverfahren _____	46
Abb. 10:	Stofffluss durch eine Lackieranlage. Bei bester verfügbarer Technik (Pulverbeschichtung) kann der Materialeinsatz drastisch reduziert werden. _____	48
Abb. 11:	Möglichkeit der Kostenbeeinflussung, Kurve a: mögliche Kostensenkungen, Kurve b: Kostenaufwand für Änderungen _____	49
Abb. 12:	Rohrverbindung für Brunnenrohre, Fa. Beckert Brunnentechnik _____	51
Abb. 13:	Entwicklung von Kosten, Umsatz, Gewinn und Umweltverbrauch über den Lebenszyklus eines Produktes _____	52
Abb. 14:	Anstieg der Massenanwendungen in den letzten Jahrzehnten (exemplarische Daten aus den USA) _____	56

## Tabellen

Tab. 1:	Entwicklung der Ressourcenproduktivität in Produktionssektoren _____	16
Tab. 2:	Förderung, Reserven und Ressourcen (Reserve base = Ressourcen einschließlich Reserven) von Eisenerz. _____	21
Tab. 3:	Förderung, Reserven und Ressourcen (einschließlich Reserven) von Chrom. _____	22
Tab. 4:	Durchschnittlicher abiotischer Materialinput bei der Steinkohleförderung in unterschiedlichen Ländern. _____	26
Tab. 5:	Heizwerte und durchschnittliche abiotische Materialinputs von Energieträgern _____	27
Tab. 6:	Materialintensität für die Produktion einer MWh elektrischen Energie in kg/MWh _____	28
Tab. 7:	Heizwert von Energieträgern _____	30
Tab. 8:	Materialintensität der Primär- und Sekundärerzeugung von ausgewählten Werkstoffen _____	35
Tab. 9:	Veränderung der durchschnittlichen Zusammensetzung von Flachglas. Zusammensetzung in Gew. % _____	38
Tab. 10:	Gegenüberstellung der Massen für die drei Fahrradrahmen. _____	42
Tab. 11:	Werkstoffbedarf und Ressourcenverbrauch für einen Roboterarm _____	43
Tab. 12:	Kennzahlen von Lasern zum Laserschweißen _____	47
Tab. 13:	Effizienzfaktoren durch Redesign in finnischen Unternehmen _____	53

## 1 Ressourcenproduktivitätsprojekt – der Hintergrund

Natürliche Ressourcen sind Grundlage aller wirtschaftlichen Aktivitäten. Wohlfahrtssteigerungen können durch eine optimale und effiziente Nutzung der Ressourcen erzielt werden. Das Management der natürlichen Ressourcen ist aber gerade in den letzten Jahren zur Herausforderung geworden. Das anhaltende Wachstum der Weltbevölkerung, die Steigerung der weltweiten Produktion und Preissteigerungen auf den Energie- und Rohstoffmärkten erhöhen den langfristigen Anpassungsdruck zu Effizienzsteigerungen beim Einsatz natürlicher Ressourcen.

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Projekt „Ressourcenproduktivität als Kernstrategie einer Nachhaltigen Entwicklung“ will Möglichkeiten aufzeigen, wie die Rahmenbedingungen wirtschaftlichen Handelns mit betrieblichen und sektoralen Strategien so gestaltet werden können, dass es zu einer tiefgreifenden Erhöhung der Ressourcenproduktivität kommt ([www.ressourcenproduktivitaet.de](http://www.ressourcenproduktivitaet.de)). Die zentralen Projektziele sind:

- **Weiterentwicklung von Informationssystemen** (Arbeitspaket 1) mit dem Ziel einer Aktivierung von Lernprozessen auf betrieblicher, zwischenbetrieblicher und wirtschaftspolitischer Handlungsebene,
- **Hot Spots** (Arbeitspaket 2): Identifizierung von Problembereichen der Ressourcennutzung und von Potenzialen zur Erhöhung der Ressourceneffizienz<sup>1</sup> jenseits vorhandener Trends,
- **Ressourcenpolitik und Ressourcenproduktivitätssteigerungen durch unternehmensübergreifende Instrumente** (Arbeitspaket 3): Entwicklung von Anreizstrukturen und -instrumenten zur Steigerung der Ressourcenproduktivität im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung,
- **Hochrechnung von Verbesserungspotenzialen zur Ressourcenproduktivitätssteigerung** (Arbeitspaket 4): Abschätzung theoretischer sektoraler Verbesserungspotenziale der Ressourcenproduktivität durch die Be- und Hochrechnung der direkten und indirekten Auswirkungen einer Vorleistungseinsatzsenkung, einer veränderten Endnachfragestruktur und ausgewählter Technologien.

---

<sup>1</sup> Ressourcenproduktivität wird in diesem Projekt verstanden als die erzielte Wertschöpfung pro Einheit dafür erforderlicher Ressourcen auf der gesamtwirtschaftlichen oder sektoralen Ebene. Ressourceneffizienz wird verstanden als Verhältnis zwischen technisch-physikalischem oder betrieblichem Output zu den dafür erforderlichen Ressourcen auf der Technologie-, Produkt-, Unternehmens- oder Wertschöpfungskettenebene.

## 2 Ziel und Aufbau des Papiers

Das vorliegende Papier analysiert, in welchen Bereichen der Wertschöpfungskette Potenziale der Steigerung der Ressourceneffizienz durch Einsatz entsprechender Technologien (vorhandene und zu entwickelnde) zu erwarten sind. Es wird bewertet, inwieweit die identifizierten Bereiche sogenannte „Hot Spots“ für eine Steigerung der Ressourceneffizienz der gesamten Kette – „von der Wiege bis zur Bahre oder Wiege“ bilden: wo also sind wichtige und vor allem in Sinne der Ressourceneffizienz effektive Ansatzpunkte für einen ressourcenoptimierten Technologieeinsatz bzw. für die Entwicklung innovativer ressourceneffizientere Produkt-Dienstleistungssysteme? Es werden einzelne Beispiele genannt, die diese „Hot Spots“ verdeutlichen sollen – dabei kann es sich um neue Entwicklungen handeln oder eben auch um bereits vorhandene „altbekannte“ Lösungen, deren Entwicklungsweg beispielhaft war und der forciert werden sollte. In dem Papier erfolgt keine umfassende Darstellung spezifischer Technologien mit genau bezifferten Potenzialen. Dies macht erst in der konkreten Wertschöpfungskette bzw. vergleichbaren Produktspektren/-gruppen Sinn. Das Papier bildet die Basis dafür, dies mittels der auch im Projekt entwickelten Hot-Spot Methodik zu vertiefen und mögliche Technologieansätze zu screenen.

Kapitel 3 beschreibt die im Umfeld von Unternehmen und Wertschöpfungsketten bereits vielfach diskutierten und angewendeten Konzepte der Öko-, Material- und Ressourceneffizienz. Diese sind nicht immer kompatibel mit den politisch oder statistisch genutzten Varianten z. B. der EU-Kommission.

Kapitel 4 geht auf die sechs großen Bereiche ein und bewertet deren Potenziale bezüglich der Steigerung der Ressourceneffizienz in Wertschöpfungsketten.

Kapitel 5 fasst die Ergebnisse zusammen und zieht ein Fazit für den Umgang mit diesen Ergebnissen.

### 3 Ökoeffizienz, Ressourceneffizienz und Materialeffizienz

Spätestens seit der landwirtschaftlichen, der grünen, und der industriellen Revolution trägt der technische Fortschritt zur steigenden Umweltbelastung bei. Mit der Industrialisierung wurde es möglich, natürliche Ressourcen im großen Maßstab zu nutzen und die natürliche Umwelt großmaßstäblich zu verändern. Dabei sind die technischen Neuerungen vor allem auf eine Steigerung der Arbeitsproduktivität ausgerichtet, ohne Rücksicht auf die Umwelt (Schmidt-Bleek 2007; siehe auch Hinterberger/Luks/Stewen 1996). Die Entwicklung des technischen Fortschritts ist aber nicht nur für die Analyse der damit verbundenen Umweltfolgen relevant, sondern auch für seine Rolle als Beschleuniger bei der Herausbildung neuer Bedürfnisse und der damit verbundenen Ressourcenverbräuche. Die Lebensdauer der Produkte wird immer kürzer und neue Generationen von Produkten kommen in immer kürzeren Abständen auf den Markt. Damit verbreitet sich der Trend zu hohem Massendurchsatz und hohem Umweltverbrauch weiter. Das westliche Konsummuster breitet sich immer weiter aus und durchdringt die weltweit konsumfreudigen Ober- und Mittelschichten. Innovationen alleine reichen nicht aus, um diese Entwicklung zu stoppen, es müssen auch eine gezielte Umsetzung und eine Nutzung dieser Innovationen erfolgen, will man erreichen, dass sich der Ressourcenverbrauch nicht nur auf einem hohen Niveau stabilisiert, sondern zurückgeht (vgl. auch Bringezu 2004; Wallbaum 2004). Leider hat dieses Ziel keinen Eingang in die „Thematische Strategie für eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen“ (Kommission der Europäischen Gemeinschaft 2005) der sogenannten EU-Ressourcenstrategie gefunden. Für sie steht alleine eine *„Verringerung der durch die Nutzung natürlicher Ressourcen in einer wachsenden Wirtschaft entstehenden ökologischen Auswirkungen“* im Mittelpunkt. Dies birgt das Risiko, vor allem auf bereits identifizierte und spezifische Auswirkungen nachsorgend zu reagieren; zugleich also unspezifische und breitenwirksame Ansätze zu vernachlässigen.

Auf der Unternehmensseite wurde bereits sehr früh ein anderer Weg eingeschlagen, der neben der Vermeidung bekannter toxischer Auswirkungen eher als Vorsorgestrategie die Ressourcenschonung und die Optimierung der aus einer Tonne Ressourcen erhaltenen Dienstleistung forcierte:

Bereits seit 1990 beschäftigte sich Stephan Schmidheiny im Auftrag der UNCED darum, eine globale unternehmerische Perspektive für eine nachhaltige Entwicklung zu erarbeiten. Er initiierte den Business Council for Sustainable Development (BCSD), der eine Erklärung herausgab, in der sich führende Unternehmen dem Ziel einer nachhaltigen Entwicklung verpflichteten. Im Buch „Changing Course“ prägte der BCSD 1992 den Begriff „eco-efficiency“ zu Deutsch: Ökoeffizienz. Nach der Rio-Konferenz schlossen sich bis heute mehr als 150 Unternehmen im World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) zusammen und setzen sich seither für die Umsetzung nachhaltiger Entwicklung mittels Ökoeffizienz in Unternehmen ein. Der WBCSD definiert Ökoeffizienz als die „zunehmende Produktion von nützlichen Gütern und Dienst-

leistungen bei laufend abnehmendem Verbrauch von natürlichen Ressourcen, also Rohmaterialien und Energie“ (WBCSD 1992). Bei den meisten Ökoeffizienzkonzepten werden die folgenden Ziele mit messbaren Indikatoren versehen und ins Management von Unternehmen miteinbezogen:

- Maximierung des Gebrauchs erneuerbarer Ressourcen,
- Minimierung der Materialintensität von Produkten und Dienstleistungen,
- Minimierung der Energieintensität von Produkten und Dienstleistungen,
- Minimierung von toxischen Einwirkungen,
- Steigerung der Recyclingfähigkeit von Produkten (schon beim Design),
- Erhöhung der Haltbarkeit von Produkten,
- Steigerung des Gebrauchswertes von Produkten und Dienstleistungen.

Ein wesentliches Element von Ökoeffizienz ist also neben der Kosteneffizienz die Ressourceneffizienz, also der möglichst sparsame Umgang mit den natürlichen Ressourcen bei gleichzeitiger Optimierung der erhaltenen Dienstleistungseinheiten. Je weniger Ressourcen für die gleiche Leistung, den gleichen Nutzen eingesetzt werden, desto weniger muss letztlich bezahlt werden für den Einkauf, die Prozessführung und die Entsorgung (vgl. Busch/Beucker 2004; Busch/Orbach 2003). Eine solche Entwicklungsvorgabe bedeutet auch, neue Technologieentwicklungen zu initiieren, die diese Ziele verfolgen und umsetzen. Gelingt es, durch Produkt- und Prozessinnovationen oder eine veränderte Nutzung von Gütern den Ressourcenverbrauch zu reduzieren, so wird dies generell auch zu einer Umweltentlastung im Sinne der thematischen Strategie der EU Kommission beitragen (Schmidt-Bleek 1994). Geht man davon aus, dass ein halb so hoher globaler Ressourcenverbrauch („Faktor 2“) zu einer deutlichen Entlastung der natürlichen Umwelt führen würde und geht man weiterhin davon aus, dass die gesamte Weltbevölkerung ein gleiches Anrecht auf Ressourcennutzung hat, ergeben sich für die entwickelten Industrienationen und die Entwicklungs- und Schwellenländer unterschiedliche Ziele. Da heute rund 80 % der Ressourcen von 20 % der Bevölkerung gebraucht werden, würde ein gleiches Zugriffsrecht für alle, bei Halbierung der Gesamtinanspruchnahme, bedeuten, dass die reichen Industrienationen ihren Ressourcenverbrauch auf rund ein Zehntel („Faktor 10“) reduzieren müssten (vgl. Schmidt-Bleek 2006). Dies bedingt völlig neue Technologiekonzepte in Produktion und Konsum. *Ohne technologische Innovation ist diese Abkopplung nicht zu schaffen. Der Bedarf an ökologischen Innovationen und an ressourcen- und energieeffizienten Produkten und Produktionstechniken ist immens. Und deshalb verbinden sich damit ökonomische Zukunftsmärkte – für Konsum- und Investitionsgüter* (Gabriel 2007 UMWELT UND INNOVATION: LEITMÄRKTE DER ZUKUNFT, Dokumentation der Fachkonferenz am 30. Oktober 2006 in Berlin, S.5).

Eine Möglichkeit den Ressourcenverbrauch und die Ressourcenproduktivität zu bestimmen sind Materialintensitätsanalysen nach dem MIPS-Konzept. MIPS heißt:

Material-Input pro Serviceeinheit. Um die Umweltbelastung von Produkten und Dienstleistungen zu bestimmen, gibt MIPS an, wie viel Ressourcen (im MIPS-Konzept „Material“ genannt) für ein Produkt oder eine Dienstleistung insgesamt eingesetzt werden. Bildet man daraus den Kehrwert, so erhält man eine Aussage über die Ressourcenproduktivität, d. H. man errechnet, wie viel Nutzen eine bestimmte Menge „Natur“ spenden kann (vgl. Schmidt-Bleek 1994 und Ritthoff et al. 2002). Durch die Verzahnung der Handlungen auf unterschiedlichen Ebenen tragen alle Material-Input-bezogenen Optimierungen zu einer Steigerung der lebenszyklusweiten oder gesamtwirtschaftlichen Ressourcenproduktivität bei.

In Abgrenzung zur Öko- und Ressourceneffizienz<sup>2</sup> befasst sich die Materialeffizienz mit den Materialeinsätzen und der Prozessoptimierung in den Unternehmen. Hier haben die Effizienz-Agentur NRW ([www.efanrw.de](http://www.efanrw.de)) und die Deutsche Materialeffizienz-Agentur ([www.demea.de](http://www.demea.de)) bereits Instrumente zur Optimierung entwickelt und umgesetzt. Diese Aktivitäten basieren vor allem auf der Erkenntnis, dass sich Optimierungsansätze in Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes in der Regel auf Personalkosten konzentrieren. In ihrer Senkung wird der entscheidende Wettbewerbsfaktor gesehen. Auch in der öffentlichen und veröffentlichten Meinung nimmt die Diskussion um Personalkosten die dominante Stellung ein. Die Bruttoproduktionskosten im Verarbeitenden Gewerbe enthalten jedoch neben den Personalkosten die Kostenblöcke Material und Energie, Abschreibungen und Mieten sowie sonstige Kosten. Im Durchschnitt sind nur etwa 25 % der Kosten Personalkosten. Der größte Kostenfaktor im Verarbeitenden Gewerbe sind die Materialkosten mit durchschnittlich 41,8 % der Bruttoproduktionskosten (Statistisches Jahrbuch 2007). Erfahrungen zeigen, dass im Kostenblock Materialkosten erhebliche Effizienz- und Effektivitätssteigerungsmöglichkeiten realisiert werden können (Busch/Liedtke 2005; Roeder/Liedtke 2006). Ansatzpunkte für Steigerung der Materialeffizienz sind – ähnlich den Zielen der Ökoeffizienzstrategien:

- Minderung von Material- und Ressourcenverlusten durch Verbesserung bzw. Vergleichmäßigung der Qualität (Verminderung von Ausschuss),
- Optimierung der Produktionsprozesse, z. B. durch die Reduzierung von Verschnitt,
- Optimierung der Konstruktion, ressourcenschonendes Produktdesign (z. B. Leichtbau, leichtere Produkte),
- verstärktes Werkstoffrecycling,
- bessere Auslastung von Geräten, Anlagen und Spezialmaschinen sowie
- wertschöpfungskettenübergreifende Optimierungen.

---

<sup>2</sup> Materialeffizienz ist (...) die Relation von Produkt-Output zu Material-Input pro Prozess(stufen) oder Unternehmen ([www.materialeffizienz.de](http://www.materialeffizienz.de)). Ökoeffizienz bedeutet die „zunehmende Produktion von nützlichen Gütern und Dienstleistungen bei laufend abnehmendem Verbrauch von natürlichen Ressourcen, also Rohmaterialien und Energie“ (WBCSD 1992). Vgl. auch Fn 1.

Optimierungsmaßnahmen in diesen Bereichen ermöglichen Kosteneinsparungen, die zum Teil im zweistelligen Prozentbereich der Gesamtkosten liegen (Baron et al. 2005, Berger, Roland / Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2007).

Vergleichende Analysen haben gezeigt, dass in allen untersuchten Ländern eine Abkopplung von Ressourcen- und Materialeinsatz vom Wirtschaftswachstum stattfindet, allerdings mit unterschiedlicher Geschwindigkeit (Bringezu 2004). Die Marktentwicklung verläuft in Richtung einer erhöhten Ressourcenproduktivität, eine absolute Verminderung des Ressourcenverbrauchs ist jedoch bisher nur in ganz wenigen Ausnahmefällen festzustellen. Das wesentliche Ziel, die absolute Reduktion des Ressourcen- und Umweltverbrauchs, ist somit noch nicht erreicht. Dies ist ein Grund, weshalb eine weitere Steigerung der Ressourcenproduktivität notwendig erscheint. Ein weiterer Grund liegt in den Kosten der Ressourcennutzung (siehe oben) und dem damit verbundenen Handlungsdruck zur Kostensenkung. Hinzu kommen Beiträge zur Rohstoffsicherheit (Bleischwitz 2006) und zur grundsätzlichen Reduktion von Umweltbelastungen über den Produktlebensweg hinweg (Voet et al. 2005, Bringezu 2004). Vorwärtsgerichtete Strategien führen zu Innovationen im Prozess- und Produktbereich, zu neuen Märkten mit weniger Materialeinsatz. Durch sinkende Kosten beim Kauf und in der Nutzungsphase steigt der Produktnutzen. Derartige Neuerungen sind im wettbewerbsintensiven Exportbereich von besonderer Bedeutung (Schmidt-Bleek 2004, Liedtke/Busch 2005).

Auf der Unternehmensebene führt die Berücksichtigung von Aspekten der Ressourcenschonung und Umweltentlastung zu Veränderungen bei der Werkstoff-, Dienstleistungs-, Technologie-, Prozess- und Produktentwicklung. Viele Unternehmen haben bereits Ökoeffizienzstrategien oder Methoden zur Messung der Ökoeffizienz entwickelt – sei es die BASF mit ihrer Ökoeffizienzanalyse ([www.basf.de/umwelt/oeko-effizienz](http://www.basf.de/umwelt/oeko-effizienz)) oder Panasonic mit Factor X ([http://panasonic.co.jp/eco/en/factor\\_x/](http://panasonic.co.jp/eco/en/factor_x/)). Canon hat sich als Unternehmensziel gesetzt, eine Verdopplung der Umwelteffizienz bis 2010 zu erreichen (Canon Sustainability Report 2006). Regierungen haben den Faktor 10 in ihr Regierungsprogramm aufgenommen, wie China oder Österreich, letzteres bereits 1996. China hat ein Konzept namens Circular Economy entwickelt und ist aktiv bei der Umsetzung (z. B. [www.indigodev.com/Circular1.html](http://www.indigodev.com/Circular1.html)). Es gibt also Akteure in der Wirtschaft und der Politik, die diesen Weg aktiv beschreiten. Das Bundesministerium für Umwelt hat mit seinem Konzept „ökologische Industriepolitik“ ebenfalls hier angesetzt (BMU 2006) und die EU-Kommission hat eine EU-Ressourcenstrategie entwickelt (Europäische Kommission 2005).

### 3.1 Wertschöpfungskettenorientierung

Optimierungsstrategien orientieren sich meist an Einzelprozessen oder einzelnen Unternehmen. Weit geringer ausgeprägt sind Optimierungen über Unternehmensgrenzen hinweg. Eine integrierende Optimierung, bei der auch gezielt die vor- und nachgelagerten Prozesse vom Rohstoffabbau bis zur Entsorgung – d. H. die „ökologischen Rucksäcke“ – berücksichtigt werden, kann jedoch deutlich höhere Potenziale erschließen, denn bei einer Optimierung von Einzelprozessen werden häufig negative Rückwirkungen auf vor- oder nachgelagerte Prozesse vernachlässigt und damit Ressourcen verschwendet. Nur eine wertschöpfungskettenweite Optimierung kann sicherstellen, dass eine auf das Produkt oder Dienstleistung bezogen bestmögliche Ressourcennutzung erreicht wird. Ein Beispiel, das dies veranschaulicht, sind Gebäude. Sowohl bei Wohn- als auch bei Bürogebäuden treten in der Herstellung, der Bauphase und in der Nutzungsphase erhebliche Ressourcenverbräuche auf. In der Bauphase sind es vor allem die eingesetzten Baustoffe und in der Nutzung vor allem die benötigte Heizenergie. Würde man nur die Bauphase optimieren, würde man die Wärmedämmung deutlich reduzieren oder ganz weglassen. Die Folge wäre ein stark erhöhter Heizenergiebedarf. Will man diesen minimieren, muss man in der Bauphase mehr investieren und mehr Ressourcen einsetzen. Welcher Wärmedämmungsumfang ideal ist, ergibt sich aus einer Betrachtung des gesamten Lebensweges.

Optimierungspotenziale liegen vor allem bei der Kombination von Einzeltechnologien aus den Bereichen:

- Rohstoffe (Rohstoffauswahl, Gewinnungs- und Aufbereitungsverfahren),
- Werkstoffe (Werkstofftechnik und -wissenschaften (nanotechnologische Verfahren)
- Fertigungsverfahren (Formgebungs- und Fügeverfahren)
- Produktgestaltung (anforderungsgerechte Konstruktion, werkstoffgerechte Konstruktion, Gestaltungsweisen, Modulbauweise, Bionik),
- Informations- und Kommunikationstechnologien (Modellierung, finite Elemente, Prozesssteuerung, Auftragsbearbeitung und Logistik) und andere Querschnittstechnologien.

Produktgestaltung, Rohstoffauswahl, Anlagenbau und Infrastrukturanbindung etc. sind jeweils eng miteinander verknüpft. Sie beeinflussen einander in einem permanenten Austauschsystem. Welcher Werkstoff zur Anwendung kommt, hat z. B. viel mit bestehenden Mustern in der Gestaltung von Produkten und Prozessen zu tun.

Grundlegende Probleme bestehender Produktionsinfrastrukturen<sup>3</sup> sind oft unzureichende Kenntnisse über vor- und nachgelagerte Prozesse. Dies trifft sowohl grundsätzliche technische Aspekte, als auch ihre ökologischen Auswirkungen. Eine systemweite Optimierung von Produkten und Dienstleistungen erfordert daher vielfach die Anwendung von Hilfsmitteln, insbesondere zur ökologischen Optimierung. Geeignete Instrumente können hierzu Lebensweganalysen in ihren verschiedenen Formen sein. In Abhängigkeit vom Ziel der Untersuchung und der Optimierung können hierbei Ökobilanzen (ISO 14040), Berechnungen des kumulierten Energieaufwands (VDI 4600), Analysen der Lebenszykluskosten oder Materialintensitätsanalysen (Schmidt-Bleek 1998; Ritthoff et al. 2002) eingesetzt werden. Wo es um Ressourceneffizienz geht, wird in aller Regel die Materialintensitätsanalyse ein geeignetes Instrument für richtungssichere Aussagen zur Analyse und Optimierung von Prozessen sein. Bei allen diesen Analysen bleibt nach gegenwärtigem Stand ein Problem bestehen: die Datenverfügbarkeit für vor- und nachgelagerte Prozesse (vgl. auch AP. 1). Zwar werden - teils kostenfrei, teils kostenpflichtig - an verschiedenen Stellen solche Daten bereits angeboten, sie weisen jedoch noch zahlreiche Einschränkungen und verbunden damit Probleme in der Anwendung auf. Hier wäre es wünschenswert, dass solche Daten zukünftig zentral erhoben, validiert und zur Verfügung gestellt werden. Die Umsetzungsmöglichkeiten für eine solche zentrale Datenbereitstellung wurden bereits in einem vom BMBF geförderten Projekt untersucht und beschrieben (Bierter 2000). Eine Umsetzung sollte am besten auf der europäischen Ebene erfolgen und bestehende Initiativen und Datenbestände einbeziehen. Eine wichtige Funktion läge vor allem in der Schaffung einer konsistenten Datenbank und einer regelmäßigen Aktualisierung, beides ist heute nur in Ansätzen gegeben.

Vielfach sind unterschiedliche gestaltete Ökobilanzen nicht vergleichbar und kombinierbar (vgl. hierzu auch AP1 [Schütz/Ritthoff 2006]). Die ökologischen Auswirkungen vergleichbarer wirtschaftlicher Aktivitäten lassen sich dadurch nur schwer bewerten und vergleichen. Da die EU Ressourcenstrategie aber auf die Bewertung und Minimierung der ökologischen Auswirkungen fokussiert, sind dringend Abgleiche bzw. eine Harmonisierung oder Standardisierung solcher Bilanzierungsverfahren notwendig. Die bisherige Regelung über die ISO 14040 er Reihe reicht hierfür nicht aus. Ursache dafür ist, dass mit den Normen und Regelungen zwar ein generelles Regelwerk vorgegeben wird, dieses jedoch zahlreiche Anpassungen an den jeweiligen Untersuchungsgegenstand ermöglicht. Dies beinhaltet z. B. die unterschiedliche Handhabung von:

- Systemgrenzen, z. B. vom Rohstoff bis zum Produkt oder vom Rohstoff bis zum Sekundärrohstoff;

---

<sup>3</sup> Gemeint sind Produktionsanlagen, die die konkreten Materialflüsse nur führen und deren Auslegung von den umgebenden Ver- und Entsorgungsinfrastrukturen geprägt wird wie auch von den vorgelagerten und nachgelagerten Prozessen. Das sich gegenseitig beeinflussende Interaktionsmuster ist bisher noch nicht Gegenstand der Forschung zur Optimierung der Ressourceneffizienz. Aus Sicht des Kapitaleinsatzes und des damit verbundenen Ressourceneinsatzes ist dieses Bedingungsgefüge hoch relevant, das damit längerfristige Produktionspfade festgelegt werden (vgl. auch Schuh, G. 2006; Klug F. 2000 ).

- Abschneidekriterien, also die Frage, wie weit etwa Details, z. B. eingesetzte Betriebsmittel mitberücksichtigt und zurückverfolgt oder abgeschnitten werden;
- Allokationen, wie also etwa Verbräuche und Emissionen auf unterschiedliche Hauptprodukte oder zwischen Haupt- und Nebenprodukten verteilt werden;
- Gutschriften, also ob etwa für energiereiche Abfallstoffe Energiegutschriften vergeben werden.

Grundsätzlich gibt es solche Unterschiede auch bei Lebensweganalysen, die im Rahmen von öffentlich geförderten Projekten durchgeführt wurden. Auf dieser Basis ist eine Harmonisierung der Datenbasis und eine Nutzung für weitergehende Untersuchungen sehr schwierig (vgl. hierzu auch AP1 [Schütz/Ritthoff 2006], S. 22). Auch bei der Nutzung kommerzieller Datenbanken bleiben Probleme bestehen. Die Aktualisierung dieser Datenbestände hinkt der Entwicklung in der Realität oft deutlich hinterher und die Datenbasis bildet mit einigen Tausend abgebildeten Prozessen und einigen Hundert Werkstoffen nur einen kleinen Ausschnitt wirtschaftlicher Aktivitäten auf der makroökonomischen Ebene ab. Eine Lösung könnte hierfür zum einen eine institutionalisierte (am besten europäische) Datenbank zu Ressourceneffizienz oder allgemeiner Lebenszyklusdaten sein, die Daten für Wertschöpfungsketten bereithält, pflegt und zusammenführt.

### **3.2 Betrachtungsebenen – Meso- und Mikrobene**

Einzelne Änderungen in den Wertschöpfungsketten haben über die produktions- und konsumseitigen Verflechtungen häufig Rückwirkungen auf andere Teile der Unternehmen, Branchen und Sektoren. Vermeintlich kleine Änderungen können so unerwartet große Effekte zeigen; umgekehrt kann der Rückschluss von der hohen Ressourcenintensität einer Branche auf eine geringe Ressourceneffizienz trügen. Ausgehend von einem hohen Ressourceneinsatz der gesamten Stahlindustrie zu folgern, hier seien automatisch auch große Effizienzpotenziale vorhanden, kann ein Trugschluss sein, denn ein hoher Verbrauch kann auch Ergebnis guter oder überlegener Eigenschaften sein und somit schon das Ergebnis einer Optimierung darstellen. Schließlich will bedacht sein, dass die gegenwärtigen Produktionsstrukturen auch schon einen langen Weg von Optimierungen zurückgelegt haben und die bisherigen, insbesondere ökonomischen Optimierungen zumindest auch mit einigen ökologischen Optimierungen verbunden waren. Das gilt etwa für die ökonomisch getriebenen energetischen Optimierungen in der Schwerindustrie.

In einer Analyse von Arthur D. Little, Fraunhofer-ISI und Wuppertal Institut (Baron et al. 2005) wurden bereits sektorale zwischen 1991 und 2000 erfolgte Produktivitätsverläufe ermittelt (vgl. Tabelle 1).

Tab. 1: Entwicklung der Ressourcenproduktivität in Produktionssektoren

NACE	Produktionssektor	Globaler Gesamtmaterialeinsatz		Veränderung 1991 bis 2000 (in %)	Ressourcenproduktivität	
		Ranking (in Mill. t)			EURO/t 2000	zw. 1991/ 2000 (in %)
		1991	2000			
10	Kohle, Torf	2.901	1.980	-32 %	0,99	-57 %
14	Steine u. Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse	894	1.005	12 %	2,32	-16 %
27	Metallherstellung und Halbzeuge daraus	419	497	19 %	31,1	-10 %
01	Erzeugnisse der Landwirtschaft, Jagd	367	380	4 %	59,2	8 %
45	Bauleistungen	352	339	-4 %	295	1 %
15	Nahrungs- u. Futtermittel, Getränke etc.	126	132	5 %	222	-9 %
28	Verarbeitung von Metall-erzeugnissen	111	135	22 %	266	-16 %
23	Kokereierz., Mineralölerz., Spalt- u. Brutstoffe	83	89	8 %	54	47 %
34	Kraftwagen u. Kraftwagenteile	74	91	23 %	421	-32 %
24	Chemische Erzeugnisse	66	79	19 %	496	3 %
29	Maschinenbau	65	80	23 %	679	-29 %
21	Papier, Karton, Pappe u. daraus hergestellte Waren	46	56	22 %	185	7 %
	Übrige Produktionssektoren (mit. sekt. glob. Gesamtmaterialeinsatz im Jahre 1991 < 45 Mill. t)	340	425	25 %	3.363	2 %
	<b>Alle Produktionssektoren insgesamt</b>	<b>5.843</b>	<b>5.289</b>	<b>-9 %</b>	<b>338</b>	<b>28 %</b>

Quelle: Baron et al. 2005

Ein Hinweis auf die hohe Ressourcenintensität eines Sektors allein genügt für die Identifikation von Einsparmöglichkeiten jedoch nicht. Häufig betreffen tatsächliche Ressourceneffizienzpotenziale auch nur kleine Ausschnitte der Branchen oder Ausschnitte mehrerer Branchen (so kommen zahlreiche Verfahrenstechniken in verschiedenen Branchen zum Einsatz und bieten oft Raum für Verbesserungen).

Branchen sind zudem teilweise sehr heterogen, sodass branchenweit ausgewiesene Potenziale nur selten einen Rückschluss auf konkreten Handlungsbedarf ermöglichen.

Die statistischen Abgrenzungen von Branchen haben wenig gemein mit möglichen Abgrenzungen von Einsatzgebieten für Technologien.

Die Ressourcenintensität einer Branche enthält keine Informationen über bereits in der Vergangenheit getätigte Verbesserungsmaßnahmen oder weitere Potenziale. Als Ausgangspunkt für eine Suche nach volkswirtschaftlich relevanten Effizienzpotenzialen kann eine branchenweite Materialintensitätsanalyse dennoch hilfreich sein. Für konkrete Handlungsempfehlungen sollte sie jedoch durch spezifische Produktlinienanalysen oder Hot-Spot Analysen (vgl. Arbeitspaket 2.5) ergänzt werden.

Auf der Makroebene durchgeführte Analysen zum Ressourcenaufwand in verschiedenen Produktionssektoren und ihren Verflechtungen (Arbeitspaket 2.1 [Acosta 2007]) weisen die folgenden Branchen als gegenwärtig besonders ressourcenintensiv aus:

- Bauleistungen,
- Nahrungs- u. Futtermittel, Getränke,
- Metalle u. Halbzeuge daraus,
- Energie (Elektro, Gas) u. DL der Energieversorgung,
- Kraftwagen u. Kraftwagenteile,
- Chemische Erzeugnisse,
- Maschinen,
- Kohle, Torf,
- Erzeugnisse der Landwirtschaft, Jagd,
- Kokereierzeugung, Mineralölerzeugung, Spalt- u. Brutstoffe.

Die hohe Ressourcenintensität der aufgeführten Branchen kann - wie bereits beschrieben - als erstes Auswahlkriterium für eine nähere Betrachtung dienen, ermöglicht aber keinen Überblick über die Verteilung der größten technologischen Ressourceneffizienzpotenziale in den Branchen, wo diese liegen oder welche Effekte sie in den anderen Branchen und Wertschöpfungsketten auslösen (vgl. AP 5. Abschätzung mikroökonomischer und sektoraler theoretischer Verbesserungspotenziale der Ressourcenproduktivität) So wird im Bereich neuer Technologien für die Zukunft ein hohes Wachstum erwartet. Häufig wird mit diesen Entwicklungen auch die Hoffnung verbunden, dass diese eine Steigerung der Ressourceneffizienz herbeiführen. Auch hier gilt: für solche Aussagen sind einzelne Analysen notwendig, die richtungssichere Hinweise geben können, wann diese Technologien tatsächlich zu einer Entlastungen führen können. Gegenwärtig sind in einer sektoralen Betrachtung neue Technologien kaum erkennbar. Dominierend sind traditionelle Branchen. Jedoch kommen innerhalb dieser Branchen zunehmend neue Technologien zum Einsatz, die einen erheblichen Einfluss auf die Ressourceneffizienz haben können.

## 4 Technologien zur Ressourceneffizienzsteigerung

In dem vorliegenden Arbeitspaket 2.3 „Technologien zur Ressourceneffizienzsteigerung: Hot Spots und Ansatzpunkte“ soll es um im weitesten Sinne technologische Potenziale gehen.<sup>4</sup> Dabei werden sowohl Potenziale in einzelnen Schritten des Lebenszykluses (z. B. Rohstoffförderung, Verfahrenstechnik, Fertigungstechnik) beschrieben als die vorgelagerten Prozesse der Produktgestaltung sowie Forschung und Entwicklung.

Die Einschätzung von Effizienzpotenzialen ist mit einem grundsätzlichen Dilemma verbunden: Einerseits ist grundsätzlich klar, dass detaillierte Einschätzungen nur auf der Basis von Einzelfalluntersuchungen über den kompletten Lebensweg erfolgen können. Diese Annahme ist Grundlage für alle Ansätze von Lebenswegbetrachtungen. Andererseits ist es jedoch notwendig, aufgrund der außerordentlichen Komplexität und des hohen Aufwands, den solche Untersuchungen verursachen, vereinfacht zu einer Einschätzung von Effizienzpotenzialen zu gelangen. Bei den im Folgenden beschriebenen Potenzialen handelt es sich insofern um Abschätzungen und den Versuch, Ergebnisse zu verallgemeinern und zu übertragen. Einschätzungen dieser Art können jedoch kaum quantitativ erfolgen, da selbst bei vermeintlich ähnlich gelagerten Fällen beträchtliche Unterschiede im Detail liegen und eine einfache Übertragung, etwa von konstruktiven Lösungen und ihren Effekten, daher nicht direkt möglich ist. Erschlossene Potenziale in einem Bereich weisen insofern häufig auf eine grundsätzliche Optimierungsmöglichkeit in anderen Bereichen hin. Gelingt es etwa, im Automobilbau durch den Einsatz hochfester Stahlsorten das Fahrzeuggewicht zu senken, bedeutete das nicht automatisch, dass durch den Einsatz ähnlicher Stahlsorten bei einem Fahrradrahmen im gleichen Maße Einsparungen möglich sind. Die Festigkeit des Werkstoffes ist u. U. nur eine von vielen relevanten Eigenschaften eines Werkstoffes und eines aus ihm gefertigten Bauteils. Die Potenziale in einem untersuchten Bereich geben jedoch einen Hinweis auf mögliche weitere Einsparpotenziale. Insofern erfolgt im Folgenden eine Einschätzung der erwarteten Relevanz, jedoch keine quantitative Benennung der vermuteten Einsparpotenziale. Die einzelnen Potenzialfelder werden kurz beschrieben und teilweise in Bezug zueinander gesetzt. Am Ende folgt immer ein kurzes Fazit mit einer Einschätzung der Relevanz für die Ressourceneffizienz – abgeschätzt von der Wiege bis zur Bahre oder von der Wiege bis zur Wiege. Der bei Ressourceneffizienzverbesserungen ebenfalls auftretende zusätzliche Nutzen in anderen Bereichen wurde nicht bewertet: hierbei handelt es sich beispielsweise um eine höhere Kapital- und Arbeitsproduktivität der eingesetzten Anlagen und Maschinen oder um verminderte Transport- und Energiekosten. Diese positiven „Nebeneffekte“ können erheblich sein und für sich alleine schon Maßnahmen zur Ökoeffizienz rechtfertigen.

---

<sup>4</sup> Potenziale durch organisatorische Maßnahmen werden in AP. 2.4 beschrieben.

Bei der Einschätzung von Potenzialen ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen (Baron et al. 2005):

- Trendfall: Damit sind Potenziale beschrieben, die durch die normalerweise zu erwartende Fortschrittsdynamik erreicht werden.
- Zusätzlich induzierte Potenziale: Damit sind Potenziale beschrieben, die durch zusätzliche Maßnahmen induziert werden könnten. Dazu gehören beispielsweise die durch ein politisches Förderprogramm oder durch die Selbstorganisation in der Wirtschaft ausgelösten Investitionen und organisatorischen Maßnahmen.

#### **4.1 Rohstoffe – Verfügbarkeit und Auswahl<sup>5</sup>**

Die Rohstoffgewinnung und -förderung ist der erste Schritt in den Prozessketten. Sie stellt eine wichtige Schnittstelle und Stellschraube für den Ressourcenverbrauch von Produktionssystemen und Volkswirtschaften dar. Die zuletzt teilweise drastisch gestiegenen Rohstoffpreise, sowohl für Energieträger als auch für metallische Rohstoffe, deuten zudem auf das große ökonomische Potenzial hin, das in einer Optimierung des gesamten Rohstoffbereichs liegt.

##### **4.1.1 Metallische Rohstoffe**

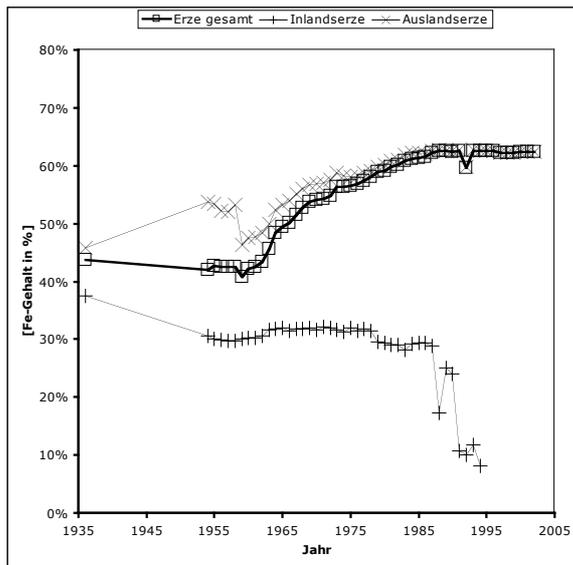
Eine Übersicht über potenziell kritische Rohstoffe, d. H. über solche Rohstoffe, deren Verfügbarkeit unsicher ist, gibt eine aktuelle Studie des Rheinisch-Westfälischen Instituts für Wirtschaftsforschung in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Frondelet et al. 2005). Die zentrale Aussage dabei ist, dass gegenwärtig bei keinem der betrachteten Rohstoffe Knappheiten zu befürchten sind. Berücksichtigt werden muss hierbei jedoch, dass nur neun Metalle und drei Industriemineralien betrachtet wurden. Dessen ungeachtet sind Rohstofflagerstätten global sehr unterschiedlich verteilt, wobei die Rohstoffe deutlich unterschiedliche Qualitäten aufweisen. Vielfach werden hochwertige Rohstoffe bevorzugt eingesetzt (vgl. Abbildung 1), da sie eine effizientere Prozessführung versprechen. Beim Beispiel von Eisen und Stahl führt dies einerseits dazu, dass der Eisengehalt der eingesetzten Erze gegen theoretische Mineralzusammensetzungen und damit gegen einen Grenzwert läuft, andererseits aber auch zu einer vollständigen Importabhängigkeit (vgl. z. B. Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2006-2007), da ausschließlich importierte „Reicherze“ eingesetzt werden, obwohl in Deutschland beispielsweise im Salzgitter-Distrikt relevante Vorräte

---

<sup>5</sup> Baustoffe werden nicht explizit unter einem eigenen Punkt benannt, da sie Teil der hier entsprechend der Sachbilanz systematisierten Struktur sind. Sie sind in den meisten der benannten Rohstoffgruppen z. B. der Metalle/Erze, der Industriemineralien und der Nachwachsenden Rohstoffe zu finden. Für sie gelten die benannten Bewertungen ebenso wie für die Rohstoffe anderer Produktbereiche und -gruppen. Vgl. auch Bleischwitz / Bahn-Walkowiak 2007.

vorhanden sind. Bei ungünstigen Lagerverhältnissen und schlechter Erzqualität sind dort noch Ressourcen von bis zu 4.000 Mio. t Erz vorhanden (Pohl 2005). Der Abbau wäre aufgrund der ungünstigen Geologie teuer und die Prozesseffizienz der Verhüttung würde sich aufgrund geringer Eisengehalte und ungünstiger Beimengungen deutlich verschlechtern.

Abb. 1: Entwicklung des Eisengehalts der in Deutschland eingesetzten Eisenerze



Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage: Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie (Jahrgänge 1929-2003/2004)

Betrachtet man die derzeitigen Vorräte und Fördermengen von Eisenerz (Tabelle 2), so fällt auf, dass es sich hierbei nicht um einen Einzelfall handelt. Weltweit kommen bevorzugt Reicherze zum Einsatz.

Tab. 2: Förderung, Reserven und Ressourcen (Reserve base = Ressourcen einschließlich Reserven) von Eisenerz.

	Mine production		Crude ore		Iron content	
	2005	2006 <sup>e</sup>	Reserves	Reserve base	Reserves	Reserve base
United States	54	54	6,900	15,000	2,100	4,600
Australia	262	270	15,000	40,000	8,900	25,000
Brazil	280	300	23,000	61,000	16,000	41,000
Canada	30	33	1,700	3,900	1,100	2,500
China	420	520	21,000	46,000	7,000	15,000
India	140	150	6,600	9,800	4,200	6,200
Iran	19	20	1,800	2,500	1,000	1,500
Kazakhstan	16	15	8,300	19,000	3,300	7,400
Mauritania	11	11	700	1,500	400	1,000
Mexico	12	13	700	1,500	400	900
Russia	97	105	25,000	56,000	14,000	31,000
South Africa	40	40	1,000	2,300	650	1,500
Sweden	23	24	3,500	7,800	2,200	5,000
Ukraine	69	73	30,000	68,000	9,000	20,000
Venezuela	20	20	4,000	6,000	2,400	3,600
Other countries	42	43	11,000	30,000	6,200	17,000
World total (rounded)	1,540	1,690	160,000	370,000	79,000	180,000

Quelle: USGS mineral commodity summaries 2007

Hohe Fördermengen erreichen derzeit einerseits jene Länder, die über reiche Erze verfügen (erkennbar am Verhältnis Roherz (Crude ore) zum Eisengehalt (Iron content)), also etwa Brasilien oder Australien, andererseits jedoch auch Länder wie China, die als boomendes Schwellenland auch Erze mit geringen Metallgehalten nutzen. In Brasilien und Australien handelt es sich dabei vor allem um Eisenerz für den Weltmarkt, bei dem die Qualität besonders wichtig ist. Dahingegen handelt es sich bei der chinesischen Förderung um preisgünstige Rohstoffe, die in einer noch nicht voll im internationalen Wettbewerb stehenden Industrie genutzt werden.

Dies bedeutet etwa für die deutsche Stahlindustrie - derzeit werden ca. 55 % der Eisenerze aus Brasilien importiert - eine deutliche Abhängigkeit von wenigen Lieferanten, will sie ihre Prozesseffizienz und Wettbewerbsfähigkeit beibehalten. Dabei ist das Beispiel des Eisnerzes vor allem aufgrund der großen Bedeutung für die Volkswirtschaften relevant. Für andere Rohstoffe ist die Anzahl der Fördernationen deutlich geringer und die politische Stabilität der wichtigsten Lieferländer weit weniger gegeben. Zusätzlich ist die Liefersituation unsicherer. Ein Beispiel ist Chrom (vgl. Tabelle 3). Die drei wichtigsten Fördernationen erreichen hier einen Anteil an der Gesamtförderung von rund 75 %. Andere Beispiele für eine Konzentration auf wenige Förderländer wären Zinn, Platin oder Tantal.

Tab. 3: Förderung, Reserven und Ressourcen (einschließlich Reserven) Chrom.

	Mine production <sup>7</sup>		Reserves <sup>8</sup> (shipping grade) <sup>9</sup>	Reserve base <sup>8</sup>
	2005	2006 <sup>e</sup>		
United States	—	W	110	120
India	3,260	3,300	25,000	57,000
Kazakhstan	3,580	3,600	290,000	470,000
South Africa	7,500	8,000	160,000	270,000
Other countries	4,970	5,000	NA	NA
World total (rounded)	19,300	20,000	NA	NA

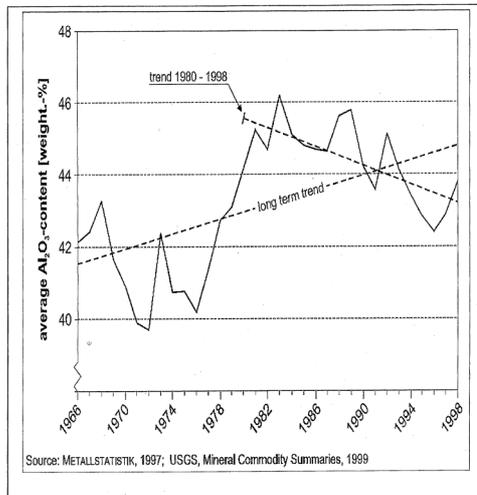
Quelle: USGS mineral commodity summaries 2007

In den beiden Beispielen wird deutlich, dass Europa kaum eine eigene metallische Rohstoffbasis hat, die derzeit wirtschaftlich gefördert und genutzt werden könnte. Soweit überhaupt vorhanden, handelt es sich bei den europäischen und deutschen Lagerstätten um Ressourcen im geologischen Sinne, also um Rohstoffe, die derzeit nicht wirtschaftlich gewinnbar sind.

Wie bereits angesprochen, kommen zahlreiche Rohstoffe in unterschiedlichen Qualitäten vor. Im Gegensatz zu den meisten Massenrohstoffen, bei denen - wie bereits ausgeführt wurde - derzeit nur hochwertige Qualitäten wirtschaftlich gefördert und verarbeitet werden können, gibt es eine Reihe von Rohstoffen, bei denen gegenwärtig sehr unterschiedliche Lagerstätten, sowohl reiche, also Lagerstätten mit hohen Metallgehalten, als auch arme, also Lagerstätten mit geringen Metallgehalten, wirtschaftlich abgebaut werden. Das trifft z. B. auf Lagerstätten von teuren und seltenen Metallen zu, wenn reiche Lagerstätten relativ aufwendig, etwa im Untertagebau von Ganglagerstätten, die armen Lagerstätten aber preisgünstig im Tagebau, etwa aus Seifenlagerstätten, abgebaut werden können. Ein Beispiel hierfür ist Kupfer. Der Kupfergehalt von Kupfererzen variiert sehr stark, bauwürdige Erze weisen Kupfergehalte zwischen 0,8 und 4 % auf (Bruch 1995). Ähnliche Unterschiede gibt es bei einigen anderen Metallen wie etwa Zinn oder Gold. In den aufgeführten Beispielen kann alleine durch die Auswahl des Rohstoffs eine erhebliche Ressourcenersparnis erzielt werden. Voraussetzung ist jedoch eine hinreichende Verfügbarkeit der hochwertigen und reichen Rohstoffe.

Die starke Konzentration auf hochwertige Rohstoffe stößt in einigen Fällen schon erkennbar an Grenzen. Bei der Bauxitgewinnung kann gegenwärtig schon ein Trend zur Verknappung der hochwertigsten Qualitäten beobachtet werden, erkennbar an der mittelfristig abnehmenden Qualität der eingesetzten Bauxite (vgl. Abbildung 2).

Abb. 2: Lang- und mittelfristige Entwicklung der weltweiten Bauxitqualität, dargestellt am Beispiel  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalt.



Quelle: Buntentbach 2007

Die Nutzung geringerer Rohstoffqualitäten macht auch die Entwicklung verbesserter Aufbereitungsverfahren notwendig (z. B. Biomining, Carbon oder Resin in pulp Verfahren, Heap Leach Verfahren etc.).

### Resin in pulp Verfahren

Das Herauslösen der Metalle aus dem Gestein kann mit vielfältigen Methoden erfolgen. Das gewählte Verfahren hängt ab z. B. vom Gehalt des Erzes an Metallen, von der Partikelgröße zu der das gebrochene Erz gemahlen wurde oder von apparativen Bedingungen.

„Bei hydrometallurgischen Anlagen und Minen, die in großer Zahl weltweit zur Gewinnung von Wertstoffen wie Gold, Silber, Nickel, Cobalt, Zink u.a. Wertmetallen betrieben werden, stellen Verfahrensschritte der Filtration und Klärung einen hohen Anteil an den Kapitalkosten der Anlage und den laufenden operativen Kosten dar.

Daher werden große Anstrengungen unternommen, die genannten teuren Verfahrensschritte durch andere weniger kapitalintensive Verfahren zu ersetzen. Neue Verfahren dieser Art sind Carbon in Pulp Verfahren für Silber und Gold und Resin in Pulp ( R.I.P.) Prozess für Gold, Cobalt, Nickel und Mangan. Überraschenderweise zeigen die erfindungsgemäß einzusetzenden monodispersen, makroporösen Chelatharze in R.I.P.-Prozessen deutlich höhere Ausbeuten zu gewinnender Metalle bei verringertem Wasserbedarf, verringertem apparativem Aufwand und weniger Verlusten an Ionenaustauscher als ein R.I.P. Prozess, der gemäß dem Stand der Technik mit heterodispersen Ionenaustauschern betrieben wird. Die erfindungsgemäß im R.I.P.-Prozess einzusetzenden monodispersen, makroporösen Chelataustauscher zeigen im Vergleich zu

heterodispersen Ionenaustauschern ferner die Vorteile niedrigeren Druckverlusts, höherer Beladungsgeschwindigkeiten, gleich lange Diffusionswege durch die Perlen jedoch mit besserer Kinetik, höherer Trennkapazität, schärferen Trennzonen, geringerem Chemikalieneinsatz bei der Elution und höhere Perlstabilität. Der Vorteil des Einsatzes monodisperser, makroporöser Chelatharze im R.I.P.-Prozess liegt zudem in der Tatsache, dass bedingt durch den Jetting-Prozeß oder Seed-Feed-Prozeß bei der Herstellung der Ionenaustauscher-Vorstufe, den monodispersen, makroporösen Perlpolymerisaten, der mittlere Perldurchmesser der Ionenaustauscherperlen bereits bei deren Herstellung exakt auf die Partikelgröße des Erzes und die Maschenweite der Siebe abgestimmt werden kann.

Dadurch ergeben sich folgende Vorteile:

- a) kein Verlust an Metallen und Ionenaustauscher durch Siebverluste
- b) gleichmäßige, schnellere Beladung der Perlen mit den Metallionen,
- c) leichtere Abtrennung der ausgelaugten Erzpartikel von den Ionenaustauschern bei der Siebung, was sich in kürzeren Siebzeiten, geringerem Wasserverbrauch, höherer Anlagenkapazität äußert
- d) scharfe Trennzonen der eluierten Metallionen
- e) geringerer Investitionsaufwand.“

(www.wipo.int: WO/2007/088010: MONODISPERSE, MACROPOROUS CHELATING RESINS IN METAL WINNING)

Eine Weiterentwicklung der Rohstoffaufbereitung kann den erreichten Stand hinsichtlich der Effizienz der Rohstoffnutzung sichern. Das ist insbesondere deshalb notwendig, weil geringe Metallgehalte auf zweierlei Weise die Ressourceneffizienz negativ beeinflussen: zum einen durch den höheren Rohstoffbedarf bei ärmeren Rohstoffen, zum anderen aber auch durch den höheren Aufbereitungs- und Verarbeitungsaufwand und einem entsprechend höheren Ressourcenaufwand in der Produktlinie.

Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Entwicklung von Technologien zur verbesserten Rohstoffnutzung, -förderung und -aufbereitung eine der entscheidenden Voraussetzungen für die steigende Nutzung von Ressourcen gewesen ist. Erst mit diesen Technologien wurde die Effizienz der Werkstoffherzeugung so weit erhöht, dass es zu einer Anwendung im industriellen Maßstab kommen konnte. Diese Technologien haben letztlich zu langfristig sinkenden Preisen bei den meisten Rohstoffen geführt und damit die Nachfrage gesteigert (vgl. Wilburn 2001). Effizienzsteigerungen haben so erst die bis heute steigende Nachfrage nach Rohstoffen ermöglicht. Das deutet auf das komplexe Wechselspiel zwischen Effizienz, Ressourcenverbrauch und Wachstum hin und damit auch auf die Notwendigkeit, sogenannte Wachstums- und Reboundeffekte zu verhindern. Bis heute wurden Effizienzgewinne in aller Regel stets durch eine verstärkte Nachfrage überkompensiert.

Auch die Standortwahl ist für die Ressourceneffizienz von Produktionsprozessen von erheblicher Bedeutung. Dabei ist nicht prioritär, Güter möglichst nah am Ort ihrer Verwendung herzustellen. Insbesondere bei solchen Stoffen, deren Rohstoffe importiert werden müssen, ist der gesamte Transportaufwand geringer, wenn die Verarbeitung der Rohstoffe möglichst nah an den Rohstofflagerstätten erfolgt. Dies ist etwa ein Grund dafür, dass heute die Erzeugung von Aluminiumoxid aus Bauxit für die Herstellung von Aluminium überwiegend in der Nähe der Lagerstätten verortet ist (vgl. Mori et al. 1998). Der Transportaufwand ist hier aufgrund des hohen Massendurchsatzes an Bauxit für die Aluminiumoxidproduktion ein dominierender Faktor. Hingegen erfolgt die Verhüttung zu Aluminium in aller Regel dort, wo preiswert Elektrizität verfügbar ist, da bei der Verhüttung die Elektrizität der dominierende Kosten- und Umweltfaktor ist.

Die Standortauswahl ist in diesem Fall relevant: einerseits bei der Verminderung von Transportaufwendungen und andererseits hinsichtlich der Verfügbarkeit von preiswerter und umweltfreundlicher Energie.

#### **4.1.2 Ressourceneffizienz von Energieträgern**

Ähnliches wie bei den metallischen Rohstoffen gilt auch für die Energierohstoffe. Deutschland verfügt zwar über bedeutende Steinkohlevorkommen, wirtschaftlich zu fördern sind diese jedoch nicht. So werden inzwischen die kompletten Steinkohlevorräte Deutschlands (8384 Mio. [BGR 2005], Förderung in 2005 25,6 Mio. t [www.kohlestatistik.de]) nur noch den Ressourcen und nicht mehr den Reserven zugeordnet.

Wichtig ist hierbei, dass nicht nur hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit, sondern auch hinsichtlich der Ressourceneffizienz bei Energieträgern beträchtliche Unterschiede bestehen, sowohl innerhalb einer Gruppe von Energieträgern, etwa den Steinkohlen, als auch zwischen den unterschiedlichen Energieträgern. Verantwortlich hierfür sind vor allem zwei Punkte: das Verhältnis von nutzbarem Brennstoff zu Abraum und ungenutzter Förderung sowie der Heizwert. Große Unterschiede hinsichtlich des Abraums bestehen bei den Kohlen (vgl. Tabelle 4), insbesondere den Steinkohlen. Die im Tiefbau gewonnenen Steinkohlen sind mit sehr viel geringeren Mengen an Abraum verbunden als die im Tagebau gewonnenen. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass zwar die Ressourceneffizienz des Untertagebaus besser ist, nicht jedoch die Ressourcenproduktivität. Der Untertagebau ist aufgrund der geringeren Mechanisierung und des sehr hohen Aufwands für den Betrieb und Ausbau der Bergwerke sehr viel aufwendiger und teurer als ein Tagebau.

Tab. 4: Durchschnittlicher abiotischer Materialinput bei der Steinkohleförderung in unterschiedlichen Ländern.

	t/t
Deutschland	1,47
China	1,64
Ukraine	1,75
Polen	2,15
Indien	4,9
Großbritannien	5,97
USA	6,11
Russland	7,4
Südafrika	7,7
Kanada	15,32
Australien	17,15

Quelle: Wuppertal Institut, Datengrundlage BGR 1998<sup>6</sup>

Deutschland führt derzeit insbesondere aus Russland, Südafrika, Australien und Kolumbien Steinkohlen ein (Destatis 2007) und damit ganz überwiegend Steinkohlen, die einen deutlich höheren Ressourcenverbrauch aufweisen als die einheimischen Steinkohlen.

Sehr ungünstig ist in beiden Beziehungen, sowohl hinsichtlich des Heizwerts als hinsichtlich des Abraums, die Braunkohle als wichtigster heimischer Energieträger. Sie kann zwar preiswert im Tagebau gefördert werden, ist jedoch mit einem sehr ungünstigen Verhältnis von verwertbarer Förderung zu Abraum verbunden und hat außerdem einen sehr geringen Heizwert (vgl. Tabelle 6). Anders verhält es sich bei Erdöl und Erdgas. Die Ressourceneffizienz der Erdölförderung ist bisher hoch. Mit der verstärkten Nutzung nicht konventioneller Lagerstätten (Ölsande und Ölschiefer) mit ihren typischen Ölgehalten zwischen 1 und 20 % , wird sich die Ressourceneffizienz teils drastisch verschlechtern. Hierzu liegen bislang jedoch noch keine detaillierten Untersuchungen vor. Bereits ein Ölgehalt von 20 % wird jedoch den Materialverbrauch pro t Heizöl von heute 1,36 t auf über 5 t erhöhen.

<sup>6</sup> Neuere Daten sind seitens der BGR nicht verfügbar. Von Bedeutung für die Abschätzung von Potenzialen ist hier allein der Hinweis auf die großen Differenzen im Materialinput, die erhebliche Auswirkungen auf die gesamte Ressourceneffizienz der Wertschöpfungskette haben – je nach Wahl des Förderlandes.

Tab. 5: Heizwerte und durchschnittliche abiotische Materialinputs von Energieträgern

	Heizwert $H_u$ [MJ/kg]	t/t
Steinkohle (Dtl.)	29,4	2,36
Braunkohle	8,8	9,68
Heizöl el.	42,8	1,36
Heizöl S	40,7	1,5
Erdgas	41	1,22

Quelle: Wuppertal Institut 2003)

Die unterschiedlichen Heizwerte und Ressourcenverbräuche von Energieträgern machen eine sorgfältige Auswahl notwendig. In einigen Fällen kann etwa durch eine Kaskadennutzung (z. B. zunächst eine werkstoffliche Nutzung als Kunststoff mit anschließender energetischer Nutzung) die Ressourceneffizienz erhöht werden. Es gibt jedoch Anwendungen, wo z. B. nur gasförmige oder flüssige Brennstoffe effizient eingesetzt werden können und eine direkte Kaskadennutzung daher nicht in Frage kommt (z. B. bei Industrieöfen in der Glas- und Keramikindustrie).

Energieträger werden jedoch nicht nur direkt genutzt. Wichtig ist insbesondere auch die Elektrizitätserzeugung aus Primärenergieträgern. Hierbei treten noch größere Unterschiede hinsichtlich der Ressourceneffizienz auf als bei den Energieträgern (vgl. Tabelle 6).

Beträchtliche Unterschiede gibt es jedoch nicht nur bei den nicht erneuerbaren Energieträgern, sondern auch bei den erneuerbaren. Grundsätzlich gilt dabei, dass die erneuerbaren Energieträger ressourceneffizienter sind als die nicht erneuerbaren Energieträger.

Eine Reihe von Untersuchungen zur Ressourceneffizienz erneuerbarer Energieträger sind jedoch zu alt, um noch aussagekräftig zu sein. Die teils sehr dynamische Entwicklung im Bereich der Fotovoltaik aber auch der Windkraft lässt Ergebnisse schnell veralten. Deutlich belastbarer sind die Ergebnisse (Tab. 6) für die Nutzung der Wasserkraft, da hier die technische Entwicklung und der Ausbau bereits weitgehend abgeschlossen sind.

Tab. 6: Materialintensität für die Produktion einer MWh elektrischen Energie in kg/MWh

Angaben pro 1 MWh Strom	MI-abiotisch [kg]	MI-Wasser [kg]	MI-Luft [kg]
Deutschland Netz	4.690	83.431	613
Durchschnitt OECD Länder	1,55	66,7	0,535
Kernenergie	0,31	79,5	0,005
Braunkohle	14,01	88,2	1,127
Heim. Steinkohle	0,77	80,3	0,807
Importsteinkohle	1,86	79,9	0,866
Erdgas	0,32	79,4	0,847
Deutschland Laufwasser	0,113	42	2
Island Wasserkraft	0,028	200.144	0
Norwegen Wasserkraft	0,002	747.836	0
Windkraft	0,114	56	9

Quelle: Wuppertal Institut / Manstein 1996

Auffallend sind die großen Unterschiede bei der Wasserkraft in den verschiedenen Ländern. Das rührt zum einen aus unterschiedlichen Anteilen von Speicherkraftwerken und Laufwasserkraftwerken an der Erzeugung, zum anderen aber auch aus der unterschiedlichen Topografie der Länder her. Bei gleicher Durchflussmenge hängt die erzeugte Elektrizitätsmenge unmittelbar von der Fallhöhe ab. Länder mit großen Höhenunterschieden wie die Alpenländer aber auch Norwegen sind daher grundsätzlich hinsichtlich ihrer Wasserkraftpotenziale und der Effizienz ihrer Nutzung begünstigt gegenüber Ländern wie Deutschland oder Finnland mit ihren meist relativ geringen Höhenunterschieden.

#### 4.1.3 Industriemineralien

Für eine Reihe anderer Rohstoffe gelten die zuvor beschriebenen Effekte nicht. Deutschland verfügt über große Vorräte verschiedener Salze, Kalk und Dolomit oder hochwertiger Tone und Kaoline. Hierbei handelt es sich ebenfalls um wichtige Industrierohstoffe etwa für die Erzeugung von Baustoffen aber auch für chemische Erzeugnisse. Anders als bei den Metallen muss hierbei jedoch berücksichtigt werden, dass ein Recycling teilweise nicht möglich ist. Während Metalle praktisch „unbegrenzt“ rezykliert werden können, besteht diese Möglichkeit etwa für tonkeramische Erzeugnisse nicht im gleichen Maße. Nach dem Brennen lassen sich die ursprünglichen Eigenschaften des Tons, insbesondere seine plastische Formbarkeit, aufgrund irreversibler Veränderungen der enthaltenen Minerale nicht wieder herstellen. Dies trifft auf einen großen Teil der heute eingesetzten Baustoffe zu (Mauerziegel, Dachziegel, Fliesen, Steinzeugabwasserrohre etc.). Ähnliches gilt auch für zahlreiche Produkte auf der Basis von

Salzen. Eine wichtige Verwendung ist die Erzeugung von Düngern. Diese können nach ihrer Ausbringung nicht zurückgewonnen werden. Bei diesen Materialien müssen daher andere Strategien zur Ressourceneffizienzsteigerung als bei Metallen herangezogen werden. Neben einer sparsamen Verwendung kommt einer langen Nutzungsdauer gefolgt von einer Kaskadennutzung eine größere Bedeutung zu. Dies ist teilweise bereits umgesetzt, indem etwa Bauschutt aufbereitet und als Schotter im Straßenbau eingesetzt wird (vgl. hierzu auch das Kapitel Werkstoffe). Die möglichen Anwendungsbereiche sind jedoch bisher noch sehr beschränkt.

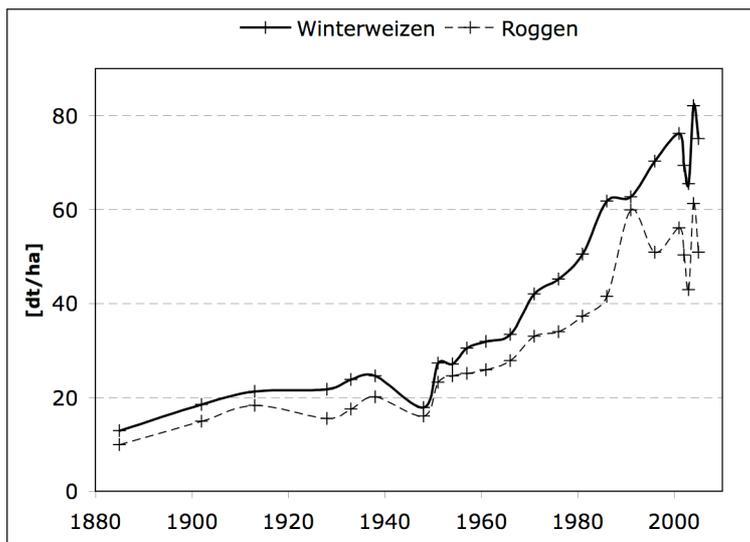
#### 4.1.4 Nachwachsende Rohstoffe

Nachwachsende Rohstoffe werden heute intensiv diskutiert. Dabei stehen zwei Anwendungen im Mittelpunkt: die energetische und die stoffliche Nutzung. Beide Nutzungsarten stehen zueinander in Konkurrenz und in Konkurrenz zur Erzeugung von Nahrungsmitteln. Der Begriff „nachwachsende Rohstoffe“ bezieht sich jedoch nur auf die Biomasse, die nicht als Nahrung und Futtermittel genutzt wird (vgl. FNR 2007).

Der grundsätzliche Vorteil von nachwachsenden oder erneuerbaren Rohstoffen ist, dass sie grundsätzlich unerschöpflich sind. Das bedeutet jedoch nicht, dass sie unbegrenzt verfügbar sind. Auch ihre Verfügbarkeit ist durch die Erträge der Pflanzen und die Ökosysteme begrenzt.

In der Landwirtschaft ist die Produktivitätsrate pro Hektar jedoch enorm gestiegen – Züchtung und Grüne Revolution haben die Ernährungsbasis der Weltbevölkerung deutlich ausgeweitet (Hahlbrock 2007: 123 ff., 162 ff.). Dies wird am Beispiel von Getreide deutlich (Abbildung 3).

Abb. 3: Entwicklung der Erträge von Weizen und Roggen in Deutschland



Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage: Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 2006, Münster 2006

Diese Ertragssteigerungen sind das Ergebnis einer ganzen Reihe von Maßnahmen, wie verbesserter Sorten, dem verstärkten Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln und einer fortschreitenden Mechanisierung. Zumindest in den letzten Jahren kann jedoch eine Verringerung des Düngemittleinsatzes beobachtet werden (vgl. Statistisches Jahrbuch über Ernährung 2006).

Allerdings werden heute große Mengen der erwirtschafteten Biomasse nicht genutzt (Schmidt-Bleek 2007). Sie verbrauchen erst große Ressourcenmengen zu ihrer Erzeugung, unmittelbaren Nutzen stiftet jedoch nur ein Teil der gesamt erzeugten Biomasse. Dieser Zusammenhang zeigt, dass trotz bestehender Nutzungskonkurrenz eine intensivere Nutzung nachwachsender Rohstoffe möglich ist. Das kann bedeuten, dass Nahrungsmittelerzeugung mit einer energetischen Nutzung, etwa Biogaserzeugung, verbunden wird (Bringezu et al. 2007)

Eine intensive Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen kann aber auch deutlich negative Auswirkungen auf die Umwelt und die Menschen vor Ort haben. Dies zeigt etwa das Beispiel des Baumwollanbaus. In zahlreichen Anbauregionen bestehen hier Flächennutzungskonkurrenzen, wobei der Anbau regionaler Kulturen vernachlässigt wird. In der Folge wird zugunsten einer Exportorientierung auf Monokulturen gesetzt und bewährte Fruchtwechsel nicht mehr vollzogen. Hierbei kann es zu einem Verlust an fruchtbaren Ackerböden kommen (Paulitsch et al. 2004).

In einigen Fällen kann die Nutzung erneuerbarer Rohstoffe auch die Ressourceneffizienz verschlechtern. Das gilt insbesondere für die energetische Nutzung von Biomasse. Der geringe Heizwert von Energieträgern aus Biomasse (vgl. Tabelle 7) verringert zwangsläufig die Prozesseffizienz, da die Verbrennungstemperaturen reduziert werden und daher der thermische Wirkungsgrad sinkt. Hier gibt es u. U. einen Zielkonflikt zwischen höchstmöglicher Effizienz und der verstärkten Nutzung erneuerbarer Rohstoffe.

Tab. 7: Heizwert von Energieträgern

Stroh	4 kWh/kg	Braunkohle	5,6 kWh/kg
Schilfarten	4 kWh/kg	Steinkohle	8,9 kWh/kg
Getreidepflanzen	4,2 kWh/kg	Heizöl	11,7 kWh/kg
Holz	4,4 kWh/kg	Erdgas	8,3 kWh/m <sup>3</sup>
Biogas	6,1 kWh/m <sup>3</sup>		

Quelle: [http://www.thema-energie.de/article/show\\_article.cfm?id=151](http://www.thema-energie.de/article/show_article.cfm?id=151)

Grundsätzlich muss berücksichtigt werden, dass eine energetische und stoffliche Nutzung von Biomasse andere, nicht unbedingt geringere Umweltbelastungen hervorruft als die Nutzung fossiler Rohstoffe. Aufgrund der global begrenzten landwirtschaftlichen Nutzflächen können erneuerbare Ressourcen zudem nur einen Teil des bisherigen

Einsatzes nicht erneuerbarer Ressourcen ersetzen. Bei einer starken Ausweitung der Nutzung von erneuerbaren Ressourcen besteht daher die Gefahr, dass dies zu einer weiteren Beeinträchtigung von Ökosystemen führt. (Bringezu et al. 2007)

Grundsätzlich gilt, dass es bei den biotischen Rohstoffen vor allem auf den Umfang der Flächeninanspruchnahme sowie auf die damit verbundene Erosion und Bodenbewegung ankommt. Erosion ist zu vermeiden, ebenso wie tiefe Bodenbewegungen mit ihrem Eingriff in die Bodenhorizonte und nachfolgender Oxidationsprozesse. Monokulturen fördern vielfach diesen Prozess und setzen die Flächen großem Stress aus. In den vergangenen vierzig Jahren ging so fast ein Drittel des landwirtschaftlich nutzbaren Bodens durch Erosion verloren. Rund 10 Mill. Hektar Ackerland gehen auf diese Weise jährlich verloren und 75 Milliarden Tonnen Ackerboden (Schmidt-Bleek 2007).

#### **4.1.5 Fazit: Rohstoffe – Verfügbarkeit und Auswahl**

Abiotische Rohstoffe wie Erze, fossile Energieträger und Industrieminerale haben sehr unterschiedliche Materialintensitäten. Auch Erze derselben Metalle können in ihrem Metallgehalt erheblich variieren. Bei Massenrohstoffen wie Eisenerze oder Bauxit erfolgt bereits eine Optimierung auf hohe Metallgehalte und leichte Aufschließbarkeit, da dies wesentliche Voraussetzungen für die wirtschaftliche Führung der nachfolgenden Prozesse ist. Bei anderen Metallen gibt es oft größere Unterschiede. Bei sehr unterschiedlichen Lagerstättentypen können häufig sehr unterschiedliche Metallgehalte wirtschaftlich gefördert werden. In Ausnahmefällen können auch sehr niedrige Sozialstandards und Einkommen den wirtschaftlichen Abbau von Lagerstätten erst ermöglichen.

Bei vielen nicht metallischen Rohstoffen (Salzen, Kalk, Dolomit, Tone und Kaolin) ist zwar der Ressourcenverbrauch relativ gering, die Recyclingfähigkeit ist aber aufgrund ihrer Verwendung etwa in Bindemitteln oder Keramik meist eingeschränkt. Eine möglichst lange Nutzung mit anschließender Kaskadennutzung kann hier eine geeignete Strategie sein.

Verglichen mit den Metallen ist die Förderung von Erdöl oder Erdgas bezogen auf die Ressourceneffizienz bisher unproblematisch. Mit einem sich abzeichnenden teilweisen Übergang auf nicht konventionelle Kohlenwasserstoffe dürfte sich dies jedoch langfristig ändern. Ein Grundproblem der Nutzung von fossilen Kohlenwasserstoffen ist, dass durch die überwiegende unmittelbare Verwendung als Brennstoff bei Weitem nicht den eigentlich möglichen Nutzen erhalten wird. Hier liegt ein bedeutendes Potenzial für eine Kaskadennutzung mit aufeinanderfolgender stofflicher und energetischer Nutzung (vgl. auch Kapitel 3.2.3).

Bei den biotischen Rohstoffen kommt es auf die Flächeninanspruchnahme und die damit verbundene Erosion und Bodenbewegung an. Erosion ist zu vermeiden ebenso wie tiefe Bodenbewegungen. Monokulturen fördern vielfach diesen Prozess und setzen die Flächen großem Stress aus.

Eine verstärkte Nutzung erneuerbarer Rohstoffe kann zur Umwelt- und Ressourcenschonung beitragen. Die Nutzung erneuerbarer Rohstoffe ist jedoch auch mit einer ganzen Reihe von Problemen auch aus Sicht der Ressourceneffizienz, verbunden. Insofern sollte eine Substitution nicht erneuerbarer Rohstoffe durch erneuerbare nur nach sorgfältiger Abwägung erfolgen.

Die Einflussmöglichkeiten auf die Ressourceneffizienz durch eine gezielte Auswahl von Rohstoffen werden daher wie folgt eingeschätzt:

- Erze: gering bis groß,
- Fossile Energieträger: groß, eine zukünftige Verringerung der Ressourceneffizienz ist wahrscheinlich,
- Industrieminerale: gering,
- Biotische Rohstoffe: je nach Anbauart gering bis sehr groß.

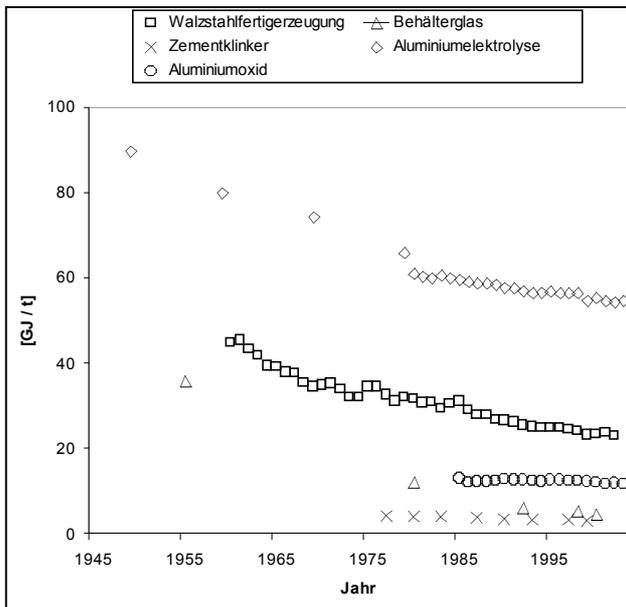
## **4.2 Werkstoffe**

Werkstoffe sind die Basis aller Güter. Sie bestimmen mit ihren Eigenschaften die Gestaltung und die Funktion von Produkten. Zugleich bestimmt die Werkstoffherstellung zu weiten Teilen die Umweltbelastungen und Ressourcenverbräuche, die mit der Herstellung von Gütern verbunden sind. Dementsprechend groß ist die Bedeutung der Herstellung, Weiter- und Neuentwicklung von Werkstoffen für den Ressourcenverbrauch und die Umwelt.

### **4.2.1 Erzeugung von Werkstoffen**

Effizienzsteigerungen bei der Produktion von Werkstoffen waren eine der Voraussetzungen für das Einsetzen und den Ablauf der Industrialisierung. In vielen Fällen wurden Prozesse und Produkte erst durch Effizienzsteigerungen möglich oder wirtschaftlich. Eisen und Stahl konnten erst durch die Einführung moderner Fertigungsverfahren und Brennstoffe ihre weite Verbreitung finden. Solange Eisen mit Holzkohle als Reduktionsmittel erzeugt oder Stahl als Schmiedestahl hergestellt wurde, waren Eisen und Stahl sehr teure Werkstoffe. Ein wesentlicher Grund war die Ineffizienz der Verfahren. Alle Grundstoffindustrien, die mit einem hohen Einsatz an Ressourcen und Energien arbeiten, haben im letzten Jahrhundert erhebliche Effizienzsteigerungen in ihrer Produktion erreicht. Dies lässt sich gut an der Entwicklung des Energieverbrauchs bei der Herstellung wichtiger Grund- und Werkstoffe erkennen (Abbildung 4).

Abb. 4: Energieverbrauch bei der Herstellung ausgewählter Werkstoffe



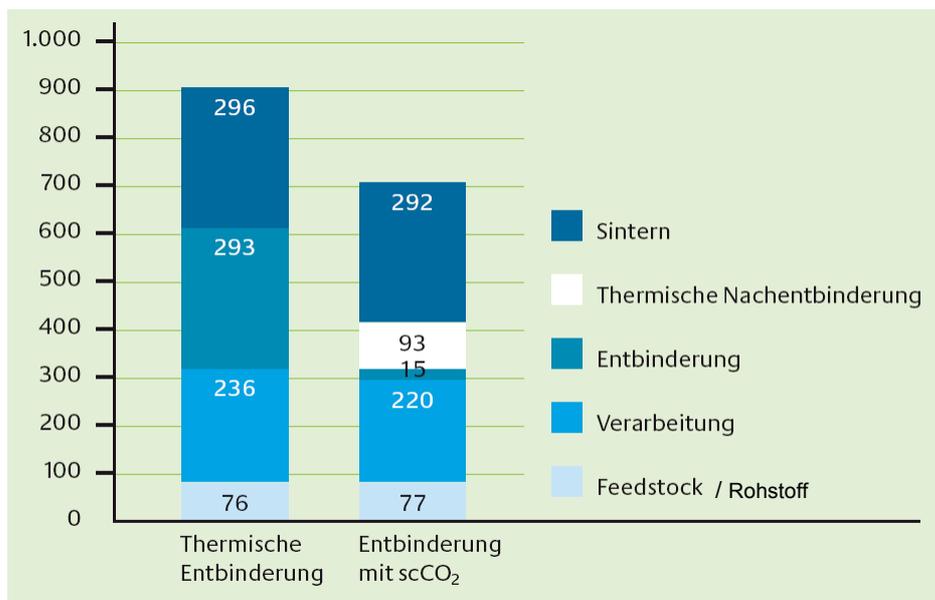
Quelle: Eigene Darstellung, Datenbasis: Statistisches Jahrbuch der Eisen- und Stahlindustrie 1948 bis 1988; Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 1989 bis 2007 Gesamtverband der deutschen Aluminiumindustrie, Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V.; Bundesverband Glasindustrie e.V.

Diese Entwicklung des Energieverbrauchs hat verschiedene Ursachen. Neben der besseren Beherrschung der Prozesse hat die steigende Anlagengröße ebenso einen Einfluss wie die Wärmedämmung und Abwärmenutzung bei industriellen Anlagen. Sie ist jedoch auch ein Ergebnis einer gezielten Rohstoffauswahl (vgl. Kapitel 3.1).

Grundsätzlich gilt für die Werkstoffherzeugung wie auch für viele andere Verfahren und Produkte, dass die Ressourceneffizienz der Herstellung kontinuierlich steigt, wobei die Fortschritte zunehmend geringer werden. Dennoch gelangen immer wieder auch relevante Fortschritte durch die Weiterentwicklung von Verfahren oder ihre Übertragung in andere Anwendungsbereiche. Ein Beispiel sind etwa Mahlvorgänge von Produkten oder Rohstoffen. Die Vermahlung von Zementklinker erfolgte lange Zeit ausschließlich in Kugelmöhlen, die einen sehr geringen Wirkungsgrad haben. Die Nutzung anderer Möhlen scheiterte, da die benötigte Mahlfeinheit nicht erreicht werden konnte. Inzwischen konnten jedoch auch Wälzmöhlen so gestaltet werden, dass sie für höhere Zementfeinheit (und damit Festigkeit) eingesetzt werden können. Damit lassen sich für die Vermahlung von Zementklinker Energieeinsparungen bis 30 % und für Hüttensand von teilweise über 50 % erzielen (Schäfer 2002, Hackländer-Woywadt 2005 und Ahluwalia 2006). Korrespondierend damit werden entsprechende Mengen an Energierohstoffen eingespart. Für geringe Mahlfeinheiten – d. h. geringen Festigkeiten – ist der Einsatz von Wälzmöhlen bei Neuanlagen inzwischen Stand der Technik.

Ein anderes Beispiel ist technische Keramik. Bei der Herstellung technischer Keramik aus den pulverförmigen Grundstoffen müssen zunächst die ungebrannten Rohlinge hergestellt werden. Hierbei werden häufig organische Bindemittel eingesetzt. Gegenüber dem dominierenden thermischen Verfahren der Entfernung von Bindemitteln aus dem ungebrannten „grünen“ Keramikkörper kann der Energieaufwand durch den Einsatz von Lösungsmitteln, etwa überkritisches Kohlendioxid, signifikant reduziert werden (vgl. Abbildung 5).

Abb. 5: Primärenergiebedarf in MJ bei der Erzeugung technischer Keramik



Quelle: BMBF2004

## 4.2.2 Recycling

Recycling hat bei den Metallen, insbesondere Eisen, Aluminium, Kupfer und den Edelmetallen eine lange Tradition. Andere Stoffe mit seit langer Zeit hohen Recyclingquoten sind Verpackungsglas und Papier. Hauptgrund für Recycling bei diesen Stoffen sind Einsparungen von Energie und Ressourcen und die damit verbunden Kosteneinsparungen. Die durch Recycling möglichen Ressourceneinsparungen zeigt Tabelle 8 anschaulich für einige der genannten Beispiele. Bei allen in Tabelle 8 aufgeführten Beispielen spart das Recycling deutlich Ressourcen. Hier sind alle Verfahren hilfreich, deren Materialinput deutlich unter dem der Primärerzeugung liegt. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn es sich um werkstoffliches Recycling handelt.

Tab. 8: Materialintensität der Primär- und Sekundärerzeugung von ausgewählten Werkstoffen

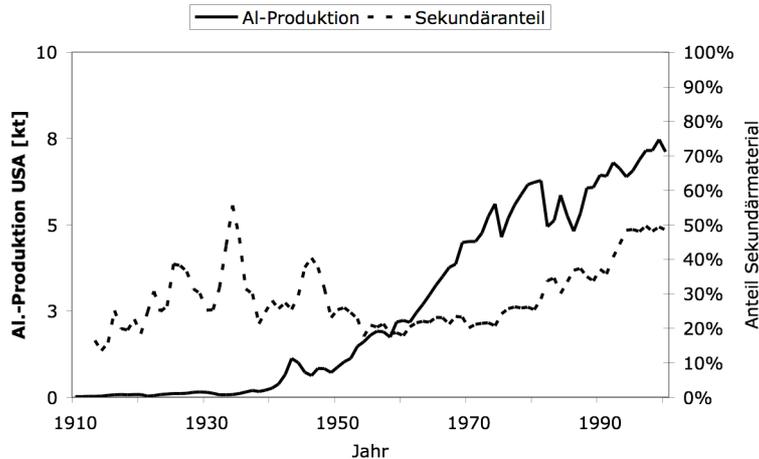
	Einsatz abiotischer Ressourcen [t/t]		Einsatz abiotischer Ressourcen [t/t]
Kupfer (primär)	348,47	Kupfer (sekundär)	9,66
Aluminium (primär)	37,00	Aluminium (sekundär)	0,85
Stahl (Oxygenstahl)	8,14	Stahl (Elektrolichtbogenofen)	1,47
Verpackungsglas (primär)	3,04	Verpackungsglas (88 % sekundär)	0,87

Quelle: Wuppertal Institut / Wurbs et al. 1996

Die Verhältnisse sind für seltene und aufwendig zu erzeugende Edelmetalle wie Gold oder Platin noch deutlich extremer. Wesentlich aufwendiger ist insbesondere die Primärerzeugung. Die Erzeugung der sekundären Edelmetalle wurde jedoch bisher nicht detailliert betrachtet.

Recycling im Inland setzt die Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen einer bestimmten, möglichst gleichmäßigen Qualität und Menge voraus. Hier wirken insbesondere die deutsche Exportorientierung sowie die unverändert wachsenden weltweiten Produktionsmengen der meisten Werkstoffe limitierend (vgl. auch Ritthoff 2006). Werkstoffe, die exportiert werden, stehen nicht für ein inländisches Recycling zur Verfügung. Hinzu kommt, dass noch immer ein erheblicher Anteil von Werkstoffen unverändert für den Bestandsaufbau verwendet wird, d. h. langfristig in Gütern und Infrastrukturen gebunden wird. Diese Werkstoffe bleiben für einige Zeit (Monate bis einige 100 Jahre) in Produkten und Infrastrukturen gebunden und fallen erst mit erheblichem Zeitverzug wieder als Altstoff an. Auch bei hoher Recyclingquote, d. h. bei weitgehender Wiederverwendung anfallender Altstoffe, wird daher häufig im Vergleich zur aktuellen Gesamtproduktion eines Werkstoffes ein deutlich geringerer Sekundärmaterialeinsatz erreicht. Dieser Zusammenhang ist in allen Ländern gleichermaßen zu beobachten und wird anhand eines Beispiels aus den USA verdeutlicht. Abbildung 6 zeigt einen Vergleich der Produktionsmengen von Primäraluminium und dem Anteil von Sekundäraluminium in den USA. In Phasen hohen Wachstums (z. B. in den 50er bis 70er Jahren) ist der Sekundäranteil relativ gering, wohingegen in Zeiten der Stagnation hohe Sekundäranteile erreicht wurden und werden.

Abb. 6: Aluminiumproduktion und Sekundärmaterialanteil in den USA



Datengrundlage: U.S. Geological Survey (USGS); aluminum statistics

Recycling wird begünstigt durch große einheitliche Stoffmengen (Stahl, Glas, Papier etc.) oder einen hohen Wert (Edelmetalle). Im Idealfall sollte die stoffliche Zusammensetzung der Werkstoffe über lange Zeit weitgehend unverändert beibehalten werden. Recycling kann nur dann einen hohen Beitrag zu Ressourceneinsparungen in einem Werkstoffsystem leisten, wenn geringes Wachstum besteht, d. H. der Anteil der Primärproduktion sinkt und genügend Sekundärrohstoffe zur Verfügung steht. Eine weitere Voraussetzung für eine erfolgreiche Sekundärproduktion ist die grundsätzliche Eignung von Rohmaterialien für das Recycling. Wichtige Kriterien sind z. B.:

- Toleranz gegenüber Verunreinigungen,
- leichte Identifikation und Trennbarkeit,
- Herstellung über einen reversiblen Prozess (z. B. Schmelzprozess).

Bei irreversiblen stofflichen Veränderungen im Herstellungsprozess ist ein effizientes Recycling praktisch nicht möglich (z. B. Duroplaste, Keramik oder Bindemittel). In diesen Fällen ist der Ressourcenverbrauch für das Recycling in aller Regel vergleichbar groß oder größer als der Aufwand für die Herstellung der Primärmaterialien.

Das absolute Ressourceneffizienzpotenzial durch gesteigertes Recycling ist daher aus volkswirtschaftlicher Sicht weniger groß, als es auf den ersten Blick scheint. Außerdem verschlechtern die Tendenzen zu größerer Werkstoffvielfalt, Maßwerkstoffen und Verbundwerkstoffen die Recyclingfähigkeit oder die praktische Umsetzung. Zugleich wird aber die Produktqualität verbessert oder der Herstellungsaufwand reduziert. Der Zielkonflikt kann nicht allgemeingültig gelöst, sondern muss im Einzelfall untersucht werden. Dessen ungeachtet spielt Recycling in der heutigen Umweltdebatte eine bedeutende Rolle. Zahlreiche gesetzliche Regelungen (Kreislaufwirtschaftsgesetz, Altautoverordnung, Elektronikschrottverordnung) ordnen das Recycling von Gütern und Stoffen an.

fen und stellen teils erhebliche Anforderungen an die Kreislauffähigkeit von Stoffen und Gütern. Dabei bleibt jedoch unklar, ob Recycling in jedem Fall die günstigste Lösung ist. Dies mag auch das folgende Beispiel des Bildröhrenrecyclings verdeutlichen.

### **Beispiel Bildröhrenrecycling**

Lange Zeit war es kaum möglich, Bildröhren hochwertig wiederzuverwenden. Bildröhren werden aus drei unterschiedlichen Glastypen gefertigt. Für den Konus und den Röhrenhals kommen zwei unterschiedlich bleihaltige Gläser zum Einsatz, wohingegen der Schirm aus einem bariumhaltigen und bleifreien Glas besteht. Sowohl der Einsatz von Blei wie der von Barium geschieht aus Gründen des Strahlenschutzes und ist praktisch alternativlos. Die aus Sicht des Strahlenschutzes günstigere Lösung sind Bleigläser, da diese jedoch bei Bestrahlung eintrüben, muss der Schirm aus einem bariumhaltigen Glas hergestellt werden. Will man diese Gläser hochwertig rezyklieren, ist es notwendig, die Bildröhre in ihre drei Ausgangsgläser zu trennen. Seit einigen Jahren ist dies grundsätzlich möglich und wird auch praktiziert. Mit der rapide steigenden Marktdurchdringung von Flachbildschirmen, sowohl bei Computermonitoren als auch bei Fernsehgeräten, wird sich aber die Frage stellen, was in Zukunft mit diesem Altglas geschehen soll. Der Markt für traditionelle Bildröhren und damit die Einsatzmöglichkeit für entsprechendes Altglas wird deutlich schrumpfen, wenn nicht zusammenbrechen. Diese Glaswerkstoffe haben sich weitgehend überlebt. Ein Recycling (oder eher eine Kaskadennutzung) wird daher vor allem in anderen Glasanwendungen erfolgen müssen. Die hohen Anteile an Bleioxid verhindern jedoch einen Einsatz in den meisten anderen Anwendungen. Zum einen, weil es ungeeignete Eigenschaften in andere Glasprodukte einbringen kann, zum anderen aber auch, weil der Einsatz von Blei aufgrund der mit ihm verbundenen Gesundheitsrisiken eingeschränkt wurde. Es scheint jedoch grundsätzlich möglich, Bildröhrenglas bei der Produktion von Schaumglas für die Gebäudedämmung einzusetzen (Bernardo / Scarinci / Hreglich 2005).

Recycling stößt häufig auch dort an Grenzen, wo sich Zusammensetzungen von Werkstoffen verändern. Dies wird z. B. am Beispiel von Flachglas deutlich (vgl. Tabelle 9). Im Laufe des Betrachtungszeitraums hat sich die Zusammensetzung von Flachglas deutlich geändert. Deutlich wird dies etwa am  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - oder  $\text{CaO}$ -Gehalt. Aufgrund der langen Nutzungsdauer von Flachglas machen diese Veränderung sowie die hier nicht dargestellten Unterschiede zwischen unterschiedlichen Herstellern, ein Recycling innerhalb der Flachglasproduktion praktisch unmöglich. Eine Kaskadennutzung durch Nutzung für andere Glasprodukte, etwa Glaswolle, ist jedoch möglich.

Tab. 9: Veränderung der durchschnittlichen Zusammensetzung von Flachglas. Zusammensetzung in Gew. %

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MnO	RO	R <sub>2</sub> O
bis 1835	71,86	4,59		8,75		13,54	5,50			8,75	14,90
1846-1880	72,03	1,77	0,41	9,62	0,26	12,23	10,98	0,70		9,69	16,44
1880-1914	72,22	1,79	0,30	12,37	0,17	13,36	1,18	0,51	0,08	12,44	13,60
1919-1938	71,68	0,75	0,16	11,08	1,72	14,13	0,53	0,63	0,13	12,77	14,16
1943-1944	72,50	0,60	0,04	6,86	2,00	17,29		0,58		8,87	17,29
1946-1990	72,02	1,00	0,08	8,50	3,61	14,05	0,29	0,33		12,12	14,21

Quelle: Smrcek 2005

Grundsätzlich steigt der Nutzen des Recyclings mit der Zahl der Umläufe, d. H. der Häufigkeit, mit der der Werkstoff „im Kreis“ geführt wird. Damit ist das Potenzial für stoffliches Recycling insbesondere bei kurzlebigen Gütern hoch. Für langlebige Güter muss eine langfristige Nutzbarkeit der Stoffe gesichert werden (vgl. das Beispiel der Bildröhre oder des Flachglases). Vielfach funktionieren Stoffkreisläufe jedoch nur unbefriedigend. Das liegt häufig daran, dass der Mengenanfall ungünstig ist, Stoffe sich in kurzer Zeit erheblich weiterentwickeln oder die lange Lebensdauer von Produkten eine Wiederverwertung der in ihnen enthaltenen Stoffe ungewiss machen.

Recycling kann daher insbesondere bei kurzlebigen Gütern, d.h. Gütern, die innerhalb kürzester Zeit entsorgt werden z. B. Verpackungen, ICT-Produktteile etc., einen Beitrag zur Ressourcenschonung leisten. Für langlebige Güter ist eine differenziertere Strategie notwendig. Einerseits muss eine langfristige Kompatibilität der Werkstoffkreisläufe gewährleistet werden. Dies ist eine bisher wenig beachtete Nebenbedingung für Werkstoffinnovationen. Wo diese nicht möglich ist, sind andererseits höhere Anforderungen an die zu erzielenden Einsparungen zu stellen und insbesondere eine umweltverträgliche Entsorgung sicherzustellen. Dies kann Downcycling und thermische Entsorgung einschließen. Hier gibt es einen Übergang vom Recycling zur Kaskadennutzung.

### Leitlinien für ein zukunftsfähiges Recycling

Eine zielführende Strategie für ein zukunftsfähiges Recycling könnte sein, zwischen großen Massenströmen kurzlebiger Massenwerkstoffe sowie kleineren Massenströmen hochspezialisierter und langlebiger Werkstoffe zu unterscheiden. Mögliche Leitlinien sind:

- Recycling für kurzlebige Güter aus Massenwerkstoffen.
- Schadloose Entsorgung für langlebige Güter aus Maßwerkstoffen.
- Thermische Nutzung nicht rezyklierbare Werkstoffe, soweit eine energetische Nutzung möglich ist.

Recycling sowie die Lebensdauer von Gütern sind Faktoren, die bereits bei der Produktgestaltung mitbedacht werden müssen. Sie sind immens wichtig, da sich hier hohe Ressourcen- und Energieeffizienzpotenziale verbergen.

### 4.2.3 Kaskadennutzung

Dort, wo ein hochwertiges Recycling nicht möglich ist, kann eine Kaskadennutzung eine ressourceneffiziente Alternative zu einer Entsorgung sein. Wichtig ist es, hierzu nicht alleine den Nutzen des Hauptproduktes zu optimieren, sondern auch weitere Nutzungszyklen in die Entwicklung und das Design von Produkten und Dienstleistungen mit einzubeziehen. Das kann jedoch auch bedeuten, die Erstanwendung weniger effizient zu gestalten. Damit kann ein grundsätzlicher Konflikt entstehen: Es können Stoffe oder Produkte entstehen, die in einigen Eigenschaften schlechter sind als sie es sein könnten, damit hochwertigere nachfolgende Werkstoffe oder Produkte entstehen können. Das macht eine Kaskadennutzung manchmal problematisch und zeigt, dass im Idealfall nicht nur entlang von Wertschöpfungsketten optimiert werden muss, sondern gegebenenfalls auch wertschöpfungskettenübergreifend.

Die Einsparpotenziale durch Kaskadennutzung können sehr unterschiedlich groß sein. Die Einsparungen durch Kaskadennutzung erreichen in aller Regel nicht die Größe etablierter Recyclingkreisläufe, da geringwertigere, d. H. in aller Regel auch in Hinblick auf Umwelt- und Ressourcenverbrauch weniger aufwendige Produkte ersetzt werden.

Kunststoffe eignen sich nach ihrer Erstnutzung meist nur zum Downcycling, also zu einer Kaskadennutzung oder zur Verbrennung. Ein Beispiel für eine gelungene Kaskadennutzung ist die Nutzung von PET-Flaschen zur Herstellung von Fleecematerialien. Aus durchschnittlich 16 gebrauchten PET-Flaschen mit einem Materialwert von ca. 0,32 € kann so ein Fleecepullover mit einem Verkaufspreis von 50-100 € entstehen (vgl. Lehmann 2006).

Am Beispiel der Nutzung von PET-Flaschen als Rohstoff für die Erzeugung von Polyestervlies für die Textilindustrie kann man darüber hinaus auch erkennen, dass ein Unterschied hinsichtlich der technischen und ökonomischen Beurteilung von Kaskadennutzung besteht.

Aus ökonomischer Sicht ist das zweite Produkt, d. H. ein Textilprodukt hochwertiger und signifikant teurer als das Ausgangsprodukt, einige PET-Flaschen. Aus technischer Sicht trifft dies jedoch nicht zu. Die Anforderungen an die Verunreinigungsfreiheit sind beim Ausgangsprodukt deutlich höher. Das Vlies kann nicht mehr zu einer hochwertigen PET-Flasche verarbeitet werden.

Kaskadennutzung ist aus Sicht von Ressourceneffizienz mit einem erkennbaren Potenzial verbunden. Da jedoch häufig einfache Stoffe ersetzt werden und in aller Regel nur wenige Nutzungszyklen möglich sind, erreicht das Ressourceneffizienzpotenzial von Kaskadennutzung nicht das Niveau etablierter Recyclingsysteme. Es kann diese jedoch ergänzen.

#### 4.2.4 Neue Werkstoffe

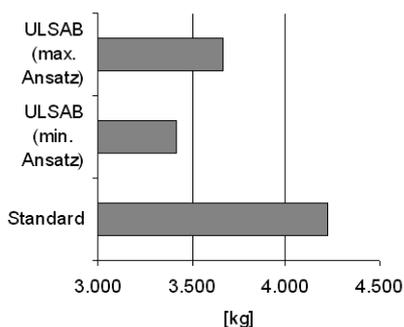
Werkstoffsubstitutionen können zu erheblichen Umweltentlastungen führen. Wie schon zuvor dargestellt, sind die Auswirkungen von Werkstoffsubstitutionen jedoch vielfältiger als es zunächst scheint, insbesondere wenn kreislauffähige Werkstoffe betroffen sind. Eine Ursache dafür ist, dass - wie in (Kapitel 3.2.2) dargestellt - Werkstoffe in einem erheblichen Maße in den Aufbau des Güterbestandes gehen und kurzfristig nicht als Sekundärrohstoff zur Verfügung stehen können (vgl. Ritthoff 2006). Damit bedeutet in Hinblick auf Recycling jede Substitution, dass ein neuer Werkstoffbestand aufgebaut werden muss und die Vorteile des Recyclings erst langsam zum Tragen kommen. Insofern stehen Werkstoffsubstitution und Recycling in einem „Wettbewerb“ um Ressourceneffizienz und Umweltschonung.

Dennoch besteht in der Entwicklung neuer Werkstoffe ein erhebliches Ressourceneffizienzpotenzial. Neue Werkstoffe z. B. Verbundwerkstoffe forcieren den Leichtbau. Sie können den Verschleißschutz deutlich verbessern, etwa dadurch dass die Einsatzgebiete hochverschleißfester technischer Keramik erweitert oder ihre Eigenschaften weiter verbessert werden. Das konnte insbesondere bei Hochtemperaturanwendungen in Industrieöfen aber auch im Motorenbau erfolgreich praktiziert werden. Keramische Werkstoffe haben in der Hochtemperaturtechnik eine lange Tradition. Die moderne Verfahrenstechnik fordert jedoch korrosions- und verschleißfeste Werkstoffe für immer höhere Einsatztemperaturen, um den Wirkungsgrad der Prozesse zu verbessern und Energie einzusparen.

Neue Werkstoffe bedeuten dabei nicht zwangsläufig völlig neue Werkstoffgruppen. Erhebliches Potenzial besteht z. B. in der Weiterentwicklung bekannter Werkstoffe, etwa in der Entwicklung neuer Stahllegierungen. Mit dem Einsatz hoch- und höchstfester Stahlsorten kann einerseits die benötigte Stahlmenge reduziert, andererseits jedoch auch die Leistungsfähigkeit von Bauten und Anlagen gesteigert (Tragfähigkeit von Brücken, Auslegern etc., Beschleunigung von Geräten z. B. Roboterarme) oder aufgrund des verringerten Gewichts der Energieverbrauch beweglicher Stahlerzeugnisse reduziert werden (Fahrzeuge, bewegliche Anlagenteile). Hoch- und höchstfeste Stahlsorten können bei einzelnen Bauteilen im Automobilbau Gewichtsreduktionen von bis zu 40 % ermöglichen (Velikonja 2004). Ein prominentes Beispiel für den Einsatz von höherwertigen Stahlsorten, wie für einen systemischen Ansatz, ist das ULSAB-Konzept (ULSAB-AVC Konsortium 2001) zur Optimierung von Stahlkarosserien. Die Vorteilhaftigkeit dieser Maßnahmen im Hinblick auf den Ressourcenverbrauch konnte exemplarisch bereits belegt werden. Im Rahmen des Projekts „Der Werkstoff Stahl im Vergleich zu Konkurrenzwerkstoffen – Verfahren, Ressourceneffizienz, Recycling, Umwelt“ (Herzog et al. 2003) wurde eine traditionelle Stahlkarosserie mit einer Leichtgewichtskarosserie verglichen (vgl. Abbildung 7). Dabei konnten auch aus dem Blickwinkel des Ressourcenverbrauchs deutliche Vorteile beobachtet werden. Zum einen werden bereits in der Herstellung aufgrund des verringerten Materialbedarfs Ressourcen eingespart, zum anderen ist auch die Nutzung mit einem verringerten Energieauf-

wand und damit Ressourcenaufwand verbunden. Eine wichtige Rolle bei diesen Konzepten spielen sowohl hochfeste Stähle als auch Fügeverfahren (etwa Laserschweißen) und neue Formgebungsverfahren (etwa das Innenhochdruckformen). Hierbei können gegenläufige Effekte auftreten. Ein erhöhter Fügeaufwand kann etwa einen reduzierten Materialeinsatz kompensieren.

Abb. 7: Abiotischer Materialverbrauch bei der Herstellung unterschiedlicher Karosserien.



Quelle: Herzog et al. 2003

(ULSAB = ultraleichte Stahlkarosserie untere und obere Abschätzung ;  
Standard = herkömmliche Stahlkarosserie)

Ein anderes Beispiel sind Krane. Durch den Einsatz hochfester Stahlsorten kann bei gleicher Festigkeit ihr Gewicht reduziert werden. Umgekehrt stieg bei unverändertem Gesamtgewicht und unveränderter Bodenbelastung damit die mögliche Traglast bzw. ihr Anteil an der Gesamtlast. Damit kann die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit erhöht werden (Floßdorf 2003). Der Effekt geht hierbei daher deutlich über eine reine Materialeinsparung hinaus.

Im Bereich von Getränkeverpackungen konnte durch die Möglichkeit, dünnere Bleche zu walzen, das Dosengewicht kontinuierlich reduziert werden. Für Dosen aus Weißblech bedeutete dies eine Verringerung des Gewichts für die 0,33 l-Dose von 1974 bis heute von 38 g auf 22 g (Metallverpackungen 2006).

Auch im Baubereich lassen sich durch den Einsatz weiterentwickelter Baustoffe erheblich Ressourcen sparen. An einigen Beispielen konnte gezeigt werden, dass der Einsatz höherfester mikrolegierter Stahlsorten, zu einer deutlich reduzierten Stahleinsatzmenge bei Brücken geführt hat. Bei der Öresundbrücke konnte so durch den Einsatz von 82.000 t mikrolegierter Stähle die benötigte Stahlmenge um 15.000 t reduziert werden (Bleck 2007). Das entspricht bezogen auf die ursprünglich benötigte Stahlmenge einer Einsparung von über 15 %.

Die Anzahl neu gebauter Brücken ist relativ gering, wenn man jedoch davon ausgeht, dass dieses Beispiel die Größenordnung des Einsparpotenzials im Bereich des Stahlbaus angibt, dann ergeben sich bei einer Einsatzmenge von ca. 2,9 Mio. t Stahl im Stahlbau (stahl-online 2007), Einsparpotenziale von etwa 400.000 t Stahl pro Jahr.

Die Entwicklung neuer Werkstoffe ist eng verknüpft mit einer zielgerichteten Werkstoffauswahl. Weitere Beispiele finden sich daher im folgenden Kapitel.

#### 4.2.5 Werkstoffauswahl

Die Werkstoffauswahl hat in vielen Fällen einen großen Einfluss auf die Ressourceneffizienz von Produkten. Werkstoffauswahl erfolgt nicht zufällig. Eine aus werkstoffkundlicher Sicht gute Werkstoffauswahl ist die erste Voraussetzung für Ressourceneffizienz, da nur so eine hohe Lebensdauer und korrekte Funktion gewährleistet werden kann. Daher ist die Anzahl von Werkstoffalternativen oft gering oder erfordert ein komplettes Neudesign von Produkten. Die Bedeutung der Werkstoffauswahl zwischen neuen und alten Werkstoffen lässt sich an einigen Beispielen verdeutlichen: Fahrradrahmen können aus unterschiedlichen Werkstoffen hergestellt werden. Lange Zeit war Stahl in unterschiedlichen Qualitäten dominierend. Inzwischen wird überwiegend Aluminium eingesetzt, ein dritter Werkstoff, Kohlefaserverstärkter Kunststoff (CFK), kommt nur bei sehr hochwertigen Fahrradrahmen für den Renneinsatz zur Anwendung. Mit diesen drei Werkstoffen lassen sich vergleichbare Fahrradrahmen bauen, die sich jedoch deutlich in Hinblick auf ihren Ressourcenverbrauch unterscheiden. Wie Tabelle 10 zeigt, unterscheiden sich die drei untersuchten Lösungen für Fahrradrahmen hinsichtlich ihres Rahmengewichts und der Menge an eingesetzten Materialien der Stahlrahmen ist am schwersten. Deutlich anders verhält es sich jedoch mit dem Ressourcenverbrauch. Der Stahlrahmen ist hier am ressourceneffizientesten.

Tab. 10: Gegenüberstellung der Massen für die drei Fahrradrahmen.

	Stahl-Rahmen	Aluminium-Rahmen	CFK-Rahmen
Gewicht des eingesetzten Materials	1,777 kg	1,244 kg	1,323 kg
davon Verschnitt	0,146 kg	0,157 kg	0,404 kg
davon Rahmengewicht	1,631 kg	1,087 kg	0,919 kg
Ressourcenverbrauch (abiotisches Material)	25,000 kg	56,000 kg	49,000 kg

Quelle: Herzog et al. 2003

In einem ähnlichen Beispiel wurden Roboterarme untersucht (Stiller 1998). Hierbei wurden Varianten aus Stahl und Verbundwerkstoffen (CFK) betrachtet. Auch hier zeigt der deutlich leichtere Roboterarm aus Verbundwerkstoffen einen signifikant höheren Ressourcenverbrauch (vgl. Tabelle 11). Damit wird deutlich, dass Leichtbau alleine noch kein hinreichendes Kriterium für Ressourceneffizienz ist.

Tab. 11: Werkstoffbedarf und Ressourcenverbrauch für einen Roboterarm

	Verbundwerkstoffversion	Stahlversion
Werkstoffbedarf	4,8 kg	12,8 kg
Ressourcenverbrauch (abiotisches Material)	163,0 kg	76,0 kg

Quelle: Stiller 1998

Damit ist dieses Beispiel aber noch nicht umfassend beschrieben. Durch einen Austausch des Stahlarms durch einen Verbundwerkstoffarm verändert sich auch die Leistungsfähigkeit des Roboters. Durch das geringere Gewicht der Verbundwerkstoffversion kann diese mit der gleichen Antriebsleistung schneller beschleunigt werden und damit der Durchsatz und die Leistungsfähigkeit erhöht werden. Im günstigsten Fall verdoppelt sich die Leistung. In diesem Fall kann die Ressourceneffizienz der Verbundwerkstoffvariante deutlich über der Stahlvariante liegen, da bei einer vollständigen Betrachtung nicht nur die Roboterarme betrachtet werden müssen, sondern die kompletten Roboter, dessen Leistung alleine durch den Verbundwerkstoffarm maximal verdoppelt werden kann.

Dieses Beispiel zeigt daher zweierlei:

1. Leichtbau bedeutet nicht, dass der Ressourcenverbrauch verringert wird, im Gegenteil kommt es durch den Einsatz besonders hochwertiger Materialien häufig zu einer Erhöhung des Ressourcenverbrauchs.
2. Relativ kleine Änderungen an Anlagen können einen großen Einfluss auf die Ressourceneffizienz haben. Im vorliegenden Fall konnte durch den gezielten Einsatz eines sehr hochwertigen neuen Werkstoffs die Ressourceneffizienz wesentlich verbessert werden kann.

Der gezielte Einsatz neuer hochwertiger Werkstoffe ermöglicht so deutliche Erhöhungen der Ressourceneffizienz.

In Arbeitspaket 4 wurden Möglichkeiten zur Ressourceneinsparung bei Automobilen untersucht. Hierbei konnten grundsätzlich Potenziale durch Werkstoffauswahl identifiziert werden. Dabei bestand jedoch eine klare Abhängigkeit vom Anteil an eingesetzten Sekundärrohstoffen. Nur für den Fall eines hohen Anteils an Sekundärmaterial konnte für die Substitution von Stahl durch Aluminium lebenszyklusweit ein Potenzial ermittelt werden (AP 4, van de Sand et al. 2007).

#### 4.2.6 Fazit: Werkstoffe

Die Herstellung vieler Massenwerkstoffe wurde über lange Zeiträume weitgehend optimiert und ihre Ressourceneffizienz deutlich gesteigert. Weitere Optimierungen sind daher oftmals nur noch mit hohem Aufwand und geringem Erfolg möglich. Bei neueren Werkstoffen bestehen jedoch vielfach noch erhebliche Optimierungsmöglichkeiten. Eine wichtige Rolle kann dabei das Recycling spielen. In den Fällen, in denen Recycling ökonomisch und ökologisch besonders lohnend ist, ist es oftmals schon lange etabliert. Hier kommt es darauf an, diese Kreisläufe weiter zu etablieren und zugleich für neue Werkstoffe Recyclingkonzepte oder Konzepte der Kaskadennutzung zu entwickeln. Kaskadennutzung kann in Fällen schlechter Eignung für Recyclingkreisläufe eine ressourcenschonende Alternative sein.

Die Auswahl der Werkstoffe hat einen wesentlichen Einfluss auf den Ressourcenverbrauch von Gütern. Einerseits durch den mit ihrer Herstellung, Entsorgung und Wiederverwendung verbundenen Ressourcenverbrauch, andererseits durch die mit diesen Werkstoffen verbundenen Gestaltungs- und Konstruktionsmöglichkeiten.

Eine bedeutende Rolle spielen dabei insbesondere auch neue Werkstoffe. Ihr gezielter Einsatz kann vielfach erhebliche Potenziale erschließen. Hierbei gibt es einen stufenlosen Übergang hin zu maßgeschneiderten Werkstoffen, die in ihrer speziellen Anwendung erhebliche Potenziale eröffnen können. Bekannte Beispiele stammen aus dem Automobilbau, wo durch den Einsatz neuer Stahlsorten das Gewicht einer Stahlkarosserie um 25 % gesenkt werden kann. Ein wesentlicher Schlüssel ist hierbei die werkstoffgerechte Konstruktion, z. B. die Auswahl der Werkstoffe nach den auftretenden Lastfällen oder die kraftflussgerechte Gestaltung von Bauteilen.

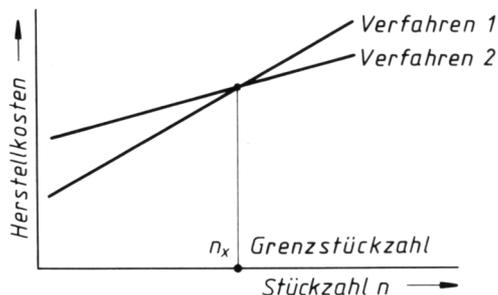
Die Einflussmöglichkeiten auf die Ressourceneffizienz im Bereich Werkstoffe werden daher wie folgt eingeschätzt:

- Erzeugung von Werkstoffen: gering bis mittel,
- Recycling: gering bis hoch,
- Kaskadennutzung: gering bis mittel,
- Neue Werkstoffe: mittel bis hoch,
- Werkstoffauswahl: mittel bis hoch,
- Werkstoffgerechte Konstruktion: hoch.

### 4.3 Produktion und Fertigung

Produktions- und Fertigungsverfahren haben einen sehr großen Einfluss auf die Ressourceneffizienz der Herstellung von Gütern. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass es weder aus Kostensicht noch aus Sicht der Ressourceneffizienz grundsätzlich geeignete oder ungeeignete Fertigungsverfahren gibt. Die bestmögliche Auswahl hängt z. B. stets von den zu fertigenden Mengen ab (vgl. Abbildung 8).

Abb. 8: Wahl des Fertigungsverfahrens auf der Basis der Herstellungskosten in Abhängigkeit von der Stückzahl



Quelle: Matek 1987

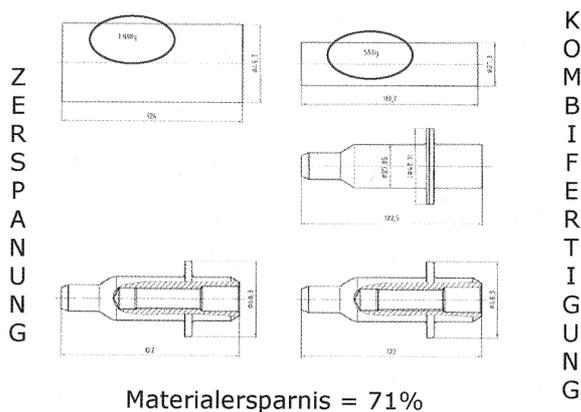
Dies macht eine allgemeine quantitative Abschätzung eines technologischen Potenzials unmöglich. Eine Auswahl des ressourceneffizientesten Verfahrens muss immer in Zusammenhang mit den weiteren Rahmenbedingungen erfolgen. Bei Groß- oder Kleinserien können sich unterschiedliche Produktionsverfahren als ressourceneffizienter erweisen. Anlagen können ausgelastet sein oder nicht. Diese Informationen sind also schon in der Produktgestaltung und der Konstruktion von großer Bedeutung. Dies umfasst die Notwendigkeit, eine große Anzahl von Fertigungsverfahren (Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten, Stoffeigenschaften ändern [vgl. DIN 8580]) im Zusammenhang mit ihren Werkstoffen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Ressourcenverbrauch in Abhängigkeit von konstruktiven Lösungen und Produktionsmengen zu beurteilen. Die Komplexität dieser Aufgabe und die dominierende Fokussierung auf wenige Werkstoffe lässt hier ein großes Potenzial vermuten. Eine optimierte Kombination unterschiedlicher Werkstoffe etwa Metalle, Kunststoffe oder Keramik ist aus vielfältigen Gründen (z. B. verarbeitende Betriebe, vorhandene Infrastruktur, Fachexperten eines Werkstoffes etc.) häufig in der Praxis nicht möglich, würde jedoch bedeutende Einsparpotenziale eröffnen.

Ein Beispiel ist die Fertigung eines Stahlkonstruktionselements: Bei Großserienfertigung könnte z. B. die Fertigung als Gussteil am ressourcen- und kosteneffizientesten sein (hoher Aufwand für die Formen, aber geringer Verschnitt, wenig spanende Bearbeitung), wohingegen bei einer Kleinserie ein geschweißtes Teil vorteilhafter sein kann (keine Form notwendig, hoher Energieaufwand für das Schweißen, höherer Verschnitt,

aber weniger Maschineninfrastruktur notwendig). Mit der Auswahl von Fertigungsverfahren lassen sich daher gezielt Optimierungen durchführen, z. B. den Verschnitt reduzieren oder den Aufwand für die Nachbearbeitung vermindern. Grundsätzlich gilt jedoch, dass stets der gesamte Ressourcenaufwand berücksichtigt werden muss.

Die Anwendung der geeignetsten Fertigungsverfahren kann, bei vorhandener Technologie, beträchtlich zur Materialeinsparung beitragen. Dies zeigt etwa das Beispiel eines Achszapfens (vgl. Abbildung 9). Hier bestehen unterschiedliche Möglichkeiten der Fertigung. Typisch wäre eine Formgebung durch Spanen. Durch eine Kombination von Fertigungsverfahren aus dem Bereich Umformen (Kaltstauen und Fließpressen) und Trennen (vgl. Abbildung 9) konnte der Materialaufwand in einem Beispiel um 71 % reduziert werden bei über 20 % Kostenersparnis. Bei weiteren Beispielen konnten Materialeinsparungen von über 50 % realisiert werden, wobei teilweise auch Kostenersparnisse von über 50 % erreicht wurden. Eine Übertragung dieser Potenziale ist jedoch nicht auf jeden technisch ähnlich gelagerten Anwendungsfall möglich, da die hohen Werkzeugkosten bei der Kaltumformung diese Verfahren vor allem für die Massenfertigung geeignet erscheinen lassen (Jende/Baumgarten 2007).

Abb. 9: Materialersparnis durch Wahl von Fertigungsverfahren



Quelle: Jende/Baumgarten 2007

Dieses Beispiel zeigt, dass die Auswahl von Fertigungsverfahren und ihre Kombination mit einem hohen Ressourceneffizienzpotenzial verbunden sein kann.

Von den Fertigungsverfahren sind einige besonders anfällig für hohen Ressourcen- und Energieverbrauch. Sehr hoch ist der Energieverbrauch beim Trennen, d. H. z. B. bei spanender Bearbeitung wie Drehen, Bohren oder der Oberflächenbearbeitung durch Schleifen und ähnliche Verfahren. Zugleich führen diese Verfahren grundsätzlich zu einem Materialverlust. Ihr Ressourcenaufwand ist daher zweifach hoch. Wesentlich günstiger als trennende Verfahren ist in aller Regel die Umformung (z. B. Schmieden, Stauchen, Biegen). Zwar hat man auch hier einen erheblichen Energieaufwand, in aller Regel ist er aber geringer als der einer aufwendigen spanenden Bearbeitung. Zugleich kommt es beim Umformen zu keinen oder nur geringen Materialverlusten.

Ganz ähnlich kann es sich mit Fügeverfahren verhalten. Auch sie stehen vielfach in Konkurrenz zu Trennverfahren. Durch das Fügen von mehreren Einzelteilen kann u. U. der Energie und Ressourcenaufwand gegenüber einer Fertigung aus einem größeren Vorprodukt deutlich verringert werden. Zugleich gibt es bei Fügeverfahren selber erhebliche Unterschiede hinsichtlich ihrer Energie- und Ressourceneffizienz. So gibt es etwa beträchtliche Unterschiede zwischen unterschiedlichen Schweißverfahren, aber auch innerhalb einer Gruppe von Schweißverfahren (vgl. Tabelle 12).

Tab. 12: Kennzahlen von Lasern zum Laserschweißen

	CO2-Laser	Nd-YAG-Laser	Diodenlaser
max. Leistung	bis 20 kW	bis 4 kW	bis 3.5 kW
Wirkungsgrad (elektr.- optisch)	10 %	<3 % bis >10 %	35 % bis 50 %

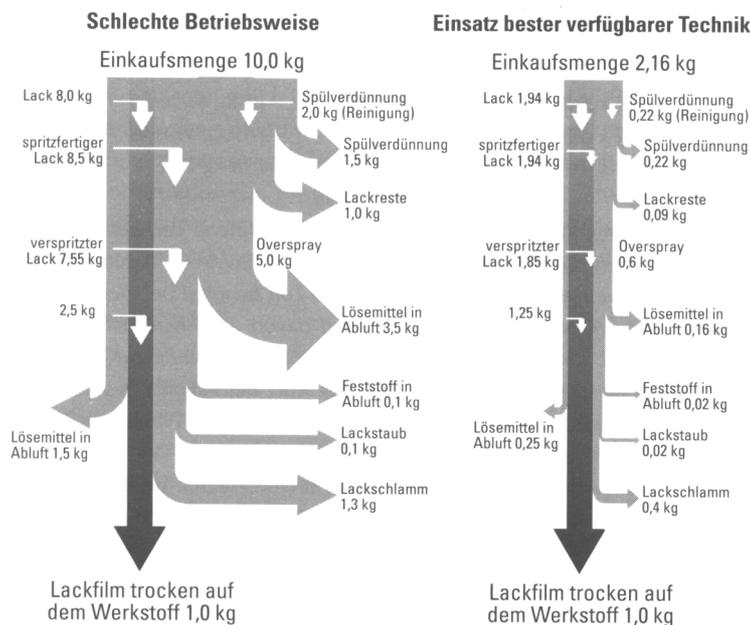
Quelle: Holthaus 2001

In vielen Fällen kann aber durch den Einsatz moderner Klebstoffe ganz auf ein energieaufwendiges Schweißen verzichtet und so Ressourcen gespart werden.

Beschichtungen sind eine Möglichkeit die Eigenschaften von Bauteilen und Produkten wesentlich zu verändern, ohne die Auswahl des Grundwerkstoffes ändern zu müssen. Am verbreitetsten sind Maßnahmen des Korrosionsschutzes. Hier kommen z. B. Lacke oder Pulverbeschichtungen zur Anwendung, aber auch metallische Überzüge aus Zink, Zinn, Nickel oder Chrom. Solche Beschichtungen haben nicht nur einen Einfluss auf das Korrosionsverhalten, sondern auch auf das Recycling, da insbesondere metallische Beschichtungen störend für das Metallrecycling sein können. Es gilt hier also auszuwählen zwischen den unterschiedlichen Ansprüchen in Hinblick auf Eigenschaftsverbesserung und Wiederverwertbarkeit.

Es gibt jedoch auch erhebliche Unterschiede hinsichtlich der Ressourceneffizienz der Erzeugung von Beschichtungen. So kann in vielen Fällen durch Einsatz einer Pulverbeschichtung anstelle einer Lackierung nicht nur auf einen Lösemiteleinsatz verzichtet, sondern auch der Materialeinsatz drastisch reduziert werden. Wesentlicher Vorteil einer Pulverbeschichtung aus Sicht der Ressourceneffizienz ist, dass kein Overspray anfällt (vgl. Abbildung 10). Obwohl Pulverbeschichtungen inzwischen Stand der Technik sind, werden sie in vielen Fällen noch nicht eingesetzt.

Abb. 10: Stofffluss durch eine Lackieranlage. Bei bester verfügbarer Technik (Pulverbeschichtung) kann der Materialeinsatz drastisch reduziert werden.



Quelle: Schnitzer nach Schmidt-Bleek/Tischner 1995

### Fazit: Produktion und Fertigung

Die Wahl von Fertigungsverfahren hat einen erheblichen Einfluss auf die Ressourceneffizienz bei der Herstellung von Produkten. Sie hängt jedoch von zahlreichen Aspekten ab. Die Entscheidung, welche Fertigungsverfahren aus Sicht von Ressourceneffizienz am günstigsten sind, hängt auch wesentlich von den Produktionsmengen, den vorhandenen Anlagen und Maschinen oder der Erfahrung der Konstrukteure und Designer ab.

Aufgrund der hohen Komplexität der Auswahl von Fertigungsverfahren und dem zugleich vorhandenen Zusammenhang zur Auswahl von Werkstoffen kann insgesamt von einem hohen Ressourceneffizienzpotenzial durch die Auswahl von Fertigungsverfahren ausgegangen werden.

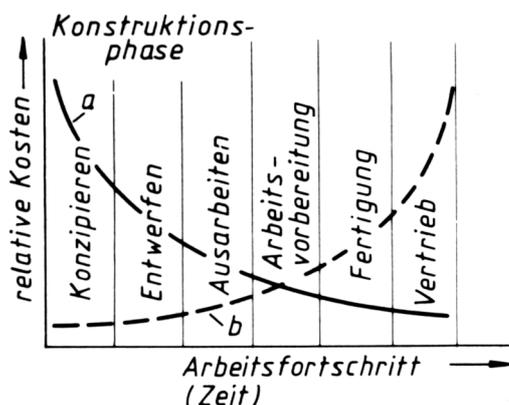
Die Einflussmöglichkeiten auf die Ressourceneffizienz durch eine gezielte Auswahl von Fertigungsverfahren werden daher wie folgt eingeschätzt:

- Fertigungsverfahren bei Massenfertigung: hoch, teilweise sehr hoch,
- Fertigungsverfahren bei Einzelfertigung: mittel.

### 4.3.1 Produktdesign

Ressourceneffizienzpotenziale gibt es an ganz unterschiedlichen Stellen in der Entwicklung, Herstellung und Nutzung von Gütern. Insgesamt lässt sich festhalten, dass in der Entwicklungsphase die größten Einflussmöglichkeiten auf den Ressourcenverbrauch (und die Produktkosten) bestehen (vgl. auch Schmidt-Bleek/Tischner 1995). Ist einmal über das Design eines Produktes, die Art seiner Produktion und Nutzung sowie Optionen für die spätere Entsorgung entschieden, wird in Produktionsinfrastruktur, Rohstoffe und Betriebsmittel investiert. So entstehen Pfadabhängigkeiten, die fortan nur noch kleinere Anpassungen zulassen. Wie hoch beispielsweise der Energieverbrauch eines Fahrzeugs ist, wird nicht nur vom Wirkungsgrad des Motors bestimmt, sondern eben auch vom gewünschten Beschleunigungsvermögen, Geschwindigkeit, Transportvolumen, passiver Sicherheit, Klimatisierung und Aerodynamik, um nur eine Auswahl zu nennen. Im Maschinenbau wird allgemein davon ausgegangen, dass die Entwicklungsphase den höchsten Einfluss auf die Produktkosten hat. Die Beeinflussungsmöglichkeiten in den nachfolgenden Schritten nehmen kontinuierlich ab. Man kann dort zwar immer noch vieles vereinfachen und optimieren, jedoch zu Beginn gemachte Fehler nicht mehr kompensieren. Das macht Abbildung 11 deutlich. Die Möglichkeiten zur Kostenbeeinflussung sind in den frühen Produktphasen am größten, das gilt ganz entsprechend auch für den Ressourcenverbrauch und die Umweltverträglichkeit.

Abb. 11: Möglichkeit der Kostenbeeinflussung, Kurve a: mögliche Kostensenkungen, Kurve b: Kostenaufwand für Änderungen



Quelle: Matek 1987

Wer jedoch abschätzen möchte, wo welche Ressourceneffizienzpotenziale in der Produktgestaltung vorhanden sind, steht vor einem Dilemma: Für verfahrenstechnische Prozesse gibt es häufig exakt bestimmbare Potenziale. Die theoretisch minimalen Einsatzmengen für Rohstoffe und Energie zur Herstellung eines Werkstoffs sind berechenbar. Davon kann ein theoretisches Potenzial abgeleitet werden. Ganz ähnlich

kann man bestimmen, wie groß die auftretenden Verschnittmengen und Verluste sind, das theoretische Potenzial ist auch dort klar bestimmbar. Für die Produktgestaltung gibt es diese Möglichkeit jedoch nicht.

Eine Erschließung dieser Ressourceneinsparpotenziale kann jedoch durch Anwendung von Prinzipien der Produktgestaltung erfolgen. Anstatt wie bisher nur die Aspekte Kosten, Fertigungsqualität, Mengen im Blick zu haben, kommt beim ökologischen Produktdesign als weiterer Punkt die Umweltverträglichkeit bzw. der Ressourcenverbrauch hinzu (vgl. Schmidt-Bleek/Tischner 1995 und Schmidt-Bleek 2004).

Ökologisches Produktdesign umfasst die folgenden Schritte:

- Detaillierte Beschreibung des Dienstleistungsbündels,
- Suche nach möglichst weitgehend entmaterialisierten Lösungen,
- Berücksichtigung von Kaskadennutzungsoptionen,
- Berücksichtigung von Entsorgung/Recycling,
- Konzeption, Planung, Entwurf,
- Erste Bewertung der Ergebnisse,
- Auswahl der „am besten“ erscheinenden Lösung,
- Vergleich der „besten“ Lösung mit gängigen Marktprodukten,
- Prüfung der Herstellbarkeit sowie des Preises der gefundenen Lösung,
- Notwendig erscheinende Anpassungen
- Realisierung.

Daneben bietet es sich häufig an, Innovationsinstrumente und Expertenteams (Designer, Anlagenbauer, Werkstoff- und Technologieexperten etc.) zu nutzen, um althergebrachte Denkweisen und damit verbundene Lösungswege zu durchbrechen (vgl. Bierter, Innovationsradar: <http://www.innovations-radar.com/>; Ökodesign-Tool unter [www.holzwende2020.de](http://www.holzwende2020.de)).

Ein einfaches Beispiel für Einsparpotenziale durch Produktgestaltung sind die in Abbildung 12 dargestellten Verbindungen von Rohren. Durch eine neue Steckverbindung für Rohrleitungen in der Brunnentechnik gelang es, 20-30 % Rohrmaterial und bis zu 80 % Energie einzusparen (Stahl-Informations-Zentrum 2006).

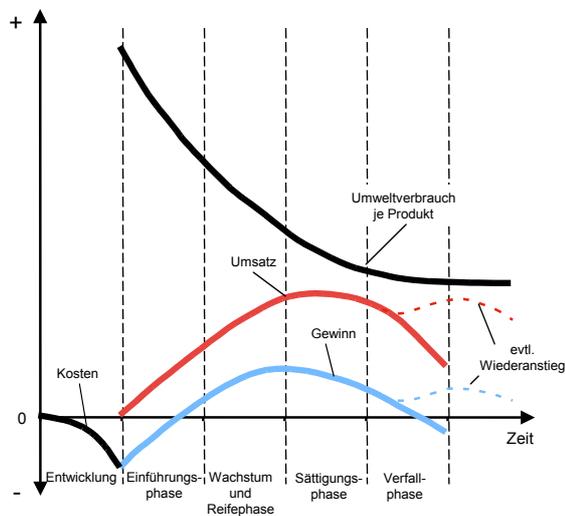
Abb. 12: Rohrverbindung für Brunnenrohre, Fa. Beckert Brunnentechnik



Quelle: Stahl-Informations-Zentrum 2006

In vielen Fällen gibt es jedoch bereits gut funktionierende und etablierte Produkte. Vielfach ist es dann aus Umwelt- und Ressourcensicht günstiger, diese weiterzuentwickeln und nicht von Grund auf neu zu konstruieren. Dies wird an Abbildung 13 veranschaulicht. Dargestellt sind schematisch Kosten, Umsatz und Gewinn über den Lebenszyklus, d. H. die Produktionsdauer eines Produktes. Der Umwelt- ebenso wie der Ressourcenverbrauch nimmt in aller Regel kontinuierlich, jedoch immer langsamer ab. Die Phasen des höchsten Gewinns und des geringsten Umweltverbrauchs fallen in aller Regel nicht zusammen. Aus Umweltsicht sind insbesondere die Sättigungs- und Verfallsphase vorteilhaft, da die Produkte in diesen Phasen ausentwickelt und optimiert sind. Kann das Produkt jedoch weiterentwickelt werden, können Umsatz und Gewinn wieder gesteigert und bei geringem Ressourcenverbrauch hohe Umsätze und Gewinne erzielt werden. Daher ist aus Sicht der Ressourcenschonung einer Weiterentwicklung häufig der Vorzug vor einer grundsätzlichen Neuentwicklung zu geben. Wird dies berücksichtigt, können beim Redesign erhebliche Effizienzsteigerungen erreicht werden.

Abb. 13: Entwicklung von Kosten, Umsatz, Gewinn und Umweltverbrauch über den Lebenszyklus eines Produktes



Quelle: Eigene Darstellung, geändert und erweitert nach Pahl / Beitz 1993 und Czichos 1996

In einigen Fällen sind durch ein komplettes Neudesign größere Potenziale erschließbar, hierbei muss aber auch die Integration in ein bestehendes Umfeld berücksichtigt werden. Grundlegende Änderungen können einen ergänzenden Anpassungsbedarf erzeugen, der positiv sein kann, jedoch nicht sein muss. Vielfach gibt es für grundsätzliche Änderungen „Windows of Opportunity“, in denen etwa bei anstehenden Neu- oder Ersatzinvestitionen Umstellungen möglich sind.

Tabelle 13 zeigt Effizienzfaktoren, die durch Redesign in finnischen Unternehmen erreicht wurden. Hier sind bereits Faktoren bis zu sechs zur Steigerung der Ressourceneffizienz zu verzeichnen, wobei nicht immer der komplette Lebensweg betrachtet wurde. Die aufgeführten Effizienzsteigerungen würden bei einer lebenszyklusweiten Betrachtung teilweise geringer ausfallen. So wird z. B. bei der Display Beleuchtung nur die Nutzung nicht jedoch die Herstellung berücksichtigt, gleiches gilt für die Damenblusen. Lebenszyklusweit betrachtet würden die Effizienzfaktoren geringer ausfallen.

Tab. 13: Effizienzfaktoren durch Redesign in finnischen Unternehmen

Unternehmen	Ausgangs Produkt	Entwickeltes Produkt	
Virke Oy	Damenbluse, Polyester / Baumwolle	Damenbluse, Polyester / Viskose	1,7
Mitron Oy	Display, Beleuchtung mit Leuchtstofflampe	Display, Beleuchtung mit LED	6
Finton Oy	Betonbalkon	Stahlbalkon	3
Primalco Oy	Weinverpackung, Einwegflaschen	Weinverpackung, Mehrwegflaschen	1,9

Quelle: Autio / Lettenmeier 2002

Die mögliche Größe von Einsparpotenzialen durch Produktgestaltung wird auch in Arbeitspaket 4 anhand unterschiedlicher Automobilkonzepte dargestellt. Während der Einfluss der Werkstoffauswahl zwar erkennbar, jedoch nicht sehr groß war, zeigten unterschiedliche Automobilkonzepte sehr erhebliche Unterschiede (van de Sand et al. 2007).

#### 4.3.2 Dienstleistungsorientierung

Vielfach lassen sich Abläufe unterschiedlich organisieren, dies gilt z. B. für die Erledigung von Bankgeschäften. In einer Studie wurde das Onlinebanking mit den traditionellen Bankgeschäften verglichen. Das heißt, es wurden zwei Möglichkeiten verglichen, mit denen eine bestimmte (Dienst)Leistung, die Durchführung einer Überweisung, auf ganz unterschiedliche Weise erfolgen konnten. Dabei zeigte sich, dass der Ressourcenverbrauch für eine Überweisung per Onlinebanking mit rund 1 kg abiotischer Ressourcen deutlich geringer ist, als der Ressourcenaufwand für eine traditionelle Überweisung mit 2,76 kg abiotischer Ressourcen. Dieses Reduktionspotenzial von über 60 % wird vor allem durch einen reduzierten Raumbedarf und verbunden damit, einen verringerten Energiebedarf verursacht. Eine weitere wichtige Rolle spielte die Frage, wie die Kunden bisher die Bank erreicht haben: Führen sie mit dem Auto, konnte dies leicht die gesamte Betrachtung dominieren (Türk et al. 2003; Geibler et al. 2002). Damit sind zugleich die Gründe aufgeführt, weshalb das Ergebnis für Telearbeit keineswegs so eindeutig ausfällt. Insbesondere bei alternierender Telearbeit, d. H. bei teilweiser Anwesenheit am betrieblichen wie am heimischen Arbeitsplatz, steigt der Bedarf an Bürofläche, da sowohl ein betrieblicher Arbeitsplatz als auch ein Home-Office verfügbar sein muss. Verbunden ist dies mit einem erhöhten Ressourcenaufwand für Bau und Beheizung der Bürofläche. Hinzu kommt in aller Regel ein erhöhter Bedarf an IT-Infrastruktur. Diese beiden Effekte können die erwartete Verringerung der Verkehrsleistung, und die damit verbundene Verringerung der Ressourcenverbräuche, kompensieren oder überkompensieren, vor allen Dingen dann, wenn die Entfernung zur Arbeitsstätte ansteigt und so zwar die Anzahl der Fahrten reduziert wird, nicht

jedoch die auf einen Zeitraum bezogen zurückgelegten Kilometer. Hohe Entfernungen zwischen Arbeitsort und Wohnort sind gerade einer der Gründe für Telearbeit, die Gefahr eines solchen Reboundeffekts ist daher real. Je nach Ausgestaltung der Telearbeit konnte daher ein Ressourceneffizienzpotenzial zwischen ca. 55 % Minderverbrauch und 10 % Mehrverbrauch abgeschätzt werden (Heimes 1999).

Grundsätzlich eröffnet eine Dienstleistungsorientierung, d. H. eine verstärkte Orientierung auf den Nutzen und die Nutzung von Gütern gegenüber dem Besitz von Gütern teils erhebliche Ressourceneffizienzpotenziale.

Dabei gibt es unterschiedliche Konzepte und Möglichkeiten, um durch Dienstleistungsorientierung zu einer Verringerung des Ressourcenverbrauchs beizutragen.

In der Literatur werden üblicherweise drei Idealtypen von ökologischen Dienstleistungskonzepten unterschieden (vgl. Hockerts 1995 / Hinterberger et al. 1998):

1. „Produktorientierte ökologische Dienstleistungen“ sind zusätzliche Leistungen, die vom Produzenten ergänzend zu einem Sachgut angeboten werden – entweder als selbstständige Dienstleistung oder als Instrument zur Förderung des Absatzes des Trägermediums (also des Sachgutes). Das können z. B. Wartungs- und Entsorgungsleistungen (Rücknahmegarantien, Recyclingservice etc.) sein.
2. „Nutzungsorientierte ökologische Dienstleistungen“ haben nicht die Sachleistung (das Trägermedium) als Verkaufsgegenstand, sondern den dadurch vermittelten Nutzen. Beim Leasing nutzt der Nachfrager das Trägermedium für eine bestimmte Zeit, beim Sharing steht die gemeinsame Nutzung eines einzelnen Trägermediums im Mittelpunkt, beim Pooling geht es um den (gemeinsamen) Zugang mehrerer Nutzer zu mehreren Trägermedien.
3. „Bedürfnisorientierte ökologische Dienstleistungen“ vermitteln zwischen bestimmten Bedürfnisfeldern (z. B. Mobilität) und verschiedenen Alternativen zu deren Befriedigung. Für „Verbrauchsgüter“ wie Energie oder Wasser sind Contracting-Konzepte entwickelt worden. Dabei finanzieren die Anbieter rentable Einsparinvestitionen bei den Nachfragern, wobei die durch die Einsparung entstehenden Gewinne zwischen dem Verbraucher und dem Anbieter aufgeteilt werden. Für Gebrauchsgüter sind Facility-Management-Konzepte entwickelt worden. Hierbei wird den Nachfragern kein Trägermedium zur Nutzung überlassen, vielmehr betreibt der Anbieter dieses selbst, dem Nachfrager wird nur das Ergebnis der Leistung (z. B. Vervielfältigungsdienste, Dokumentgestaltung, etc.) verkauft. (Hinterberger et al. 1998).

Bei allen drei Konzepten gibt es Möglichkeiten zu Ressourceneinsparungen. Eine genaue Quantifizierung der Ressourceneffizienzpotenziale fällt jedoch aufgrund komplexer Wechselwirkungen oft schwer. Carsharing spart nicht unbedingt pro zurückgelegten Kilometer Ressourcen, es reduziert jedoch in aller Regel die zurückgelegten Kilometer und damit den Ressourcenverbrauch.

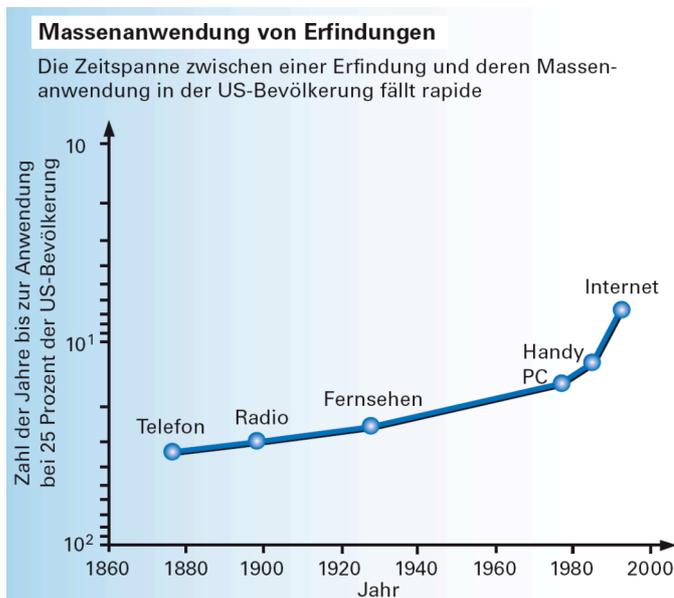
### 4.3.3 Innovationen und Innovationstempo

Innovationen sind Triebkräfte der ökonomischen Entwicklung und Grundlage unserer gegenwärtigen Gesellschaft. In den vorangegangenen Kapiteln konnte zudem gezeigt werden, dass Innovationen bei Werkstoffen, bei der Fertigung von Produkten, bei der Produktgestaltung oder bei der Schaffung innovativer Dienstleistungen ein erhebliches Potenzial zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs haben. Zugleich sind Innovationen jedoch auch Ursache negativer Veränderung. Bezüglich des Ressourcenverbrauchs ungerichtete Innovationen können in den folgenden Produktzyklen Ressourcenverbräuche antreiben, so haben viele Länder mit einer hohen Anzahl an Patenten auch hohe Ressourcenverbräuche (Schmidt-Bleek 2007):

Ein grundsätzliches Problem von Innovationen, mögliche Wachstums- oder Reboundeffekte, lassen sich am Beispiel der Mikroelektronik verdeutlichen. Mikroelektronik hat unbestritten zu zahlreichen Effizienzsteigerungen geführt. Viele komplexe Berechnungen oder Steuerungen wurden erst mit ihr möglich. Wesentlich sind insbesondere zwei Aspekte: Zum einen entwickelt sich die Mikroelektronik immer noch mit einer rasenden Geschwindigkeit, verbunden damit erhöht sich die Leistungsfähigkeit vieler Geräte sehr schnell (fünf Jahre alte Computer oder erst recht Digitalkameras sind z. B. nach heutigen Maßstäben völlig antiquiert). In der Informationstechnologie ist ein exponentielles Wachstum von Möglichkeiten zu verzeichnen. Gemessen an Preisleistungsverhältnis, Bandbreite, Speichervermögen wird die Leistung nahezu jährlich verdoppelt. Das entspricht einem Faktor von 1000 in 10 Jahren und von einer Million in 20 Jahren (Kurzweil 2006). Zum andern steigt die Zahl der Massenanwendungen stetig und trägt ebenfalls zum Wachstum des Ressourcenverbrauchs bei. Sehr deutlich wird dies etwa in der abnehmenden Zeitspanne, mit der eine Marktdurchdringung neuer Produkte stattfindet (vgl. Abbildung 14).

In diesem Sinne können auch Strategien wie die Entwicklung eines „100 \$ Laptop“ für Schüler in Schwellen- und Entwicklungsländern ([www.laptop.org](http://www.laptop.org)) neben einem positiven Effekt, dem Zugang zu Informationstechnologien, aus Sicht des Ressourcenverbrauchs auch deutlich negativ wirken.

Abb. 14: Anstieg der Massenanwendungen in den letzten Jahrzehnten (exemplarische Daten aus den USA)



Quelle: Kurzweil 2006

#### 4.3.4 Fazit: Produktion und Fertigung

Produktgestaltung hat einen außerordentlich hohen Einfluss auf die Ressourceneffizienz von Gütern. Die Gestaltung von Produkten beeinflusst die Auswahl von Werkstoffen und Fertigungsverfahren aber auch die Lebensdauer und Leistungsfähigkeit von Produkten. Daneben kann durch Produktgestaltung im weiteren, nicht ausschließlich materiellen Sinne auch eine Dienstleistungsorientierung ermöglicht werden, die vielfach weitere Ressourcen sparen kann.

Die Lebensdauer von Produkten und die Geschwindigkeit, mit der neue Produkte gestaltet werden und auf dem Markt kommen, hat ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf den Ressourcenverbrauch. Die zunehmende Anzahl neuer Produkte und die geringe reale Nutzungsdauer wirken dem Gedanken der Ressourcenschonung entgegen.

Die Einflussmöglichkeiten auf die Ressourceneffizienz durch eine gezielte Produktgestaltung werden daher wie folgt eingeschätzt:

- Produktgestaltung: hoch bis sehr hoch,
- Dienstleistungsorientierung: hoch bis sehr hoch,
- Innovationstempo: hoch, negative Effekte durch weitere Beschleunigung zu erwarten.

## 4.4 Querschnittstechnologien

Querschnittstechnologien sind vielfach Schlüssel für die Erschließung von Effizienzpotenzialen bei der Optimierung von Wertschöpfungsketten. Einen besonderen Vorteil ziehen diese Technologien aus ihrer breiten Anwendbarkeit und damit dem Umstand, dass Erfolge, die man in einer Anwendung erzielt hat, „relativ“ einfach auf andere Anwendungen übertragbar sind. Die vielfach genannten modernen, meist sehr breiten Technologiefelder wie Nanotechnologie, Biotechnologie, Bionik, Informations- und Kommunikationstechnologien haben dabei eine hohe Bedeutung und können durch eine grundsätzliche Um- und Neugestaltung von Produkten und Herstellungsverfahren den Ressourcenverbrauch drastisch reduzieren. Hier gibt es zahlreiche Schnittstellen zu den bereits besprochenen Bereichen der Werkstoffe und Produktgestaltung. Querschnittstechnologien sind jedoch oft zu vielfältig, als dass sich eindeutige Einschätzungen hinsichtlich ihres Einflusses auf die Ressourceneffizienz treffen lassen könnten.

Für einen systematischen Überblick besteht daneben das Problem, dass einige Technologien nicht leicht zuzuordnen sind. Der bekannte Lotuseffekt zeigt, wie schwierig die Zuordnung ist. Beim Lotuseffekt werden, typischerweise durch Nanopartikel, Oberflächen geschaffen, die das hydrophobe Verhalten und die „Selbstreinigung“ von Lotuspflanzen nachempfinden. Dieses Prinzip kann man daher sowohl der Bionik, als auch der Nanotechnologie oder auch einfach den Werkstoffwissenschaften zuordnen.

Eine Bewertung der möglichen Ressourceneffizienzpotenziale ist deshalb kaum möglich und verbleibt bei der Einzelfallbetrachtung. Im Folgenden wird versucht, die möglichen Potenziale an den viel diskutierten Beispielen neuer Querschnittstechnologien zu beschreiben.

### 4.4.1 Biotechnologie

Biotechnologie ist ein breites Technologiefeld. Zu unterscheiden sind zunächst die grundsätzlich unterschiedlichen Anwendungsbereiche.

Grüne Biotechnologie dient der Veränderung von Pflanzen zur Verbesserung oder zur Übertragung neuer Eigenschaften. Damit versucht die Grüne Biotechnologie gezielt Pflanzen zu verändern, um deren Eigenschaften an einen bestimmten Bedarf anzupassen. Bekannte Beispiele sind die Versuche, Pflanzen gegen Schädlinge, Krankheiten oder ungünstige Witterungsbedingungen resistent zu machen.

Grundsätzlich kann in der Grünen Biotechnologie damit ein erhebliches Ressourceneffizienzpotenzial stecken. Beachtet werden muss jedoch, dass insbesondere die Grüne Biotechnologie sehr kontrovers diskutiert wird und in Deutschland aufgrund zahlreicher Risiken kaum auf Akzeptanz stößt.

Bei der Roten Biotechnologie handelt es sich um die medizinische Anwendung der Biotechnologie. Sie konzentriert sich auf den Menschen und sucht Lösungen für medizinische Fragen und Probleme. Medizin war bisher nicht Gegenstand von Untersu-

chungen zur Ressourceneffizienz. Inwiefern hier die Anwendung der Roten Biotechnologie daher auch zur Ressourceneffizienz beitragen kann, ist unklar.

Die Weiße Biotechnologie nutzt biologische Mittel zur Optimierung industrieller Prozesse. Sie findet bei Industrieprozessen ihre Anwendung, bei denen lebende Zellen eingesetzt werden, um bestimmte Produkte im Industriemaßstab herzustellen. Ein Beispiel ist die Herstellung von Insulin durch transgene Bakterien anstelle der Gewinnung von Insulin aus den Bauchspeicheldrüsen von Schweinen. Andere Stoffe, die sich auf diese Weise häufig deutlich effizienter herstellen lassen, sind Antibiotika, Impfstoffe, Ethanol oder Stärke. Hierbei gelingt es häufig, schwierige und potenziell gefährliche Produktionsbedingungen mit hohen Temperaturen und Drücken zu vermeiden und so die Umweltverträglichkeit zu erhöhen und Energie- und Ressourcen einzusparen (vgl. z. B. Lippold 2007).

Damit birgt die Weiße Biotechnologie viele Chancen zu Ressourceneffizienz in sich (z. B. Katalysatoren, Biomining, Fermenter). Allerdings hat sich die Anwendung dieser Technologie in der Breite noch nicht durchgesetzt. Hier scheint ein erhebliches Forschungs- und Marktpotenzial für Ressourceneffizienz zu liegen.

Die Biotechnologie hat unbestritten ein erhebliches Potenzial zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Diese Potenziale gehen jedoch mit erheblichen Risiken und einer sehr kritischen öffentlichen Debatte einher. Umsetzbare Potenziale werden daher am ehesten im Bereich der Weißen Biotechnologie gesehen.

#### **4.4.2 Nanotechnologie**

Nanotechnologien gehören zu den großen Innovationsfeldern, mit denen man ein erhebliches Potenzial zur Umweltentlastung und Ressourcenschonung verbindet. Nanotechnologien sind außerordentlich vielfältig. Gemeinsames Merkmal ist, dass es grundsätzlich um den nanoskalaren Bereich geht. Ein großer Teil dieser Technologien ist dabei die Fortführung älterer Technologien, wobei neue Verfahren eingesetzt werden.

Schon länger bekannt ist der Vorteil mikro- oder nanoporöser Dämmstoffe. Da in diesen Systemen die mittlere freie Weglänge der Füllgase im Bereich des Porendurchmessers liegt, ist die Wärmeleitfähigkeit deutlich reduziert und unterschreitet die der ruhenden Luft. Typische Vertreter waren bisher vor allem Aerogele. Trotz nachgewiesener theoretischer Vorteile gegenüber anderen Dämmstoffen (Manstein et al. 1996) konnten sie sich nicht im größeren Maßstab durchsetzen. Die Entwicklung neuer Kunststoffschäume mit Porengrößen (BASF 2007) im Nanometerbereich könnte jedoch zu einer weiteren Durchdringung führen. Interessant dürfte die Anwendung vor allem bei Kühlgeräten sein. Bei vorgegebenen Einbaumaßen kann man nur durch veränderte Dämmstoffe den Wärmedurchgang verringern, will man nicht das Nutzvolumen reduzieren.

Ein anderer wichtiger Bereich ist etwa die Erzeugung feinsten Pulver. Die Beherrschung der Herstellung solcher Stoffe macht es z. B. möglich, verbesserte Additive für Kunststoffe herzustellen oder in Verbundwerkstoffen teils deutliche Festigkeitssteigerungen zu erzielen (Bayer 2007).

Bekannter als die vorgenannten Anwendungen ist Nanotechnologie im Bereich der Oberflächentechniken. Hier gibt es zahlreiche Anwendungen im Bereich Verschleißschutz oder Optik, aber auch das bekannte Beispiel des Lotuseffektes, der zu leicht zu reinigenden Oberflächen führt.

Nanotechnologien umfassen auch zahlreiche ältere Technologien. Im Bereich von Beschichtungen wurde schon länger im nanoskalaren Bereich gearbeitet, etwa bei der „Entspiegelung“ optischer Gläser. Das gilt aber genauso für andere Bereiche, etwa der Ausscheidungshärtung, wo die Ausscheidungen im nanoskalaren Bereich liegen können.

Auch im Bereich der Umwelttechnik kann Nanotechnologie zahlreiche Anwendungen erfahren. Durch den Einsatz von nanomaßstäbigen Katalysatoren kann teilweise eine hoch effektive Detoxifizierung von Abwässern erfolgen (UFZ 2007).

In vielen Anwendungsfällen der Nanotechnologie gelingt es kaum, ein mögliches Effizienzpotenzial einzuschätzen. Das liegt vor allem daran, dass durch nanotechnologische Verfahren die Produktqualität verbessert wird, jedoch nicht unbedingt Ressourcen eingespart werden. Die Ausnutzung des „selbstreinigenden“ Lotuseffektes durch Farben und Beschichtungen führt nicht unbedingt zu einer Einsparung, denn viele Flächen, etwa Fassaden, würden ohnehin nicht gesäubert. Viele Farbhersteller greifen darüber hinaus nach Tests wieder auf alte Pigmente zurück.

Problematisch für Nanotechnologien ist die immer noch sehr bruchstückhafte Erkenntnis über ihre Risiken. Eine Anwendung sollte daher bevorzugt dort erfolgen, wo die Risiken gering und die Ressourceneffizienzpotenziale hoch sind (vgl. Türk et al. 2006).

#### **4.4.3 Informations- und Kommunikationstechnologien**

Mit Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) wurden bereits große Potenziale etwa im Bereich der Prozessteuerung erschlossen, auch in anderen Bereichen kann sie den Ressourcenverbrauch deutlich reduzieren. Grundproblem ist die kurze Nutzungsdauer vieler IKT-Anwendungen und die immer stärkere Durchdringung von Konsumgütern mit kurzlebiger IKT. Verbunden ist dies mit einer Verkürzung der Nutzungsdauer vieler Güter, was zu einer erhöhten Produktion und einem erhöhten Ressourcenverbrauch führt (vgl. auch Türk et al. 2002). Die Entwicklung der Computertechnik hat jedoch letztlich erst Entwicklungen in anderen Bereichen ermöglicht. Das betrifft sowohl die Prozessteuerung, wie die Simulation von Prozessen, chemischen Reaktionen oder Autounfällen.

Erst nach und nach werden diese modernen Verfahren breit angewendet. Immer noch dominieren vielfach althergebrachte Verfahren. Finite Elemente und kraftflussgerechte

Konstruktion (letztlich der Bionik entlehnt) sind jedoch nur durch die Nutzung moderner IKT umsetzbar. Die Entwicklung ist bei Weitem nicht abgeschlossen.

Prozesssteuerung und -logistik betreffen hochkomplexe Informationsverarbeitungssysteme wie auch Stoffführungssysteme. In vielen Fällen gelingt die automatische Regelung von Anlagen noch unvollkommen. Eine Überführung des Erfahrungswissens von Mitarbeitenden in die Prozesssteuerung fällt oft schwer. Durch Integration etwa von Elementen der Fuzzylogic kann die Prozesssteuerung u. U. deutlich verbessert werden. Das gilt insbesondere dort, wo nicht auf hinreichendes Erfahrungswissen von Mitarbeitenden zurückgegriffen werden kann, also etwa bezogen auf die Prognose der Windenergiebereitstellung.

Die weitere unternehmensübergreifende Integration von Prozesslogistik bietet ebenfalls interessante Möglichkeiten, etwa im Bereich von Kunden-Lieferantenbeziehungen aber auch bei der Ferndiagnose und Wartung von Anlagen. Durch die verbesserte Überwachung von Anlagen kann so zum Beispiel ein sich anbahnender Ausfall von Anlagen per Ferndiagnose erkannt und frühzeitig behoben werden.

Erkennbar ist, dass in den letzten 10 Jahren durch das Internet die Entwicklung nochmals beschleunigt wurde. Das betrifft insbesondere die Informationsbeschaffung und -verteilung. Realistisch betrachtet muss man anerkennen, dass die rasante Entwicklung in ihrer Größe nicht angemessen eingeschätzt wurde, einerseits weil die schnelle und weite Verbreitung des Internet unterschätzt wurde, andererseits aber auch weil manche Entwicklungen bei weitem zu positiv eingeschätzt wurden. Das papierlose Büro ist ein häufig zitiertes Beispiel, bei dem eine völlig gegenteilige Entwicklung einsetzte, wie ursprünglich gewünscht und vorhergesagt. Andere Überlegungen haben sich nur teilweise oder verzögert erfüllt, das gilt z. B. für Computer Integrated Manufacturing (CIM).

Wichtigster Aspekt ist die deutliche Unterschätzung von Rebound- oder Wachstumseffekten, insbesondere jedoch des hohen Energie- und Materialaufwands für die Herstellung und Nutzung der Computer. Hier haben hauptsächlich veränderte Nutzungsgewohnheiten und -möglichkeiten erhebliche Auswirkungen auf die Ressourceneffizienz. Die Abkehr von zeitgebundenen Telefentarifen und die breite Einführung von Breitbandanschlüssen hat dazu geführt, dass immer mehr Computer ständig im Betrieb sind. Verbunden ist dies mit einem deutlich erhöhten Energiebedarf.

Die Energy Saving Trust Foundation hat in ihrer Studie „The Ampere Strikes Back“ (Owen 2007) dargestellt, dass im Jahr 2020 insgesamt 45 Prozent des gesamten Energieverbrauchs von Haushalten auf Hightechprodukte wie Flachbildfernseher und digitale Radios entfallen. Dies liegt zum einen an den stark wachsenden Märkten, aber auch daran, dass LCD- und Plasma-TVs wesentlich ineffizienter sind als altgediente Bildröhrenfernseher. Ein Grund sind die größeren Bildschirmdiagonalen, durch die ansonsten möglichen Einsparungen überkompensiert werden.

Auch bei der Herstellung von IT-Komponenten lassen sich Energie und Ressourcen sparen. Mit einer Forschungs- und Fertigungskooperation der US-Halbleiterindustrie

will man versuchen, den Energieverbrauch bei der Chipproduktion zu reduzieren. Bei einigen thermischen Prozessen sollen Einsparpotenziale von 20 % gegeben sein (Schulz 2007).

Die Ergebnisse bei einer weiteren Umstellung auf eine verstärkte Nutzung von IKT sind nicht eindeutig. Im Fall des Onlinebanking konnte gezeigt werden, dass relevante Einsparpotenziale vorhanden sind. Für den Fall des Musikvertriebs waren die Ergebnisse uneindeutig, da hier auch der Effizienz der Onlinebereitstellung entgegengesetzte Effekte erkennbar waren. Wurde die online erworbene Musik nicht nur auf dem heimischen PC gesichert, sondern auch auf einer CD gebrannt, relativierte sich der Vorteil der Onlinebereitstellung. Mussten die Daten über eine langsame Internetverbindung heruntergeladen werden und dafür der Computer entsprechend lange betrieben werden, verkehrte der Vorteil sich deutlich ins Gegenteil (Türk et al. 2003).

#### **4.4.4 Fazit: Querschnittstechnologien**

Neue Technologien sind äußerst vielfältig und haben grundsätzlich unzählige Anwendungsmöglichkeiten. Eine einfache und zugleich umfassende Einschätzung der mit ihnen verbundenen Ressourceneffizienzpotenziale gelingt daher kaum. Für alle Querschnittstechnologien gibt es ausgesprochen positive und Ressourcen schonende Beispiele. Vielfach besteht jedoch eine ausgeprägte Gefahr von Reboundeffekten, die mögliche Einsparungen zunichtemachen können. Hinzu kommt, dass neue Technologien mit teils erheblichen Gefahren in der Anwendung verbunden sind und in der Öffentlichkeit sehr kontrovers diskutiert werden.

Die Einflussmöglichkeiten auf die Ressourceneffizienz durch Querschnittstechnologien werden daher wie folgt eingeschätzt:

- Biotechnologie
  - Grüne Biotechnologie: groß aber sehr umstritten,
  - Rote Biotechnologie: unklar,
  - Weiße Biotechnologie: groß,
- Nanotechnologien: mittel bis groß, erhebliche Risiken,
- Informations- und Kommunikationstechnologien: gering bis groß, erhebliche Gefahr von Reboundeffekten.

#### **4.5 Forschung und Entwicklung**

Forschung und Entwicklung sowie die Investitionen, die dafür getätigt werden, zeigen deutlich, dass Forschungsumfang und -output eng miteinander zusammenhängen. Die Gelder, die z. B. in der Stahlindustrie für die Forschung im Bereich des Leichtbaus ausgegeben wurden, zeigen deutlich, wie effektiv Forschung Einfluss nehmen kann auf

die systemweite Ressourceneffizienz der Produkte und Dienstleistungen, die entwickelt werden. Es ist von großer Bedeutung, in das Anforderungsprofil für zu entwickelnde Technologien, Prozesse, Werkstoffe etc. das Kriterium systemweit optimierter Ressourceneffizienz einzubeziehen. Forschung und Entwicklung, die dieses Kriterium schon bei der Entwicklung von Produkten, Technologien, Dienstleistungen berücksichtigt, hat einen großen Effekt auf die weiteren Schritte in der Etablierung oder Weiterentwicklung der Produktkette: Auswahl der Rohstoffe, Prozessführung, Recyclingfähigkeit etc. Forschung und Entwicklung alleine sind jedoch nicht hinreichend für eine breite Diffusion der Ergebnisse. Insbesondere der Transfer von Forschungsergebnissen in die betriebliche Praxis und die Produktgestaltung ist häufig schwierig und lässt viele Potenziale ungenutzt.

Auch grundsätzliche und sehr weit reichende Weichenstellungen können durch Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen maßgeblich bestimmt werden. Das traf auf die Entwicklung und Etablierung der Kernenergie zu. Dies trifft heute auf die Weiterentwicklung der erneuerbaren Energien zu.

#### **Fazit: Forschung und Entwicklung**

Die Einflussmöglichkeiten auf die Ressourceneffizienz durch Forschung und Entwicklung werden daher wie folgt eingeschätzt:

- Forschung und Entwicklung: groß bis sehr groß,
- Forschungstransfer: sehr groß.

#### **4.6 Ressourceneffizienz und Infrastrukturen**

Aufbau und Erneuerung industrieller Fertigungsstrukturen und öffentlicher Infrastrukturen gehen einher mit langfristigen technologischen Festlegungen; dies prägt den Ressourcenverbrauch über längere Zeiträume. Bei anstehenden Erneuerungen und dem Aufbau neuer Strukturen muss diese Festlegung vorausschauend berücksichtigt werden (vgl. Liedtke/Kaiser 2005).

Infrastrukturen beeinflussen die Ressourceneffizienz von Volkswirtschaften erheblich. Hier sind zwei Märkte zu unterscheiden:

- Die Märkte der industrialisierten Länder: Die Infrastrukturen bestehen zu großen Teilen bereits, müssen gepflegt, umgebaut und saniert werden. Probleme wird der demografische Wandel verursachen. In diesem Bereich bestehen zahlreiche langfristige Festlegungen, etwa durch hohe Aufwendungen für Infrastruktur und die Verknüpfung von Infrastruktur und Anlagen sowie langfristige Lieferbeziehungen. Deutschland ist zu diesen Ländern zu zählen. Zu fragen ist, wie der Umbau, die Instandhaltung wie auch die Anbindung der nachfragenden Systeme kosten- und ressourceneffizient erfolgen können.

- Die Märkte der Schwellen-/Entwicklungsländer: Die Infrastrukturen befinden sich im Aufbau, die Nachfrage steigt rasant, die Befriedigung muss rasch erfolgen. Viele Menschen leben ohne entsprechende Systeme, haben keinen Zugang zu Trinkwasser und Abwassersystemen etc. Hier sind kostengünstige, ressourceneffiziente Systemlösungen von großer Bedeutung. Viele neue EU-Mitgliedsländer weisen ähnliche Charakteristika auf. In beiden Märkten sind Potenziale zur Steigerung der Ressourceneffizienz insbesondere im Bereich der Anwendung neuer Technologien im Bereich der Energieversorgung, des Verkehrs und der Wasser- und Abwassersysteme sowie der Entsorgungssysteme vorhanden.

Die Bereitstellung von Infrastruktur ist - wie verschiedene Studien zeigen - mit sehr erheblichen Aufwendungen verbunden (vgl. [www.environment.fi](http://www.environment.fi)). Die sektorale Einteilung der Statistik gestattet jedoch bei Betrachtungen der Materialintensität von Einzelprodukten keine genaue Zuordnung, welcher Anteil der Materialintensität etwa Bauleistungen oder Maschinen und spezifischen Infrastrukturen zuzurechnen ist.

#### **Exkurs: Neue Möglichkeiten vs. alte Pfade**

Klassische Wasserversorgungsinfrastrukturen, wie wir sie kennen, erfordern Reservoirs, Trinkwasserleitungen und Pumpen. Einmal eingerichtete Infrastrukturen überdauern mitunter Generationen und können sich, je nach Bevölkerungsentwicklung später als über- oder unterdimensioniert erweisen. Auch in Wüstengebieten (Oasen) könnten theoretisch solche Infrastrukturen angelegt werden. Forschungsprojekte zu dieser Thematik zeigen jedoch, dass auch hier technologische Pfade erst mit der Entscheidung für eine Technologie festgelegt werden. Die Möglichkeiten sind indes vielfältig: „Wasser für die Wüste. Ein ungewöhnliches Projekt hilft, die Wüste zu bewässern. Der 18-jährige Namibier Carl-Heinz Mulder ist Erfinder und hat eine Technik entwickelt, die Wasser in die Wüste bringt. Er erprobt sie derzeit in Namibia, das zum größten Teil aus Wüste besteht [...]. Mulder sammelt mittels eines Netzes das Wasser des Morgennebels. [...] So hat die kleine Topnaargemeinschaft von sieben bis zehn Leuten ungefähr vierzig Liter Wasser pro Tag für alle zusammen zur Verfügung. Mit diesem Wasser waschen sie ihr Geschirr, ihre Wäsche, waschen sich selbst und kochen ihr Essen. Wenn das Netzprojekt ausgereift ist, stehen ihnen zwischen sechzig bis siebzig Liter Wasser pro Tag und Person zur Verfügung. 300 – 400 Liter pro Tag sollen es einmal werden.“ (3Sat – nano online 2000)

Neben den eigentlichen Infrastrukturen und den Aufwendungen zu ihrer Erstellung und Instandhaltung besteht eine große private Industrie- und Produktionsstruktur, deren Erstellung nicht nur mit erheblichem Ressourceneinsatz verbunden ist, sondern durch die technologische Pfade mit ihren spezifischen Ressourcenverbräuchen langfristig festgelegt werden. Ein Beispiel hierfür ist die verstärkte Milcherzeugung in China. Obgleich in Asien ungefähr 84 % der einheimischen erwachsenen Bevölkerung aufgrund einer Laktoseunverträglichkeit keine Milch vertragen, ist die Milchwirtschaft in China ein Wachstumsmarkt. Mit zum Auf- und Ausbau der Produktkette Milch gehören

neben Viehbeständen und einem entsprechenden Flächenverbrauch auch der Aufbau von Molkereien, Vertriebssystemen und die Kundenakquisition. Jeder Schritt bedarf entsprechend ausgebildeten Personals, sodass neben den technologischen Pfadabhängigkeiten auch soziale Abhängigkeiten (Interesse am langfristigen Erhalt von Arbeitsplätzen) entstehen.

Unter dem Gesichtspunkt der Ressourceneffizienz ist das Schaffen von zusätzlichem, und nicht per se vorhandenem Bedarf durch das Verlegen von Produktketten grundsätzlich in Frage zu stellen. Für die Verlagerung von Produktketten gilt, dass für den Aufbau neuer Infrastrukturen Ressourceneffizienzaspekte eine wichtige Rolle spielen sollten. Hier sind die entwickelten Länder in der Pflicht, ihre Erfahrungen zu teilen.

Kritisch in Hinblick auf Ressourceneffizienz sind insbesondere auch Zeiten, in denen im großen Maßstab neue Anlagen errichtet bzw. alte Anlagen ersetzt werden. In solchen „Windows of Opportunity“ werden die Entscheidungen getroffen, die aufgrund extrem hoher Kapitalbindung nicht kurzfristig rückholbar sind. Aktuelle Beispiele in Deutschland sind der Kraftwerkspark sowie die Abwasserentsorgung. So kommt die Managementberatung A. T. Kearny in einer Studie zu dem Ergebnis, dass bei der Erneuerung des Kraftwerksparks in Deutschland derzeit die falschen regionalen Schwerpunkte gesetzt werden. Kraftwerksneubauten erfolgen vor allem in Nordrhein-Westfalen, obwohl ein zusätzlicher Bedarf und Ersatz vor allem in Süd- und Norddeutschland benötigt wird (Böhret 2007). Begründet ist das zum einen durch den anstehenden Erneuerungsbedarf bzw. die offensichtliche Notwendigkeit von Ersatzinvestitionen durch den beschlossenen Ausstieg aus der Kernenergie, zugleich aber auch durch die erwartete Bevölkerungsentwicklung. Beide Faktoren sorgen für einen erhöhten Bedarf in Süd- und Norddeutschland.

### **Fazit: Ressourceneffizienz und Infrastrukturen**

Infrastrukturen aller Art sorgen für langfristige Festlegungen von Produktions-, Siedlungs- und Versorgungsstrukturen. Der Einfluss von Infrastrukturen auf den Ressourcenverbrauch ist daher erheblich. Hinzu kommt der Ressourcenverbrauch zum Aufbau und Unterhalt der Infrastrukturen. Entscheidenden Einfluss auf den Ressourcenverbrauch kann man in den Phasen nehmen, in denen im großen Maßstab Infrastrukturen neu aufgebaut oder erneuert werden („Windows of Opportunity“).

Die Einflussmöglichkeiten auf die Ressourceneffizienz durch Infrastrukturen werden daher wie folgt eingeschätzt:

- Errichtung und Erneuerung von Infrastrukturen: groß bis sehr groß,
- Transfer in andere Regionen: sehr groß, mit dem hohen Risiko der Verbreitung ineffizienter Technologien.

## 5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Vergleichende Analysen haben gezeigt, dass in allen untersuchten Ländern eine Abkopplung von Ressourcen- und Materialeinsatz vom Wirtschaftswachstum stattfindet, allerdings mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Die Marktentwicklung verläuft in Richtung einer erhöhten Ressourcenproduktivität, wobei eine absolute Verminderung des Ressourcenverbrauchs bislang nur in wenigen Ausnahmefällen festzustellen ist. Gründe für eine weitere Steigerung der Ressourcenproduktivität liegen in den Kosten der Ressourcennutzung und dem damit verbundenen Handlungsdruck zur Kostenreduktion. Weitere Gründe sind ihr Beitrag zur Rohstoffsicherheit, zur Reduktion von Umweltbelastungen und zur Optimierung der Produktionsprozesse.

Innerhalb von Produktions- und Konsumsystemen – von der Rohstoffbeschaffung über die Verabrietung und die Nutzung bis hin zum Recycling/der Entsorgung - können unterschiedliche und unterschiedlich große technologische Potenziale zur Steigerung der Ressourceneffizienz identifiziert werden.

### 1. Rohstoffe – Verfügbarkeit und Auswahl

Abiotische Rohstoffe wie Erze, fossile Energieträger und Industriemineralien haben sehr unterschiedliche Materialintensitäten. Auch Erze derselben Metalle können in ihrem Metallgehalt erheblich variieren. Bei Massenrohstoffen wie Eisenerze oder Bauxit erfolgt bereits eine Optimierung auf hohe Metallgehalte und leichte Aufschließbarkeit, da dies wesentliche Voraussetzungen für die wirtschaftliche Führung der nachfolgenden Prozesse ist. Bei anderen Metallen gibt es oft größere Unterschiede. Bei sehr unterschiedlichen Lagerstättentypen können häufig sehr unterschiedliche Metallgehalte wirtschaftlich gefördert werden.

Bei vielen nicht metallischen Rohstoffen ist zwar der ökologische Rucksack relativ gering, die Recyclingfähigkeit aber meist eingeschränkt. Eine möglichst lange Nutzung mit anschließender Kaskadennutzung kann hier eine geeignete Strategie sein.

Verglichen mit den Metallen ist die Förderung von Erdöl oder Erdgas bezogen auf die Ressourceneffizienz bisher unproblematisch. Mit einem sich abzeichnenden teilweisen Übergang auf nicht konventionelle Kohlenwasserstoffe dürfte sich dies jedoch langfristig ändern.

Bei den biotischen Rohstoffen kommt es vor allem auf den Umfang der Flächeninanspruchnahme sowie auf die damit verbundene Erosion und Bodenbewegung an. Erosion ist zu vermeiden, ebenso wie tiefe Bodenbewegungen mit ihrem Eingriff in die Bodenhorizonte und nachfolgender Oxidationsprozesse. Monokulturen fördern vielfach diesen Prozess und setzen die Flächen großem Stress aus. Eine verstärkte Nutzung erneuerbarer Rohstoffe kann zur Ressourcenschonung beitragen. Die Nutzung erneuerbarer Rohstoffe ist jedoch auch mit einer ganzen Reihe von Problemen, auch aus

Sicht der Ressourceneffizienz verbunden. Insofern sollte eine Substitution nicht erneuerbarer Rohstoffe durch erneuerbare nur nach sorgfältiger Abwägung erfolgen.

## **2. Werkstoffe**

Die Herstellung vieler Massenwerkstoffe wurde bereits über lange Zeiträume optimiert und ihre Ressourceneffizienz deutlich gesteigert, weitere Optimierungen sind daher oftmals nur noch mit hohem Aufwand möglich. Eine wichtige Rolle kann dabei das Recycling spielen. In den Fällen wo Recycling ökonomisch und ökologisch besonders lohnend ist, ist es jedoch vielfach schon lange etabliert. Kaskadennutzung kann in Fällen schlechter Eignung für Recyclingkreisläufe eine ressourcenschonende Alternative sein.

Die Auswahl der Werkstoffe hat einen wesentlichen Einfluss auf den Ressourcenverbrauch von Gütern. Einerseits durch die mit ihrer Herstellung, Entsorgung und Wiederverwendung verbundenen Umweltbeeinträchtigungen, andererseits durch die mit diesen Werkstoffen verbundenen Gestaltungs- und Konstruktionsmöglichkeiten.

Eine bedeutende Rolle spielen dabei insbesondere auch neue Werkstoffe. Ihr gezielter Einsatz kann häufig erhebliche Potenziale erschließen. Hierbei gibt es einen stufenlosen Übergang hin zu maßgeschneiderten Werkstoffen, die in ihrer speziellen Anwendung erhebliche Potenziale eröffnen können. Ein wesentlicher Schlüssel ist hierbei die werkstoffgerechte Konstruktion, z. B. die Auswahl der Werkstoffe nach den auftretenden Lastfällen oder die kraftflussgerechte Gestaltung von Bauteilen.

## **3. Produktion und Fertigung**

Die Wahl von Fertigungsverfahren hat einen erheblichen Einfluss auf die Ressourceneffizienz bei der Herstellung von Produkten. Ihre Auswahl hängt jedoch von zahlreichen Aspekten ab. Die Entscheidung, welche Fertigungsverfahren aus Sicht der Ressourceneffizienz am günstigsten sind, hängt auch wesentlich von den Produktionsmengen, den vorhandenen Anlagen und Maschinen oder der Erfahrung der Konstrukteure und DesignerInnen ab. Aufgrund der hohen Komplexität der Auswahl von Fertigungsverfahren und dem zugleich vorhandenen Zusammenhang mit der Auswahl von Werkstoffen kann insgesamt von einem hohen Ressourceneffizienzpotenzial durch die in diesem Bereich ausgegangen werden.

## **4. Produktgestaltung**

Produktgestaltung hat einen außerordentlich hohen Einfluss auf die Ressourceneffizienz von Gütern. Die Gestaltung von Produkten beeinflusst sowohl die Auswahl von Werkstoffen und Fertigungsverfahren, aber auch die Lebensdauer und Leistungsfähigkeit von Produkten. Daneben kann durch Produktgestaltung im weiteren, nicht ausschließlich materiellen Sinne auch eine Dienstleistungsorientierung ermöglicht werden, die vielfach weitere Ressourcen sparen kann.

Die Lebensdauer von Produkten und die Geschwindigkeit, mit der neue Produkte gestaltet und eingeführt werden, haben ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf den

Ressourcenverbrauch. Die zunehmende Vielzahl neuer Produkte und die geringe reale Nutzungsdauer wirken dem Gedanken der Ressourcenschonung deutlich entgegen.

### **5. Querschnittstechnologien**

Querschnittstechnologien sind äußerst vielfältig und haben grundsätzlich unzählige Anwendungsmöglichkeiten. Eine einfache und zugleich umfassende Einschätzung der mit ihnen verbundenen Ressourceneffizienzpotenziale gelingt daher kaum. Für alle Querschnitts- und Schlüsseltechnologien gibt es ausgesprochen positive und Ressourcenschonende Beispiele. Oft besteht jedoch eine ausgeprägte Gefahr von Reboundeffekten, die mögliche Einsparungen zunichtemachen können. Hinzu kommt, dass neue Technologien mit teils erheblichen Gefahren in der Anwendung verbunden sind und in der Öffentlichkeit sehr kontrovers diskutiert werden.

### **6. Forschung und Entwicklung**

Forschung und Entwicklung sowie die Investitionen, die dafür getätigt werden, zeigen deutlich, dass Forschungsumfang und -output eng miteinander zusammenhängen. Die Gelder, die für die Forschung um den Leichtbau ausgegeben wurden, zeigen deutlich, wie effektiv Forschung Einfluss nehmen kann auf die systemweite Ressourceneffizienz der Produkte und Dienstleistungen, die entwickelt werden. Der Transfer von Forschungsergebnissen in die betriebliche Praxis und die Produktgestaltung ist jedoch häufig schwierig und lässt viele Potenziale ungenutzt.

### **7. Ressourceneffizienz von Infrastrukturen**

Infrastrukturen aller Art sorgen für langfristige Festlegungen von Produktions-, Siedlungs- und Versorgungsstrukturen. Der Einfluss von Infrastrukturen auf den Ressourcenverbrauch ist daher erheblich. Hinzu kommt der Ressourcenverbrauch zum Aufbau und Unterhalt der Infrastrukturen. Entscheidenden Einfluss auf den Ressourcenverbrauch kann man in den Phasen nehmen, in denen im großen Maßstab Infrastrukturen neu aufgebaut oder erneuert werden („Windows of Opportunity“).

Entlang der Prozessketten, von der Rohstoffförderung und Auswahl, über die Erzeugung von Werkstoffen, die Fertigung von Produkten und das Recycling von Reststoffen gibt es eine Vielzahl von Potenzialen zur Steigerung der Ökoeffizienz und Reduktion des Ressourcenverbrauchs. In vielen dieser Bereiche wurden bereits deutliche Fortschritte erreicht. Technologien können einen wesentlichen Beitrag zur Ressourceneffizienz leisten. Besonders erfolgsversprechend sind hierbei in aller Regel nicht Einzeltechnologien, sondern das Zusammenwirken verschiedenster Technologien über die gesamte Prozesskette und deren Grenzen hinweg – Technologien zur Aufbereitung und Verarbeitung der Rohstoffe, in der Nutzungsphase sowie im Bereich der Querschnittstechnologien. Vor allem im Hinblick auf die Verbreitung erfolgreicher Technologien zur Ressourceneffizienz, besteht noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

## 6 Literatur

- Acosta-Fernández, J. (2007): Identifikation prioritärer Handlungsfelder für die Erhöhung der gesamtwirtschaftlichen Ressourcenproduktivität in Deutschland. Wuppertal: WI
- Ahluwalia, S.C. / Hackländer-Woywadt, C. / Abraham, P.C. (2006): Operating experience with the first Loesche mill with the 3+3 system for grinding clinker and blastfurnace slag, Cement International, 2/2006 Vol. 4 S. 90-98
- Autio, S. / Lettenmeier, M. (2002): Ekotehokkuus – Business as future. Dipli-reports, Espoo.
- Baron, Ralf / Jochem, Eberhard / Kristof, Kora / Liedtke, Christa (2005): Studie zur Konzeption eines Programms für die Steigerung der Materialeffizienz in mittelständischen Unternehmen : Abschlussbericht: Arthur D. Little GmbH [u.a.]  
<http://www.materialeffizienz.de/download/Abschlussbericht.pdf>
- Bayer Material Science und Bayer Technology Services (2007): Die Zukunft ist Nano; Konstruktion, 6 / 2007, S.IW 15
- Bernardo, E. / Scarinci, G. / Hreglich, S. (2005): Foam glass as a way of recycling glasses from cathode ray tubes. Glass Sci. Technol. 78 (2005) No. 1, S.7-11
- Bierter, W. / Irgang, G. / Manstein, C. / Schmidt-Bleek, F. (2000): Machbarkeitsstudie für den Aufbau von „PROREGIS (Productivity Registry Center for Ressource Productivity Factors for Wealth Creation), eine Studie für das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie der Republik Österreich und Bundesministerium für Bildung und Forschung der Bundesrepublik Deutschland. Giebenach, Altsch, Klagenfurt, Carnoules, September 2000
- Bleek, W. (2007): Ressourcenschonung mit neuen Stählen/Technologien/Methoden. Vortrag gehalten im Rahmen des Workshop „Ressourcenproduktivität und Rohstoffschonung“, 18. April, Düsseldorf
- Bleischwitz, R. (1998): Ressourcenproduktivität. Innovationen für Umwelt und Beschäftigung, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag
- Bleischwitz, R. (2006): Internationale Rohstoffmärkte: steigende Preise, wachsendes Konfliktpotenzial, und neue Formen von Governance, in: „Globale Trends 2007“, hg. von der Stiftung Entwicklung und Frieden, Debiel, T. et al., Frankfurt a.M., S. 305 – 321
- Bleischwitz, R. / Bahn-Walkowiak, B. (2007): Aggregates and construction markets in Europe – towards a sectoral action plan on sustainable resource management, in: ‘Minerals and Energy’ H 3-4, S. 159–176
- Böhret, Birgit (2007): Kraftwerke „am falschen Ort“, VDI-nachrichten 13.07.07
- Bringezu, S. (2004): Erdlandung. Navigation zu den Ressourcen der Zukunft. Stuttgart: Hirzel
- Bringezu, S. / Ramesohl, S. / Arnold, K. / Fishedick, M. / Geibler, J. von / Liedtke, C. / Schütz, H. (2007): Towards a sustainable biomass strategy, Wuppertal Papers No. 163, Wuppertal Institut
- Bruch, K.H. et al. (1995): Sachbilanz einer Ökobilanz der Kupfererzeugung und –verarbeitung, Zeitschrift METALL, Heft 4, 5, und 6, 1995
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2005): Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen 2005

- Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF): Nachhaltiges Wirtschaften
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2006): Ökologische Industriepolitik - Memorandum für einen „New Deal“ von Wirtschaft, Umwelt und Beschäftigung, Berlin
- Buntenbach, S. (2007): Aufbereitung von Bauxit, Aufbereitungstechnik 48 (2007) Nr. 3, S. 4-14
- Busch, T. / Beuker, S. (2004): Care – computergestützte Ressourceneffizienz-Rechnung in der Mittelständischen Wirtschaft, Schlussbericht, Wuppertal 2004 (<http://care.oekoeffizienz.de>; [www.wupperinst.org/uploads/tx\\_wiprojekt/care-schlussbericht.pdf](http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wiprojekt/care-schlussbericht.pdf))
- Busch, T. / Orbach, T. (2003): Mit Ökoeffizienz Kosten sparen: Integration lebenszyklusweiter Stoffstromdaten in die Kostenrechnung, Unternehmen und Umwelt, Vol. 16, Heftnr. 2, S. 24-25, 2003
- Busch, T / Liedtke, C. (2005): Materialeffizienz. München: oekom verlag
- Canon (2006): Canon Sustainability Report 2006; [www.canon.com/environment/eco2006e/index.html](http://www.canon.com/environment/eco2006e/index.html)
- Czichos, H. (Hg.) (1996): Hütte : Die Grundlage der Ingenieurwissenschaften, 30., neubearb. und erw. Aufl., Berlin; Heidelberg; New York. Springer
- Destatis (2007): Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland und für das Ausland 2006
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2003): DIN 8580 Fertigungsverfahren; Begriffe, Einteilung; September 2003
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2006): DIN EN ISO 14040 Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen, Oktober 2006
- Effizientere Prozesse und neue Eigenschaften – Nanotechnologie bei der BASF; Konstruktion, 5 / 2007, S.IW 14
- FAO, USDA, ZMP, Agrarwirtschaft 52 Heft 1. In: Freistaat Sachsen (2002): Erzeugerpreisbericht für landwirtschaftliche Produkte
- Floßdorf, F.-J. / Wieland, H.-J. (2003): Stahlanwendung durch nachhaltige technische Lösungen, Vortrag bei Format – Technologie und Wandel, 25.03.2003
- Fronde, M. / Grösche, P. / Huchtemann, D. / Oberheitmann, A. / Peters, J. / Angerer, G. / Dr. Dr. Sartorius, C. / Buchholz, P. / Röhling, S. / Wagner, M. (2005): Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen – Endbericht- : Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Forschungsprojekt Nr. 09/05 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWI)
- Geibler, J. von / Kuhndt, M. / Türk, V. (2002): Umweltauswirkungen von E-commerce : das Fallbeispiel Online-Banking, Ökologisches Wirtschaften, Heftnr. 03. Apr, S. 14-15, 2002
- Hackländer-Woywadt, C. (2005): Hüttensandmahlung mit Loesche-Mühlen, Zement, Kalk, Gips 58 (2005) No. 3, S. 44-51
- Hahlbrock, K. (2007): Kann unsere Erde die Menschen noch ernähren? Frankfurt

- Heimes, M. (1999): Überlegungen zur umweltökonomischen Effizienz innovativer Formen der Arbeitsorganisation – vertieft am Beispiel der Telearbeit, Diplomarbeit, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 1999
- Henseling / Penn-Bressel (2005), S.74.In: Loske 2005
- Herzog, K. / Liedtke, C. / Ritthoff, M. / Wallbaum, H. / Merten, T. (2003): Der Werkstoff Stahl im Vergleich zu Konkurrenzwerkstoffen – Verfahren, Ressourceneffizienz, Recycling, Umwelt. Forschungsbericht P 559, Düsseldorf: Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V.
- Hinterberger, F. / Liedtke, C. / Barthel, C. / Kristof, K. / Nickel, R. / Rohn, H. / Vogel, A. / Welfens, M. J. / Yavuz, N. / Frick, S. / Dürig, W. / Lageman, B. / Gaßner, R. / Scharp, M. / Atmatzidis, E. / Woidasky, J. / Hansen, U. / Hauser, H. / Kauschke, P. / Hiessl, H. / Köwener, D. / Hemkes, B. / Steffens, C. / Timpe, C. / Ploetz, C. / Fischer, L. / Koch, C. (1998): "Öko-effiziente Dienstleistungen als strategischer Wettbewerbsfaktor zur Entwicklung einer nachhaltigen Wirtschaft" BMBF-Verbundprojekt, Endbericht. Wuppertal Institut, Wuppertal
- Hinterberger, F. / Luks, F. / Stewen, M. (1996): Ökologische Wirtschaftspolitik. Zwischen Ökodiktatur und Umweltkatastrophe, Birkhäuser
- Hockerts, K. (1995): Konzeptualisierung ökologischer Dienstleistungen. IWÖ Diskussionspapier Nr. 29. St. Gallen
- Holthaus, M. (2001); Der Laserstrahlschweißprozeß in Laser in der Produktion, VDI-Berichte 162, Duisburg, Düsseldorf
- <http://metallverpackungen.de/pdf/folder-getraenke.pdf>
- [http://panasonic.co.jp/eco/en/factor\\_x/](http://panasonic.co.jp/eco/en/factor_x/)
- <http://www.basf.de/umwelt/oekoeffizienz>
- <http://www.fnr.de>
- <http://www.indigodev.com/Circular1.html>
- <http://www.japanfs.org>
- <http://www.kohlenstatistik.de>
- <http://www.laptop.org/vision/index.shtml>
- <http://www.schader-stiftung.de>
- [http://www.stahl-online.de/wirtschaft\\_und\\_politik/stahl\\_in\\_zahlen/Bilder/2007/Stahlverwendung\\_in\\_DE\\_2006.jpg](http://www.stahl-online.de/wirtschaft_und_politik/stahl_in_zahlen/Bilder/2007/Stahlverwendung_in_DE_2006.jpg)
- [http://www.thema-energie.de/article/show\\_article.cfm?id=151](http://www.thema-energie.de/article/show_article.cfm?id=151)
- <http://www.ufz.de/index.php?de=7037> Innovationen aus der Umweltforschung, Berlin 2004
- Jende, S. / Baumgarten, S. (2007): Material- und Kosteneinsparungen bei kombinierten Fertigungsprozessen – Massenteile für die Automobilindustrie. Konstruktion 1 / 2 2007, S. 63-66
- Klug, F. (2000): Konzepte zur Fertigungssegmentplanung unter der besonderen Berücksichtigung von Kostenaspekten, Linz

- Kommission der Europäischen Gemeinschaft (2005): Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen Thematische Strategie für eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen, Brüssel 21.12.2005
- Kristof, K. / Türk, V. / Welfens, J. / Walliczek, K. (2006): Ressourceneffizienzsteigerungen durch organisatorische und institutionelle Innovationen; Projektergebnisse im Rahmen des Projekts „Steigerung der Ressourcenproduktivität als Kernstrategie einer nachhaltigen Entwicklung“. Wuppertal: Wuppertal Inst. für Klima, Umwelt, Energie.  
[www.ressourcenproduktivitaet.de](http://www.ressourcenproduktivitaet.de)
- Kurzweil, R. (2006): Der Mensch, Version 2.0. Spektrum der Wissenschaft. Januar 2006.
- Lehman, A. (2006): „Ich war eine Flasche“- China produziert Pullis aus Plastikabfall, Deutsche Welle 18.12.2006
- Liedtke, C. / Busch, T (2005): Materialeffizienz, München
- Liedtke, C. / Kaiser, C. (2005): Zukünfte, aber welche? : Integriertes Stoffstrommanagement zwischen Infrastruktur- und Produktentwicklung, in: Loske, Reinhard: Die Zukunft der Infrastrukturen : intelligente Netzwerke für eine nachhaltige Entwicklung, S. 417-445, Marburg : Metropolis-Verlag
- Lippold, B.: Der Regenbogen der Biotechnologie; Chemie.DE Information Service GmbH; <http://www.chemie.de/articles/d/44283/>
- Manstein, C. (1996): Das Elektrizitätsmodul im MIPS-Konzept, Wuppertal Paper Nr. 51, Wuppertal
- Manstein, C. / Liedtke, C. / Schmidt-Bleek, F. (1996): Vergleichende Materialintensitätsanalyse nach dem MIPS-Konzept für Aerogele mit gängigen Isolationsmaterialien aus dem Bereich der Wärmedämmung. Studie im Auftrag der Hoechst AG, Wuppertal 1996 - unveröffentlicht
- Matek, W. / Muhs, D. / Wittel, H. (1987): Roloff / Matek Maschinenelemente, 11. Aufl. , Braunschweig
- MIPS im finnischen Transportwesen (FIN-MIPS Transport); [www.environment.fi/default.asp?contentid=107910&lan=EN](http://www.environment.fi/default.asp?contentid=107910&lan=EN)
- Mori, G.; Adelhardt, W. (1998): Geologisches Jahrbuch - Sonderhefte -, Stoffmengenflüsse und Energiebedarf bei der Gewinnung ausgewählter mineralischer Rohstoffe, Teilstudie Aluminium. Stuttgart, E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung.
- Owen. P. (2007): The amper strikes back – How Consumer electronics are taking over the world, Energy saving trust ,London
- Pahl, G. / Beitz, W. (1993): Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung, 3., neubearb. und erw. Auflage. Berlin; Heidelberg; New York. Springer
- Paulitsch, K. / Baedeker, C. / Burdick, B. (2004): Am Beispiel Baumwolle: Flächennutzungskonkurrenz durch exportorientierte Landwirtschaft, Wuppertal Paper Nr. 148, September 2004
- Pohl, W. L. (2005): Mineralische und Energie-Rohstoffe, Eine Einführung zu Entstehung und nachhaltigen Nutzung von Lagerstätten, Stuttgart
- Ritthoff, M. (2006): Metallrecycling - von Recyclingquoten, Wachstum und Sekundäranteilen, Beitrag in Österreichs Internetportal für Nachhaltige Entwicklung zum Monatsthema: Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit, [www.nachhaltigkeit.at](http://www.nachhaltigkeit.at)

- Ritthoff, M. / Rohn, H. / Liedtke, C. (2002): MIPS berechnen: Ressourcenproduktivität von Produkten und Dienstleistungen, Wuppertal Spezial Nr. 27, Wuppertal
- Roeder, O. / Liedtke, C. (2006): Ressourceneffizienzpolitik zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit, in: Wirtschaftspolitische Blätter, Nr. 4/2006, 53. Jahrgang, S. 523-540, 2006
- Schäfer, H.-U. (2002): Slag grinding: latest advances. World Cement 09/2002, S. 61-66
- Schmidt-Bleek, F. (Hg.) (2004): Der ökologische Rucksack, Stuttgart, Leipzig
- Schmidt-Bleek, F. (Hg.) (1998): MAIA – Einführung in die Material-Intensitäts-Analyse nach dem MIPS-Konzept, Birkhäuser, Basel, Berlin, Boston
- Schmidt-Bleek, F. (2007): Nutzen wir die Erde richtig? Fischer, Frankfurt
- Schmidt-Bleek, F. (1994): Wieviel Umwelt braucht der Mensch? MIPS. Das Maß für ökologisches Wirtschaften, Birkhäuser, Berlin, Basel, Boston
- Schmidt-Bleek, F. / Tischner, U. (1995): Produktentwicklung: Nutzen gestalten – Natur schonen, Schriftenreihe des Wirtschaftsförderungsinstituts Nr. 170, Wien
- Schuh, G. (2006): Produktionsplanung und –steuerung, Berlin
- Schulz, W. (2007): Grüne Chips im Trend, VDI-nachrichten 13.07.2007
- Schütz, H. / Ritthoff, M. (2006): Informationssysteme zur Erhöhung der Ressourcenproduktivität. Ansätze auf Mikro-, Meso- und Makro-Ebene; Projektergebnisse im Rahmen des Projekts „Steigerung der Ressourcenproduktivität als Kernstrategie einer nachhaltigen Entwicklung“. Wuppertal: Wuppertal Inst. für Klima, Umwelt, Energie.  
[www.ressourcenproduktivitaet.de](http://www.ressourcenproduktivitaet.de)
- Smrcek, A. (2005): Evolution of the compositions of commercial glasses 1830 to 1990. Part I. Flat glass. Glass Sci. Technol. 78 (2005) No. 4, S. 230-244
- Stahl-Informations-Zentrum (2006): Stahl-Innovationspreis 2006, S. 43
- Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 2006, Münster 2006
- Stiller, H. (1998): Materialintensitätsanalyse von Verbundwerkstoffen nach dem MIPS-Konzept. Eine Studie des Wuppertal Instituts für Klima, Umwelt und Energie im Auftrag des Verbundwerkstofflabors Bremen e.V., Wuppertal 1998
- Türk, V. / Alakeson, V. / Kuhndt, M. / Ritthoff, M. (2003): The environmental and social impacts of digital music, A case study with EMI. Report to the European Community, Wuppertal
- Türk, V. / Knowles, H. / Wallbaum, H. / Kastenholz, H. (2006): The future of nanotechnology – We need to talk. Wuppertal
- Türk, V. / Kuhndt, M. / Alakeson, V. / Aldrich, T. / Geibler, J. von (2003): The environmental and social impacts of ebanking, A case study with Barclays PLC, Final Report, Wuppertal
- Türk, V. / Ritthoff, M. / Geibler, J. von; /Kuhndt, M. (2002): Virtuell = umweltfreundlich? : Der ökologische Rucksack des Internets, in: Altner, Günter: Jahrbuch Ökologie 2003, S. 110-123, München : Beck, 2002
- U.S. Geological Survey (2005): Aluminum statistics;  
<http://minerals.usgs.gov/ds/2005/140/aluminum.pdf>

- Van de Sand, I. / Acosta Fernandez, J. / Bringezu, S. (2007): Abschätzung von sektoralen Verbesserungspotenzialen Teil 2: Abschätzung von Potenzialen zur Verringerung des Ressourcenverbrauchs im Automobilssektor, Wuppertal
- Van der Voet, E. / van Oers, L. / Moll, S.. / Schütz, H. / Bringezu, S. / de Bruyn, S. / Sevenster, M. / Warringa, G. (2005): Policy review on decoupling of economic development and environmental pressure in the EU-25 and AC-3 countries. CML report 166, Leiden, CML
- Velikonja, D. (2004): Visionen und innovative Lösungen in der Umformtechnik, Stahl und Eisen 124 (2004) Nr. 8, S. 36-38
- Verein Deutscher Ingenieure (1997): VDI-Richtlinie 4600, Kumulierter Energieaufwand, Juni 1997
- Wallbaum, H. (2004): Welche Innovationen brauchen wir? : Die verengte Fokussierung auf High-Tech-Innovationen reicht nicht aus, SPW - Zeitschrift für sozialistische Politik und Wirtschaft, Heftnr. 140, S. 27-29, 2004
- Wilburn, D. R. / Goonan, G. / Bleiwas, D.I. (2005): Technological Advancement-A Factor in Increasing Ressource Use. USGS Open-File Report 2001-197 Version 1.03 Revised 2005
- Wirtschaftsvereinigung Stahl (2003): Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2006-2007.Düsseldorf: Wirtschaftsvereinigung Stahl
- Wurbs, J. / Nickel, R. / Rohn, H. / Liedtke, C. (1996): Der Werkstoff Glas : Materialintensität von Behälterglas und Flachglas ; die 0.33 I Verpackung aus Aluminium, Weißblech und Glas, Wuppertal Paper, Nr. 64, Wuppertal : Wuppertal-Inst. für Klima, Umwelt, Energie, 1996