

VDI

Technologiezentrum

2020



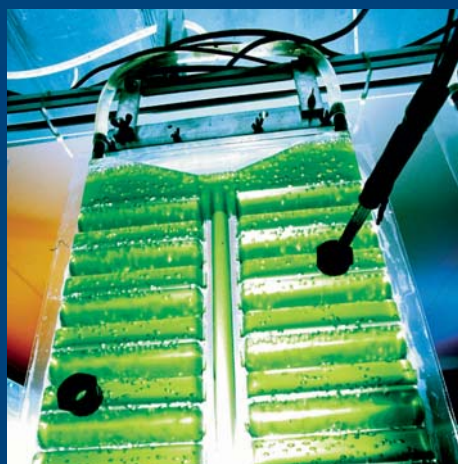
2015

2010

## Innovationen gegen Rohstoffknappheit

Günter Reuscher, Christiane Ploetz, Vera Grimm, Axel Zweck

Zukünftige Technologien Consulting



Im Auftrag des

VDI



# Innovationen gegen Rohstoffknappheit

Günter Reuscher, Christiane Ploetz, Vera Grimm, Axel Zweck

Herausgeber:  
Zukünftige Technologien Consulting  
der VDI Technologiezentrum GmbH  
Graf-Recke-Str. 84  
40239 Düsseldorf

im Auftrag des VDI e. V.

Diese Publikation entstand im Rahmen des Vorhabens „Themenmonitoring für den VDI“ der Abteilung Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH im Auftrag des VDI e. V.

Durchführung: Christiane Ploetz  
Dr. Günter Reuscher  
Dr. Vera Grimm  
Dr. Dr. Axel Zweck

Kontakt: Christiane Ploetz (ploetz@vdi.de)

Dank gilt einer Vielzahl von Experten, die wertvolle Beiträge und Anregungen geliefert haben. Anja Ditfeld gilt Dank für die organisatorische und redaktionelle Unterstützung bei der Durchführung der Studie und Eva Cebulla für die Unterstützung bei der Datenauswertung.

Zukünftige Technologien Nr. 74  
Düsseldorf, im Januar 2008  
ISSN 1436-5928

Für den Inhalt zeichnen die Autoren verantwortlich. Die geäußerten Auffassungen stimmen nicht unbedingt mit der Meinung des VDI e. V. überein.

Außerhalb der mit dem Auftraggeber vertraglich vereinbarten Nutzungsrechte sind alle Rechte vorbehalten, auch die des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen photomechanischen Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie) und das der Übersetzung.

Titelbild: Photobioreaktor zur wirtschaftlichen Kultivierung von Mikroalgen. (Quelle: Fraunhofer-Institut für Grenzflächen und Bioverfahrenstechnik)

Zukünftige Technologien Consulting (ZTC)  
der VDI Technologiezentrum GmbH

Graf-Recke-Straße 84  
40239 Düsseldorf



# Inhaltsverzeichnis

<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b>	<b>7</b>
<b>EINLEITUNG</b>	<b>13</b>
<b>1 ROHSTOFFKNAPPHEIT - MYTHOS ODER REALITÄT?</b>	<b>17</b>
<b>1.1 Konsum / Nachfrage</b>	<b>17</b>
1.1.1 Der globale Rohstoffbedarf - Welche Trends zeichnen sich ab?	17
1.1.2 Rohstoffhunger ohne Ende - Fegt Chinas boomende Wirtschaft die Märkte leer?	20
1.1.3 Rohstoffproduktivität - Indikator für mehr Effizienz?	24
<b>1.2 Exploration / Förderung</b>	<b>28</b>
1.2.1 Rohstoffförderung - ein schmutziges Geschäft?	28
1.2.2 Peak Oil - wann geht uns das Öl aus?	31
1.2.3 Kriege um Ressourcen - Wie gefährlich ist die Rohstoffknappheit?	33
<b>1.3 Distribution / Angebot</b>	<b>36</b>
1.3.1 Alles Spekulation? - Wie entstehen Rohstoffpreise?	36
1.3.2 Oligopole und Konzentrationsprozesse - diktiert die Angebotsseite den Markt?	39
1.3.3 Rohstoffimporte - Wie abhängig ist die deutsche Wirtschaft?	42
<b>2 INNOVATIONSSTRATEGIEN GEGEN ROHSTOFFKNAPPHEIT</b>	<b>47</b>
<b>2.1 Erschließung neuer Rohstoffquellen</b>	<b>47</b>
2.1.1 Potenziale	47
2.1.2 Neue Rohstoffquellen	48
2.1.3 Neue Technologien der Rohstoffgewinnung	50
2.1.4 Mülldeponien als Rohstoffquellen	53
<b>2.2 Steigerung der Ressourceneffizienz</b>	<b>55</b>
2.2.1 Potenziale	55
2.2.2 Produktgestaltung	56
2.2.3 Weiße Biotechnologie	57
2.2.4 Nanotechnologien	58
2.2.5 Überkritische Fluide	60
2.2.6 Bionik	62
2.2.7 Neue Werkstoffe und werkstoffgerechte Konstruktion	63
<b>2.3 Erhöhung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen</b>	<b>67</b>
2.3.1 Potenziale	67
2.3.2 Logistik	70
2.3.3 Sortierung und Aufbereitung	71
2.3.4 Grenzen des Recyclings	74
<b>2.4 Substitution knapper Rohstoffe</b>	<b>77</b>
2.4.1 Potenziale	77
2.4.2 Metall- und Nichtmetallrohstoffe	77
2.4.3 Biomasse	79
2.4.4 Magnesium als Energieträger für erneuerbare Energien	85

3	INITIATIVEN AUS POLITIK UND WIRTSCHAFT	87
3.1	Initiativen der Bundesregierung	87
3.2	Initiativen auf EU-Ebene	89
3.3	Internationale Initiativen	90
4	ANHANG	93
4.1	Abbildungsverzeichnis	93
4.2	Tabellenverzeichnis	95
4.3	Quellenverzeichnis	95
4.4	Verzeichnis von Studiengängen in Deutschland	104



## ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Jahr 2003 markierte einen Wendepunkt für die Rohstoffpreise. Nachdem die 1990er-Jahre für die meisten Rohstoffe durch niedrige Preise gekennzeichnet waren, begann 2003 eine Hausse. Die Preise kletterten bis in die erste Hälfte des Jahres 2006 auf Jahrzehnte nicht erreichte oder gänzlich neue Höchststände. Dabei handelt es sich nicht um Engpässe einzelner Rohstoffe, sondern um eine übergreifende Entwicklung, deren Ursache in der erhöhten Rohstoffnachfrage der Schwellenländer zu suchen ist. Die alte Faustregel, dass 20 % der Menschheit in Europa, Nordamerika und Japan mehr als 80 % der Weltbergbauproduktion konsumieren, gilt nicht mehr. Ein Strukturwandel hat sich vollzogen: Mit China und Indien sowie anderen bevölkerungsreichen Schwellenländern ist heute über die Hälfte der Weltbevölkerung an der Nachfrage nach Rohstoffen beteiligt.

Rohstoffpreise  
steigen auf neue  
Höchststände

Das globale Wirtschaftswachstum ist die treibende Kraft für die Entwicklung auf den Rohstoffmärkten. Das Wachstum des globalen BIP ist 2001 stark angestiegen und beträgt seit 2004 ca. 5 % pro Jahr, wobei ca. 7–8 % auf die Schwellenländer entfallen und das Wachstum in den Industriestaaten ca. 2–3 % beträgt. Diese Entwicklung ist maßgeblich dafür verantwortlich, dass die Nachfrage nach Rohstoffen in den letzten Jahren stark zugenommen hat und in der Folge die Preise nach oben geschneilt sind.

Globales  
Wirtschaftswachstum:  
treibende Kraft für  
Entwicklung der  
Rohstoffmärkte

Für die Rohstoffförderung bedeutet das, dass neue oder bisher unrentable Rohstoffvorkommen wirtschaftlich interessant werden und mehr in neue Explorationsvorhaben investiert wird. Für viele Unternehmen rohstoffabhängiger Branchen hingegen werden die hohen Rohstoffpreise zu einem existenziellen Problem. Doch diese Not macht erfinderisch. Die Rohstoffknappheit entpuppt sich als idealer Nährboden, um Innovationen für mehr Ressourceneffizienz, Substitution und Recycling voranzutreiben.

### *Erschließung neuer Rohstoffquellen*

Knappheit ist stets auch eine Frage der betrachteten Zeitskala: Kurz und mittelfristig können Rohstoffe tatsächlich knapp und damit teuer sein. Langfristig stimulieren solche Knappheiten jedoch die Erschließung neuer Lagerstätten, sodass wieder neue Rohstoffquellen verfügbar werden. Tatsächlich stiegen von 2002 bis 2007 die jährlichen Ausgaben für Explorationsvorhaben von 1,9 Mrd. US-\$ auf 7,5 Mrd. US-\$; eine neue Explorationswelle steht bevor. Dabei werden zunehmend Quellen erforscht, die bislang nicht als profitabel galten, z. B. Manganknollen in der Tiefsee oder Ölsande. Sogar Mülldeponien können als Rohstoffquellen interessant sein.

Erschließung neuer  
Rohstoffquellen als  
Folge der  
Rohstoffknappheit

Wie lassen sich  
Rohstoffe  
umweltfreundlich und  
nachhaltig  
erschließen und  
fördern?

Vor dem Hintergrund dieser bevorstehenden Explorationswelle stellt sich verstärkt die Frage, wie sich die Rohstoffe umweltfreundlich und nachhaltig erschließen und fördern lassen. Denn der Bergbausektor zählt seit jeher zu den Wirtschaftszweigen, die – oft lokal – die Umwelt stark belasten. Veränderungen des Grundwasserhaushalts, schwermetall-belastete Schlämme, Altlasten und ungesicherte Abraumhalden sowie der Einsatz toxischer Stoffe bei der Aufbereitung zählen zu den gravierendsten Problemen. Hier sind die Förderunternehmen selbst, aber auch verantwortliche Unternehmen anderer Stufen der Wertschöpfungskette gefordert. Entsprechende umweltfreundlichere Verfahren sind vorhanden und ermöglichen häufig sogar eine höhere Rohstoffausbeute.

Politisches und  
soziales Umfeld von  
immer größerer  
Bedeutung

Neben den Umweltproblemen bei der Rohstoffförderung rückt auch immer mehr das politische und soziale Umfeld, das mit der Förderung verbunden ist, in den Fokus von Politik und Wirtschaft. Dabei geht es vor allem um bessere Arbeitsbedingungen, aber auch um kriegerische Auseinandersetzungen, die sich über den Verkauf von Schürfrechten und Rohstoffen finanzieren. In Folge des G8-Gipfels 2007 in Heiligendamm, Deutschland, wurde ein Prozess in Gang gesetzt, an dessen Ende zertifizierte Handelsketten zwischen Bergbau und verarbeitender Industrie stehen sollen. Ziel ist es, Nachhaltigkeit und Transparenz bei der Gewinnung mineralischer Rohstoffe, bei ihrem Handel und den damit verbundenen Finanzströmen zu unterstützen. In diesem Zusammenhang werden auch analytische Verfahren diskutiert, um nachzuweisen, ob der Rohstoff aus zertifizierten Abbaugebieten oder aus einer Krisenregion stammt. Ein für Rohstoffe völlig neuer Ansatz, mit dem Verbraucher, ähnlich wie im Lebensmittelbereich, die Möglichkeit bekommen werden, höhere Standards von Handel, Herstellern und Rohstofflieferanten zu belohnen.

#### *Steigerung der Ressourceneffizienz*

Ressourcen- und  
Energieeffizienz  
spart Rohstoffe und  
reduziert Emissionen

Die Erhöhung der Ressourcen- und Energieeffizienz ist ein zentrales Thema für alle Unternehmen. Diese Strategie bietet die Möglichkeit, sowohl Rohstoffe einzusparen, als auch Emissionen zu reduzieren. Dabei ist es unerlässlich, die globale Dimension der Ressourceneffizienz einzubeziehen. Wird nur die Rohstoffproduktivität eines Landes betrachtet – ein Indikator der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie –, so werden Faktoren wie die Verlagerung von Wertschöpfung und Umweltauswirkungen ins Ausland nicht berücksichtigt. Im Gegensatz dazu liefern Lebenszyklusanalysen länderübergreifend auf jeder Stufe der Wertschöpfungskette Input-/Output-Analysen, die als Grundlage zur Verbesserung der Ressourceneffizienz dienen können. Dabei gibt es viele Ansatzpunkte im Produktionsprozess: Beginnend bei einer optimierten Produktgestaltung über den Einsatz neuer Werkstoffe und Verfahren wie der Nanotechnologie, der weißen Biotechnologie oder überkritischer Fluide lassen sich auf jeder Stufe des Herstellungsprozesses Einsparpotenziale erschließen. Auch die Anwendung bionischer

Prinzipien trägt zur Steigerung der Ressourceneffizienz bei. Dabei lohnt es sich, die Wertschöpfungskette vom Ende her nach Potenzialen zu untersuchen, da sich Effizienzgewinne direkt auf alle vorgelagerten Stufen auswirken. So bedeutet z. B. ein geringerer Papierverbrauch auch weniger oder kleinere Produktionsanlagen sowie weniger Chemikalien, Wasser, Energie und Rohstoffe (Wälder).

#### *Erhöhung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen*

Die Verteuerung der Rohstoffe in den letzten Jahren hat auch der Recyclingbranche neue Perspektiven eröffnet. So stieg der Preis für Stahlschrott aufgrund der starken Nachfrage aus China seit Mitte 2003 bis Mitte 2007 um annähernd 250 %. Der Einsatz von Sekundärrohstoffen und Recycling ist nicht nur durch die Materialeinsparungen attraktiv, sondern auch durch die mit dem Recycling verbundenen Energieeinsparungen. So wird geschätzt, dass der Einsatz von Sekundärrohstoffen anstelle der Primärstoffe für Stahl, Aluminium, Brennstoffe, Verpackungen und Zink in Deutschland 2005 zu einer zusätzlichen Wertschöpfung von 3,7 Mrd. Euro geführt hat. Dabei entfallen rund zwei Drittel auf die damit verbundenen Energieeinsparungen. Eines der wichtigsten Kriterien für die Einsatzmöglichkeiten von Sekundärrohstoffen ist deren Qualität. Die Kunst besteht darin, die Qualitätsanforderungen der Nachfrager mit möglichst effizienten Verfahren zu erreichen. Mit immer präziseren Messmethoden versucht die Recyclingbranche schon bei der Sortierung, eine möglichst große Stoffqualität sicherzustellen. Mit der sensorgestützten Sortierung können bisher ungenutzte Stoffeigenschaften gleichzeitig für eine Sortierung verwendet werden.

Sekundärrohstoffe  
sparen Material und  
Energie

Zentraler Ansatzpunkt für die weitere Erhöhung von Recyclingquoten ist auch hier das Produktdesign. Die Auswahl der Rohstoffe ist hierbei von ebenso großer Bedeutung wie deren Verarbeitung. Aber auch eine möglichst hohe Recyclingquote ist nicht immer die beste Lösung für die Umwelt. Es gilt stets die Gesamtbilanz aus Rohstoffbereitstellung, Produktion, Nutzung und Entsorgung zu betrachten, um Umweltauswirkungen zu minimieren. So könnten die hohen gesetzlichen Recyclingquoten im Automobilbereich dazu führen, dass mehr Metalle statt Kunststoffe bei der Fertigung zum Einsatz kommen. Das damit verbundene höhere Fahrzeuggewicht würde dann über die Nutzungsdauer in der Summe eine höhere Umweltbelastung bedeuten.

Zentraler  
Ansatzpunkt für die  
weitere Erhöhung von  
Recyclingquoten ist  
das Produktdesign

#### *Substitution knapper Rohstoffe*

Eine andere Möglichkeit, auf die Knappheit bzw. steigende Preise von Rohstoffen zu reagieren, ist die Substitution eines Rohstoffs durch einen anderen Rohstoff, durch einen neuen Werkstoff mit vergleichbaren Eigenschaften oder durch eine komplett neue Anwendung, die den Rohstoff überflüssig macht. Substitution sollte aber nicht nur dazu dienen, kurzfristige Schwankungen der Rohstoffpreise und -verfügbarkeit

Substitution knapper  
Rohstoffe durch  
andere, wenn möglich  
ökologischere  
Rohstoffe

Ziel ist die langfristige Flexibilisierung des Materialeinsatzes

abzufedern, sondern vor allem langfristig zur Flexibilisierung des Materialeinsatzes in den Verarbeitungsstufen der Wertschöpfungskette beitragen sowie die Nachhaltigkeit durch den Einsatz ökonomisch und ökologisch vorteilhafter Materialien fördern. Dies gilt auch für die Substitution fossiler Energieträger durch Biomasse. Die unterschiedlichen Verwendungszwecke, das beschränkte Angebot und die Umweltauswirkungen der Nutzung von Biomasse erfordern einen strategischen Ansatz, um eine nachhaltige Nutzung sicherzustellen. Denn Biomasse ist als nachwachsender Rohstoff erneuerbar und in diesem Sinne unerschöpflich, die jährlichen Fördermengen sind jedoch beschränkt.

Große Chancen für Anbieter moderner umweltschonender Technologien

#### *Neue Spielräume für innovative Technologien und Geschäftsmodelle*

Die Zeit zur Umsetzung der Strategien gegen Rohstoffknappheit drängt. Die Weltbevölkerung wird nach aktuellen Prognosen bis zum Jahr 2050 auf ca. 9 Mrd. Menschen anwachsen. Das bedeutet nicht nur eine erhebliche Belastung für die Rohstoffversorgung, sondern auch für die Aufnahmefähigkeit der Umwelt. Denn nicht nur Rohstoffquellen sind beschränkt, sondern auch die Aufnahmekapazität der Senken. Die Nutzung fossiler Ressourcen wie Erdöl und Kohle wird heute weitaus intensiver unter dem Aspekt des Klimawandels – also der Aufnahmefähigkeit der Atmosphäre für CO<sub>2</sub> – diskutiert als unter reinen Rohstoffaspekten. Mit dem Handel von CO<sub>2</sub>-Emissionszertifikaten wird derzeit versucht, ein weltweites System zu installieren, das CO<sub>2</sub>-Emissionen genau wie Rohstoffen einen Preis zuschreibt. Das heißt, entlang der Wertschöpfungskette müssen Unternehmen nicht nur die Kosten für ihre Ausgangsprodukte, sondern auch für CO<sub>2</sub>-Emissionen in die knappe Senke Atmosphäre berücksichtigen. Die Schwellenländer, allen voran China, investieren derzeit massiv in die heimische Infrastruktur. Indien hat ebenfalls einen erheblichen Aufholbedarf. Die neugeschaffenen Infrastrukturen werden den Ressourcenverbrauch und die Umweltbelastungen in diesen Ländern entscheidend prägen. Das ist eine große Chance für alle Unternehmen, die moderne umweltschonende Technologien anbieten.

Wichtige Rolle des Finanzsektors

Der Finanzsektor wird in diesem Bereich eine wichtige Rolle spielen. Es gilt, langfristige Finanzierungsinstrumente zu entwickeln, die nicht nur die bilanzierten Kosten, sondern auch die Rohstoffbilanz, politische und soziale Belange sowie die Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus der Investition berücksichtigen.

Die Verantwortung für die Wertschöpfungskette endet heutzutage nicht mehr bei den direkten Geschäftspartnern. Vor allem Handelsunternehmen achten verstärkt darauf, dass bis hinunter zum Beginn der Wertschöpfungskette Umwelt- und Sozialstandards eingehalten werden. Aber auch Rohstofflieferanten und Hersteller müssen sich in Zukunft intensiver mit der Wertschöpfungskette beschäftigen und ihre Geschäftsmodelle überdenken. Ein Automobilhersteller, der nur

möglichst viele Automobile verkaufen will, wird in den Schwellenländern auf lange Sicht an Grenzen stoßen – sowohl in Hinblick auf Ressourcen als auch auf die Aufnahmefähigkeit der Umwelt (Senken). Ein Ausweg könnten Mobilitätsdienstleistungen sein, bei denen nicht das Produkt, sondern Komfort und Zeit im Mittelpunkt stehen. Auch wer Rohstoffe und Energie einfach „nur“ verkauft, läuft Gefahr, durch effiziente Technologien oder Substitution vom Markt verdrängt zu werden. Anbieter in der Chemiebranche und im Energiesektor reagieren bereits mit Dienstleistungen für die nachgeschaltete Wertschöpfungskette. Sie bieten Dienstleistungen für Prozesse beim Hersteller – von der Bereitstellung von Rohstoffen und Energie bis zum Recycling. Hier geht es also wie bei den Mobilitätsdienstleistungen um das Prinzip Nutzen statt Besitzen. Durch dieses Prinzip entfällt der Anreiz, möglichst große Mengen an Rohstoffen zu verkaufen. Profitabler ist deren möglichst effiziente Nutzung.

Die Rohstoffknappheit entpuppt sich also nicht als eigentliches Problem. Unser Umgang mit den Rohstoffen ist die entscheidende Frage. Die derzeitige Rohstoffknappheit und die damit verbundenen hohen Rohstoffpreise zwingen Wirtschaft, Politik und Verbraucher dazu, sich dieser Frage zu stellen. In dieser Situation eröffnen sich neue Spielräume für Innovationen bei Rohstoffförderung, Ressourceneffizienz, Recycling und Substitution.

Durch das Prinzip Nutzen statt Besitzen entfällt der Anreiz möglichst große Mengen an Rohstoffen zu verkaufen

Nicht die Rohstoffknappheit ist das eigentliche Problem sondern unser Umgang mit Rohstoffen



## EINLEITUNG

In den letzten zwei Jahren jagte eine Meldung über leergefegte Rohstoffmärkte die andere. Kaum ein Tag verging, ohne dass eine größere deutsche Tageszeitung die angespannte Situation auf dem Stahlmarkt, die historische Preis-Hausse bei Erdöl oder die steigenden Verbraucherpreise für Milchprodukte beklagt hätte.

Doch gleichzeitig gibt es Studien, die darauf hindeuten, dass viele der Rohstoffe noch viele Jahre verfügbar sein werden. Rohstoffknappheit ist eine Frage der Perspektive und der betrachteten Zeitskala:

Rohstoffknappheit -  
eine Frage der  
Perspektive und der  
betrachteten  
Zeitskala

Kurzfristig können Rohstoffe knapp sein, was sich entsprechend in Preisschwankungen niederschlägt. Nicht umsonst werden viele Rohstoffe an der Börse gehandelt. Für ein Unternehmen, das für seine Produktion auf bestimmte Rohstoffe angewiesen ist und gleichzeitig kaum Möglichkeiten hat, Preissteigerungen an den Kunden weiterzugeben, kann die Rohstofffrage zur Überlebensfrage werden.

Mittelfristig können Knappheiten durch Nachfragetrends ausgelöst werden, die z. B. im Bergbau durch Investitionsverzögerungen und hinterherhinkenden Ausbau der Förderkapazitäten erst verzögert abgedeckt werden können. Die seit Jahren zunehmende Rohstoffnachfrage aus China gilt als eine wichtige Ursache für den in den letzten Jahren beobachteten Preisanstieg vieler Schlüsselrohstoffe wie Stahl oder Kupfer.

Langfristig – also im Bereich von Dekaden – können solche Engpässe durch Innovation, Erschließung neuer Rohstoffquellen und Förderkapazitäten ausgeglichen werden. Dennoch wird seit Jahrzehnten für einige Rohstoffe die Frage einer absoluten Endlichkeit diskutiert. Die Diskussion um „Peak Oil“ – den Scheitelpunkt der Erdölförderung und das daraus prognostizierte Ende der Ölvorräte – ist ein prominentes Beispiel für diese Debatte (siehe Kapitel 1.2.2).

Im Zuge der Umwelt- und Nachhaltigkeitsdiskussion betrifft die eigentliche Knappheit oft nicht den Rohstoff an sich, sondern die Fähigkeit der Ökosysteme, Abfallprodukte aus der industriellen Produktion und dem Verbrauch von Produkten aufzunehmen. Besonders deutlich wird dies beim Klimaschutz: Selbst wenn die fossilen Rohstoffvorräte noch lange ausreichen sollten, besteht aufgrund der Klimaschutzziele und der Vorgaben zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen derzeit großer Handlungsbedarf zu einer Substitution fossiler Energierohstoffe durch andere Formen der Energieerzeugung und -nutzung. Es wird derzeit aus Klimaschutzgründen nach Möglichkeiten gesucht, die Energieversorgung auf kohlenstofffreie und -arme Technologien umzustellen. Für Unternehmen stellen häufig die Vorgaben und Auflagen zur Entsorgung (z. B. EU-Richtlinie über Altfahrzeuge, EU-Richtlinie über Elektro- und Elektronik-Altgeräte) einen stärkeren

Aufnahmefähigkeit  
von Ökosystemen

Anreiz zur Umstellung von Produktlinien und Produktionsverfahren dar als die temporäre Knappheit von Rohstoffen.

Rohstoffknappheit wird zu einem zentralen politischen und gesellschaftlichen Thema

Insgesamt lässt sich aus den Recherchen im Rahmen der vorliegenden Studie erkennen, dass das Thema Rohstoffknappheit in rohstoff-abhängigen Branchen derzeit ganz oben auf der Tagesordnung steht. Die Öffentlichkeit ist durch die hohen Spritpreise und die Diskussion um den Klimawandel bereits sensibilisiert. Rohstoffknappheit wird in Verbindung mit den Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft in den kommenden Jahren neben dem Klimawandel zu einem zentralen politischen und gesellschaftlichen Thema werden.

Studie untersucht Ursachen und Strategien

Die vorliegende Studie befasst sich mit den Ursachen und möglichen Innovationsstrategien gegen Rohstoffknappheit. Unter **Rohstoffen** werden i. a. diejenigen natürlichen Ressourcen verstanden, die bis auf die Lösung aus ihrer natürlichen Quelle noch keine Bearbeitung erfahren haben [Endres und Querner 2000]. Sie werden aufgrund ihres Gebrauchswertes aus der Natur gewonnen und entweder direkt konsumiert oder als Arbeitsmittel und Ausgangsmaterialien für weitere Verarbeitungsstufen in der Produktion verwendet.

Dies schließt metallische, mineralische, fossile oder nachwachsende (biologische) Ressourcen mit ein. Nicht eingeschlossen in dieser Definition sind hingegen Medien wie Wasser und Luft.

Für die Beschreibung und Definition der **Verfügbarkeit** von Rohstoffen existieren zwei Definitionen:

**Ressourcen** sind diejenigen Mengen eines Rohstoffs, die zwar nachgewiesen sind, deren Extraktion jedoch gegenwärtig wirtschaftlich oder technologisch noch nicht angezeigt oder möglich sein muss.

Die **Reserven** bilden jene Teilmenge der Ressourcen, die gegenwärtig bereits wirtschaftlich gewinnbar ist.

Das Verhältnis von Reserven bzw. Ressourcen und der jährlichen Fördermenge wird als **Reichweite** bezeichnet und sehr häufig dazu benutzt, um abzuschätzen, für wie viele Jahre ein bestimmter Rohstoff noch vorhanden sein wird [Frondele 2005].

In der Praxis werden die Begriffe „Rohstoff“ und „Ressource“ häufig synonym verwendet und nicht scharf voneinander abgegrenzt; oft werden noch Zusätze zur weiteren Eingrenzung verwendet, z. B. mineralische Rohstoffe, metallische Rohstoffe, natürliche Ressourcen.

1. Teil der Studie: Ursachen und Auswirkungen der Rohstoffknappheit

Die Studie zeigt im ersten Teil anhand ausgewählter Beispiele, wie Rohstoffknappheiten entstehen und was Folgen dieser Knappheit sein können. Angefangen bei der aktuell hohen Nachfrage, die die Märkte durcheinander wirbelt, über die Auswirkungen hoher Preise auf die Exploration bis zu den Konsequenzen für das verfügbare Angebot. In den Unterkapiteln werden häufige Fragen zu diesem Thema behandelt und in einem kurzen Fazit gebündelt.



---

Im zweiten Teil der Studie werden vier Innovationsstrategien vorgestellt, mit denen Akteure den Herausforderungen der Rohstoffknappheit begegnen können: Erschließung neuer Rohstoffquellen, Steigerung der Ressourceneffizienz, Erhöhung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen sowie Substitution knapper Rohstoffe. In Unterkapiteln werden exemplarisch Technologien und Verfahren für Exploration, Produktion und Recycling vorgestellt, die einer Rohstoffknappheit entgegenwirken können.

2. Teil der Studie:  
Innovationsstrategien  
gegen  
Rohstoffknappheit



# 1 ROHSTOFFKNAPPHEIT - MYTHOS ODER REALITÄT?

## 1.1 Konsum / Nachfrage

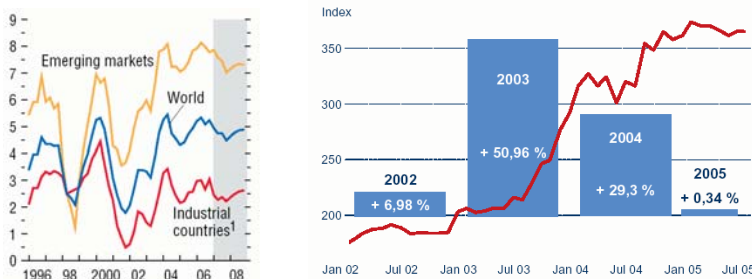
### 1.1.1 Der globale Rohstoffbedarf - Welche Trends zeichnen sich ab?

Das Jahr 2003 markierte einen Wendepunkt für die Rohstoffpreise. Nachdem die 1990er-Jahre für die meisten Rohstoffe durch niedrige Preise gekennzeichnet waren, begann 2003 eine Hausse. Die Preise kletterten bis in die erste Hälfte des Jahres 2006 auf Jahrzehnte nicht erreichte oder gänzlich neue Höchststände (siehe Abbildung 1, rechts). Dabei handelt es sich nicht um Engpässe einzelner Rohstoffe, sondern um eine übergreifende Entwicklung, deren Ursache in der erhöhten Rohstoffnachfrage der Schwellenländer zu suchen ist [Fronde! 2005]. Die alte Faustregel, dass 20 % der Menschheit in Europa, Nordamerika und Japan mehr als 80 % der Weltbergbauproduktion konsumieren, gilt nicht mehr. Ein Strukturwandel hat sich vollzogen: Mit China und Indien sowie anderen bevölkerungsreichen Schwellenländern ist heute über die Hälfte der Weltbevölkerung an der Nachfrage nach Rohstoffen beteiligt [Wagner 2005].

Rohstoffpreise  
klettern auf  
Höchststände

Das globale Wirtschaftswachstum ist die treibende Kraft für die Entwicklung auf den Rohstoffmärkten. Das Wachstum des globalen BIP ist 2001 stark angestiegen und beträgt seit 2004 ca. 5 % pro Jahr, wobei ca. 7–8 % auf die Schwellenländer entfallen und das Wachstum in den Industriestaaten ca. 2–3 % beträgt (siehe Abbildung 1, links). Diese Entwicklung ist maßgeblich dafür verantwortlich, dass die Nachfrage nach Rohstoffen in den letzten Jahren stark zugenommen hat und in der Folge die Preise nach oben geschne!t sind (siehe Abbildung 1, rechts).

Das globale  
Wirtschaftswachstum  
ist die treibende  
Kraft



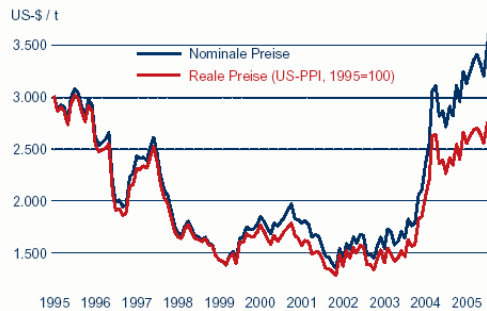
**Abbildung 1:** Links: Globale Wachstumsraten des BIP jeweils im Vergleich zum Vorjahr [IMF 2007]. Rechts: Veränderungen des CRB<sup>1</sup>-Metals Subindex zwischen 2002 und 2005 [Wagner 2005].

<sup>1</sup> Commodity Research Bureau.

Zyklus fallender und steigender Rohstoffpreise am Beispiel von Kupfer

Grund für den starken Preisanstieg ist die gestiegene Nachfrage in Verbindung mit den großen zeitlichen Verzögerungen bei der Anpassung der Rohstoffförderung.

Der Zyklus fallender und steigender Rohstoffpreise lässt sich aktuell sehr gut am Beispiel Kupfer nachvollziehen. Aufgrund von Überkapazitäten und des folgenden Preisverfalls für Kupfer seit der letzten Hausse 1995 wurden Lagerkapazitäten aufgebaut, die während des starken Anstiegs der Kupfernachfrage ab 2003 wieder abgebaut wurden (Mai 2004: 295.000 Tonnen Cu, Mai 2005: 112.000 Tonnen Cu in Lagern). In der Folge kam es Ende 2003 zu einem starken Preisanstieg, der sich in den kommenden Jahren fortsetzte. Von Ende 2005 bis 2007 haben sich die Preise nochmals mehr als verdoppelt.



**Abbildung 2: Entwicklung des Kupferpreises seit der letzten Preishausse 1995 [Wagner 2005].**

Hohe Kupferpreise führen zu Kupferkabel-diebstählen

Im Oktober 2007 lag der Kupferpreis bei 650 Euro/100 kg. Durch das hohe Preisniveau scheinen der Diebstahl und der illegale Handel mit Kupfer für Kriminelle zu einem lukrativen Geschäft geworden zu sein. Während im Jahr 2005 in Niedersachsen landesweit 170 Kupferdiebstähle registriert wurden, waren es 2006 bereits dreimal so viele. Vor allem Kupferkabel werden im großen Stil gestohlen. So ging am 13.06.06 auf der Bahnstrecke Düsseldorf-Essen-Dortmund nichts mehr. Unbekannte Täter hatten Signalkabel aus Kupfer entwendet und so den Zugverkehr lahmgelegt. Das LKA Niedersachsen geht davon aus, dass ein Großteil des gestohlenen Kupfers über Umwege nach China verschoben wird, da derzeit dort die Nachfrage am größten sei [Welt-Online 2006].

Kupferrecyclingrate liegt weltweit bei etwa 40 %

Aufgrund der steigenden Nachfrage sind bereits viele neue Explorationsvorhaben für Kupfer auf dem Weg. In den kommenden Jahren wird daher auch bei weiter steigender Nachfrage mit einer deutlichen Entspannung der Angebotssituation gerechnet [Wagner 2005]. Darüber hinaus ist Kupfer fast uneingeschränkt wieder verwertbar, die theoretische Recyclingquote beträgt nahezu 100 %. In der Praxis liegt die weltweite Recyclingquote seit Jahrzehnten konstant bei etwa 40 %. In Deutschland erreichte die Recyclingquote, das heißt das Verhältnis von

Kupferschrotteinsatz und jährlichem Kupferverbrauch, in den letzten Jahren Werte von 56 % [Fronde] 2005]. Die Diskrepanz zum theoretischen Wert von 100 % erklärt sich vor allem durch den Energieaufwand für die Sammlung und Reinigung, der mit einer weiteren Erhöhung der Recyclingquoten überproportional ansteigt. Das heißt, höhere Quoten sind nur durch effizientere Recyclingprozesse oder höhere Kupferpreise realisierbar.

Neben dem Wirtschaftswachstum ist auch der technische Wandel ein Treiber für Veränderungen der Nachfrage. So können neue Verfahren die Nachfrage nach einem Rohstoff erhöhen, aber auch vermindern, falls dadurch der Einsatz eines Rohstoffs verringert oder komplett überflüssig wird. Ein Beispiel für die Einflüsse des technischen Wandels auf die Nachfrage ist Tantal. Die Bedeutung von Tantal hat durch die Zunahme mikroelektronischer Anwendungen, wo Tantal in Kondensatoren eingesetzt wird, seit Anfang der 1990er-Jahre stark zugenommen. Die weltweite Fördermenge hat sich in den letzten 10 Jahren vervierfacht, auf rund 1.500 Tonnen im Jahr 2005. Die stark ansteigende Nachfrage führte ab dem Jahr 2000 zu Versorgungsengpässen und vorübergehenden Preissteigerungen. So stiegen die Preise 2001 von etwa 75 auf 495 US-\$ je kg. Infolgedessen kam es zu einem deutlichen Anstieg des Angebots, der für einen Rückgang der Preise auf das alte Niveau von 75 US-\$ je kg sorgte (siehe Abbildung 3). Bereits um das Jahr 1980 kam es zu einem vergleichbaren Anstieg und Abfall der Preise. Die erhöhte Nachfrage nach Tantal ließ damals sinkende Reserven erwarten, was zu einem starken Anstieg der Preise führte. Während der Hochpreisphase kam es zu Substitutionsreaktionen der Verarbeiter, wodurch die Nachfrage abgeschwächt wurde und sich die Preise in Folge steigender Lagerbestände wieder erholten (siehe Abbildung 3). In Folge der weiter zunehmenden Hochtechnologieanwendungen erwarten Experten bis zum Jahr 2025 eine Verdreifachung des derzeitigen Angebots an Primärtantal [Fronde] 2005].

Technischer Wandel als Treiber für veränderte Nachfrage - Beispiel Tantal

Weltweite Fördermenge von Tantal hat sich binnen 10 Jahren vervierfacht

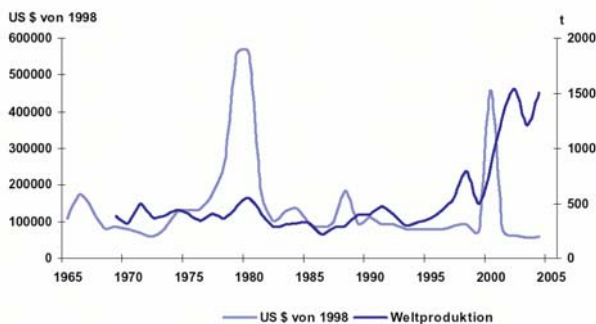


Abbildung 3: Weltförderung in t und realer Tantalpreis in US-\$/t [Fronde] 2005].

Ein Beispiel für einen bevorstehenden technischen Wandel ist der zukünftige Einsatz von RFID-Labels und der damit verbundene Anstieg

des Silberbedarfs. RFID-Antennen werden in der Regel mit silberhaltigen Pasten auf ein Trägermaterial gedruckt. Aluminium- und Kupferpasten wären zwar preisgünstiger, können aber wegen ihrer Oxidierbarkeit nicht verdruckt werden. Würden alle Verpackungen in Deutschland, die den grünen Punkt tragen, mit RFIDs ausgerüstet, dann kämen pro Jahr rund 200 Milliarden RFIDs in den Kreislauf. Allein das Silber für die Antennen würde den deutschen Silberbedarf um 70 % erhöhen und zusätzliche Entsorgungsprobleme schaffen [Scharf 2004].

Ansteigende  
Rohstoffnachfrage  
führt in der Regel zu  
steigenden Preisen

Eine ansteigende Rohstoffnachfrage führt in der Regel zu steigenden Preisen, da die Anbieter nicht schnell genug mit einer Erhöhung des Angebots reagieren können. Die Folge sind Reaktionen auf der Angebots- und Nachfrageseite, die dazu führen, dass die Preise auf längere Sicht wieder sinken.

Hohe Rohstoffpreise  
stimulieren  
Innovationen

So werden auf der Angebotsseite Rohstoffvorkommen, die aus Kostengründen nicht ausgebeutet werden konnten, wieder wirtschaftlich interessant und in der Folge erschlossen, wodurch sich das Angebot erhöht. Auf der Nachfrageseite kann die Situation zur Suche nach neuen Möglichkeiten führen, die Ressourceneffizienz zu steigern, die Recyclingquote zu erhöhen oder teure Rohstoffe durch andere Stoffe (Substitute) zu ersetzen. In allen vier genannten Fällen können hohe Rohstoffpreise den Einsatz neuer Technologien und innovativer Verfahren stimulieren.

Fazit: Sollte der strukturelle Wandel der Nachfrage durch die Schwellenländer anhalten, so wird dies einen Innovationsschub bei der Erschließung von Rohstoffquellen, Steigerung der Ressourceneffizienz, Erhöhung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen sowie Substitution knapper Rohstoffe zur Folge haben (siehe Kapitel 2).

### 1.1.2 Rohstoffhunger ohne Ende - Fegt Chinas boomende Wirtschaft die Märkte leer?

Immenser  
Rohstoffbedarf der  
boomenden  
chinesischen  
Wirtschaft

Auf der Suche nach den Ursachen für hohe Rohstoffpreise oder Versorgungsengpässe stößt man in den meisten Analysen auf eine einzige Ursache: den immensen Rohstoffbedarf der boomenden chinesischen Wirtschaft. Die meisten Handys und Radiogeräte weltweit werden in China hergestellt. Zwischen 1990 und 2000 hat sich dort die Produktion von Kühlschränken, Klimaanlage, Fernsehern und Videorecordern ver Hundertfacht [DRAG/Superzyklus 2007]. Laut DB Research sind die chinesischen Rohstoffimporte in den vergangenen 20 Jahren um das 20fache auf rund 200 Mrd. US-\$ angestiegen; bei vielen Rohstoffen – Metallen, Energierohstoffen, Agrarrohstoffen - führt China die globalen Ranglisten der größten Importeure an (UN COMTRADE-Daten).

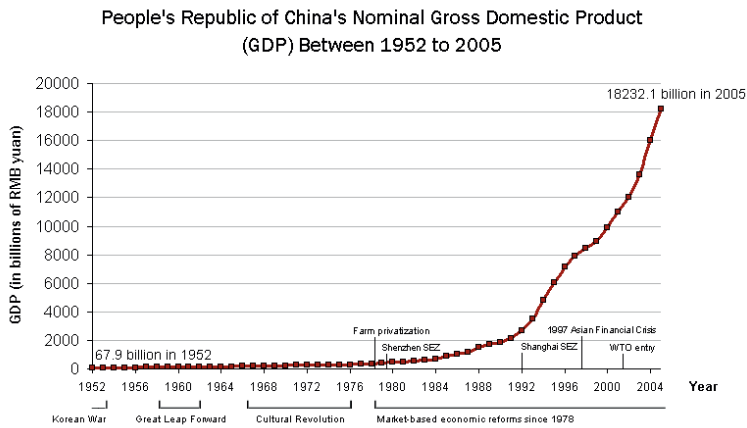


Abbildung 4: Entwicklung des nominalen Bruttosozialprodukts Chinas seit 1952 (Quelle: Wikipedia).

Das BIP der chinesischen Wirtschaft ist zwischen 1977 und 2004 real um 776 % gewachsen; zwischen 1980 und 2004 ist es jährlich um 10,6 % angestiegen [Fronde 2005]. Die meisten OECD-Länder brachten im gleichen Zeitraum nur ein Wachstum von 4,1 bis 5,6 % zu Stande. Abbildung 4 zeigt die gesamte Entwicklung seit 1952.

BIP der chinesischen Wirtschaft wuchs zwischen 1977 und 2004 real um 776 %

SITC-Nummer <sup>1</sup>	Rohstoff	Rang Chinas
281	Eisenerz und -konzentrate	1
285	Aluminium	1
287	andere Erze (Blei, Zink, Zinn, Mangan, sonstige)	1
282	Eisenschrott	2
283	Kupfer	2
284	Nickel	3
286	Uran	3
333	Rohöl	3

Tabelle 1: Chinas globaler Rang beim Importvolumen [US-\$ ] wichtiger Rohstoffe 2005 (Quelle: COMTRADE, UN Statistics Division, www.uncomtrade.org).

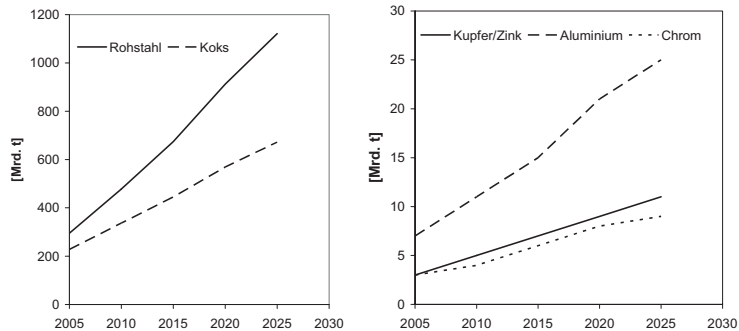
<sup>1</sup>Die Nummern beziehen sich auf das Internationale Warenverzeichnis für den Außenhandel. Diese Statistik-Klassifikation wurde von den Vereinten Nationen entwickelt und wird für die Einordnung von Gütern im Rahmen der Außenhandelsstatistik verwendet.

Dieser Anstieg der wirtschaftlichen Leistung geht mit einem immensen Anstieg des Rohstoffverbrauchs einher. China ist zwar selbst ein

rohstoffreiches Land, das einen Teil seines Bedarfs selbst decken kann, dennoch importiert es immer größere Anteile der Weltproduktion wichtiger Rohstoffe. 2004 war China der weltgrößte Importeur von Eisenerz, Managan, Blei und Chrom, der zweitgrößte Importeur von Kupfererzen [Trinh 2006] und der drittgrößte Importeur von Erdöl. Diese Entwicklung setzte sich 2005 fort (Tabelle 1).

Auch in Zukunft wird  
der Rohstoffbedarf  
Chinas weiter  
ansteigen

In Zukunft wird der Rohstoffbedarf Chinas sicher weiter ansteigen. Frondel et. al. haben für ausgewählte Rohstoffe den künftigen Bedarf Chinas (Zeithorizont 2025) abgeschätzt (Abbildung 5) [Fronde 2005]. Dabei wurden drei Szenarien untersucht, die sich im Verlauf des künftigen Wirtschaftswachstums (BIP) unterscheiden: Hoch (8 %), niedrig (4 %) und mittel (bis 2010 10 %, dann bis 2025 absinkend auf 4 %). Das mittlere Szenario wird dabei als das wahrscheinlichste angesehen. Nach diesem Szenario würde sich bis 2025 der Rohstahlbedarf Chinas vervierfachen; das Land würde weit mehr als die Hälfte des für 2025 geschätzten globalen Zinkangebots, 40 bis 50 % des Aluminiums und knapp 40 % des Kupfers benötigen. Bei Chrom würde China sogar mehr benötigen als nach Schätzung der Autoren im Jahr 2025 weltweit tatsächlich produziert würde (7,1 Mio. Tonnen).



**Abbildung 5: Abschätzung des künftigen chinesischen Verbrauchs einiger wichtiger Rohstoffe (Quelle: [Fronde 2005]; MEDIUM-Szenario).**

Auch wenn diesen Szenarien relativ einfache Trendextrapolationen zu Grunde liegen und z. B. Steigerungen der Ressourcenproduktivität nicht einberechnet sind, zeigen die Daten doch, dass in den nächsten 10 bis 15 Jahren China einen großen Anteil der globalen Rohstoffressourcen für sich benötigen könnte.

China betreibt eine  
gezielte  
Rohstoffpolitik

Vor dem Hintergrund dieser Prognosen betreibt China eine gezielte Rohstoffpolitik, die auf die langfristige Sicherung des Zugangs zu strategische wichtigen Rohstoffen ausgerichtet ist. Diese beinhaltet:

- Aufbau bilateraler Handelsbeziehungen zu rohstoffreichen Staaten. Dies schließt Investitionen in politisch instabile Regionen und Länder wie Sudan, Nigeria, Angola und Iran ein.
- Beteiligungen an ausländischen Explorationsvorhaben.



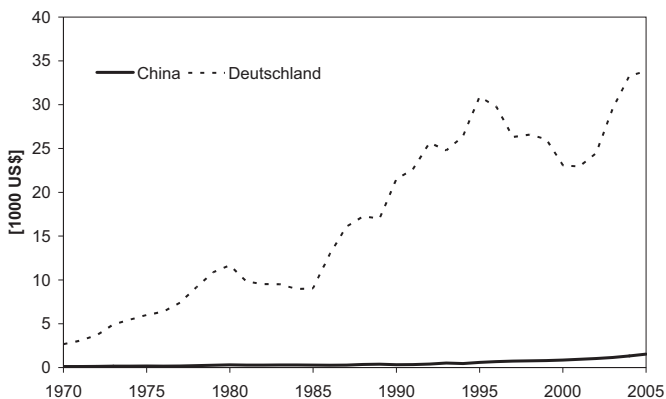
- Unternehmensbeteiligungen an Firmen aus dem Rohstoffsektor.

2005 ließen sich 30 % der chinesischen Investitionen im Ausland dem Rohstoffsektor zuordnen. 46 % aller grenzüberschreitenden Fusionen und Übernahmen durch chinesische Firmen im Zeitraum 1999–2005 fanden im Rohstoffsektor statt [Lunding 2006].

Dennoch relativiert sich der immense Rohstoffbedarf Chinas aus drei Gründen [Frondele 2005]:

- Der Pro-Kopf-Verbrauch Chinas ist immer noch deutlich niedriger als z. B. der Verbrauch Deutschlands. Dies wird deutlich, wenn man z. B. die Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts pro Kopf vergleicht (siehe Abbildung 6).
- China produziert nicht nur für den Eigenbedarf, sondern exportiert als „Werkbank der Welt“ einen großen Teil seiner Importe wieder in Form von Produkten.
- Bei vielen Rohstoffen ist die Importabhängigkeit Chinas viel niedriger als in anderen Ländern (z. B. Flussspat, Zink).

Chinas  
Rohstoffbedarf  
relativiert sich aus  
drei Gründen



**Abbildung 6: Vergleich des Bruttoinlandsprodukts pro Kopf Chinas und Deutschlands (Quelle: UN Statistics Division).**

Fazit: Die chinesische Rohstoffnachfrage ist ein Trend, der die aktuelle und künftige Situation auf den globalen Rohstoffmärkten prägt und prägen wird. Das Wachstum und die Entwicklung der Rohstoffintensität der chinesischen Wirtschaft in den kommenden Jahren werden Rohstoffpreise und -verfügbarkeit weltweit beeinflussen.

### 1.1.3 Rohstoffproduktivität - Indikator für mehr Effizienz?

Weltbevölkerung  
wächst um 50%

Global betrachtet sind Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum sowie die damit verbundenen Entwicklungen der Produktions- und Konsummuster die stärksten Antriebskräfte für den zunehmenden Ressourcenverbrauch. Der prognostizierte Anstieg der Weltbevölkerung um 50 % in den nächsten 50 Jahren wird den Druck auf unsere Umwelt noch zusätzlich verstärken. Konzepte zur Ressourceneffizienz<sup>2</sup> zeigen jedoch, dass die enge Kopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch kein Naturgesetz sein muss.

Entkopplung des  
Ressourcenverbrauchs  
vom  
Wirtschaftswachstum

Ziel zahlreicher nationaler Nachhaltigkeitsstrategien ist es daher, den Ressourcenverbrauch vom Wirtschaftswachstum zu entkoppeln. So steht z. B. in der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung [Bundesregierung 2002]: „Bis 2020 sollen die Energie- und die Rohstoffproduktivität gegenüber 1990 bzw. 1994 etwa verdoppelt werden“. Dies bedeutet, dass mit einer bestimmten Energiemenge im Jahr 2020 etwa doppelt so viel produziert werden müsste wie 1990. Langfristig soll sich die Verbesserung der Energie- und der Rohstoffproduktivität an der ‚Faktor 4‘-Vision orientieren. Inwieweit diese Ziele bereits umgesetzt werden konnten, zeigen die Zahlen zur Energie- und Rohstoffproduktivität im Indikatorenbericht zur deutschen Nachhaltigkeitsstrategie [Statistisches Bundesamt 2006]. Die Rohstoffproduktivität erhöhte sich zwischen 1994 und 2005 um 33,5 % (siehe Abbildung 7). Der Indikatorenbericht interpretiert die Zahlen wie folgt: „Bei rückläufigem Materialeinsatz (-13 %) stieg das Bruttoinlandsprodukt um 16 %. In den letzten Jahren (2000 bis 2005) hat sich der Anstieg der Produktivität etwas verlangsamt.“

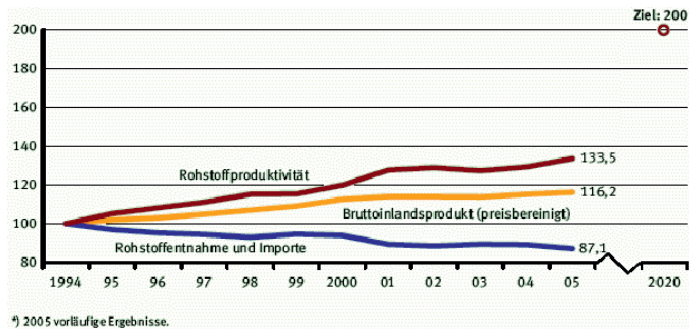


Abbildung 7: Rohstoffproduktivität und Wirtschaftswachstum in Deutschland von 1994–2005 (1994 = 100) [Statistisches Bundesamt 2006].

Der Indikator entwickelte sich zwar in die angestrebte Richtung, das bisherige Tempo würde jedoch nicht ausreichen, um das gesetzte Ziel zu erreichen. Die günstige Entwicklung der Rohstoffproduktivität in den letzten Jahren wird ausschließlich auf einen Strukturwandel hin zu

<sup>2</sup> z. B. das Konzept „Faktor vier“ [von Weizsäcker 1995]

weniger rohstoffintensiven Branchen zurückgeführt, nicht aber auf einen im Durchschnitt sparsameren Einsatz der Rohstoffe“.

Der Verlauf der Energieproduktivität war ähnlich. Die Energieproduktivität hat sich in Deutschland von 1990 bis 2006 um knapp 31 % erhöht. Dieser Produktivitätsanstieg signalisiert zwar einen effizienteren Energieeinsatz, hat aber im Endeffekt nur zu einem relativ schwachen absoluten Rückgang des Energieverbrauchs um 3 % geführt. Die Effizienzsteigerung wurde durch ein Wirtschaftswachstum von rund 27 % weitgehend aufgezehrt. Darüber hinaus erhöhte sich die Importabhängigkeit im Energiebereich deutlich mit einem Importanteil von 74 % im Jahr 2005 gegenüber 57 % im Jahr 1990.

Rohstoff- und Energieproduktivität entwickeln sich günstig in Deutschland

Des Weiteren stellt der Indikatorenbericht fest: „Bedeutsam für die Interpretation der Entwicklung des Rohstoffindikators ist auch, dass der Materialbedarf zunehmend durch Importe gedeckt wird. Während die Entnahme von Rohstoffen im Inland zwischen 1994 und 2005 um 267 Millionen Tonnen (-24 %) zurückgegangen ist, stieg die Einfuhr von Rohstoffen sowie Halb- und Fertigwaren um 73 Millionen Tonnen (+19 %). Der Anteil der importierten Güter am gesamten Primär Materialeinsatz erhöhte sich damit von 26 % im Jahre 1994 auf fast 36 % im Jahre 2005. Quantitativ bedeutsam sind bei dieser Verlagerung insbesondere die gestiegenen Importe von metallischen Halb- und Fertigwaren (+49 %) sowie die Ablösung von heimischer Steinkohle und Braunkohle durch importierte Energieträger. Die inländische Natur wird also zunehmend geschont und die Umweltbelastungen, die mit der Entnahme von Rohstoffen und ihrer Weiterverarbeitung zu Halb- und Fertigwaren verbunden sind, werden in das Ausland verlagert“ [Statistisches Bundesamt 2006].

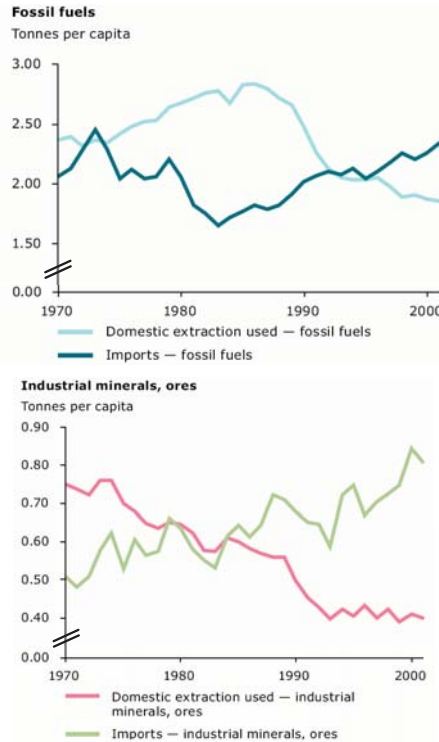
Materialbedarf wird zunehmend durch Importe gedeckt

Die inländische Natur wird geschont und Umweltbelastungen ins Ausland verlagert

Für Europa ergibt sich ein ähnliches Bild. Im letzten Jahrzehnt ist es Europa vergleichsweise gut gelungen, wirtschaftliches Wachstum vom Rohstoff- und Energieverbrauch abzukoppeln. Die absolute Ressourcennutzung ist jedoch konstant geblieben. Dabei gibt es innerhalb der EU-Länder erhebliche Unterschiede hinsichtlich der Materialintensität<sup>3</sup>. Die Spanne reicht von etwa 11 bis unter 1 kg/Euro BIP. Diese Unterschiede lassen sich teilweise durch die unterschiedliche wirtschaftliche Bedeutung von Industrie und Dienstleistungen in diesen Ländern erklären. Trotzdem ist die Ressourcen- und Energieproduktivität Westeuropas im Mittel viermal so groß wie die der neuen EU-Mitgliedstaaten. Dort gibt es also ausreichend Möglichkeiten, das Gleichgewicht der Ressourcenproduktivität zwischen EU-15 und EU-10 durch Technologietransfers und andere Maßnahmen zu verbessern [EEA 2005]. Auch in Europa geht ein großer Teil der Entkopplung auf die Verlagerung von Wertschöpfung und somit

<sup>3</sup> Materialintensität = Quotient aus Materialaufwand und Bruttoinlandsprodukt.

Zunahme von Importen zurück. Abbildung 8 zeigt die Entwicklung für fossile Brennstoffe, Mineralien und Erze in den EU-15 von 1970–2001 [EEA 2005/1]. In beiden Fällen werden mittlerweile mehr Rohstoffe importiert als aus heimischen Quellen gewonnen werden.



**Abbildung 8:** Verwendung von heimischen Rohstoffen und Rohstoffimporten in Europa. Entwicklung für fossile Brennstoffe sowie Mineralien und Erze in den EU-15 von 1970–2001 [EEA 2005/1].

Verringerung von  
Umweltauswirkungen  
erstrebenswert

In der fehlenden Berücksichtigung der Verlagerung rohstoffintensiver Prozesse in andere Länder sehen Experten ein weiteres Manko des Indikators Rohstoffproduktivität. Die unterschiedlichen Umweltauswirkungen von Rohstoffen und die Art und Weise ihrer Verwendung werden nicht betrachtet. Außerdem sind nicht alle Ressourcen gleichermaßen knapp (siehe Kapitel 1.3.3). So betont auch die Europäische Kommission in einem Strategiepapier zum Umgang mit natürlichen Ressourcen, dass der Fokus auf der Verringerung der Umweltauswirkungen liegen sollte [EU 2003]. Die Umweltauswirkungen von Rohstoffen zu messen, ist allerdings alles andere als einfach. Viele Rohstoffe werden benutzt, um unterschiedlichste Produkte herzustellen, die unterschiedliche Lebenszyklen besitzen und in den Phasen ihres Lebenszyklus unterschiedliche Umweltauswirkungen haben [EEA 2005/1]. In einer Vorstudie der Universität Leiden wurden die Materialklassen der EU-27 (+ Türkei) ermittelt, die die größten

Umweltauswirkungen haben. Dabei wurden Materialflüsse und Lebenszyklusanalysen miteinander kombiniert [van der Voet 2004].

1. Tierprodukte	6. Steinkohle zur Stromerzeugung
2. Kulturpflanzen	7. Braunkohle zur Stromerzeugung
3. Plastik	8. Eisen und Stahl
4. Öl zum Heizen und Transport	9. Gas zum Heizen
5. Beton	10. Papier und Pappe

Tabelle 2: Materialklassen der EU-27 (+ Türkei) mit den größten Umweltauswirkungen. Die nächsten Materialien auf der Liste waren: Glas, Öl zur Stromerzeugung, Aluminium, Keramik, Gas zur Stromerzeugung, Lehm, Blei, Nickel, Steinkohle zum Heizen und Zink [van der Voet 2004].

Diese ersten Schritte geben einen Hinweis, wo prioritäre Handlungsfelder für eine weitere Entkopplung liegen könnten, die auch andere Länder und Umweltauswirkungen umfassen muss.

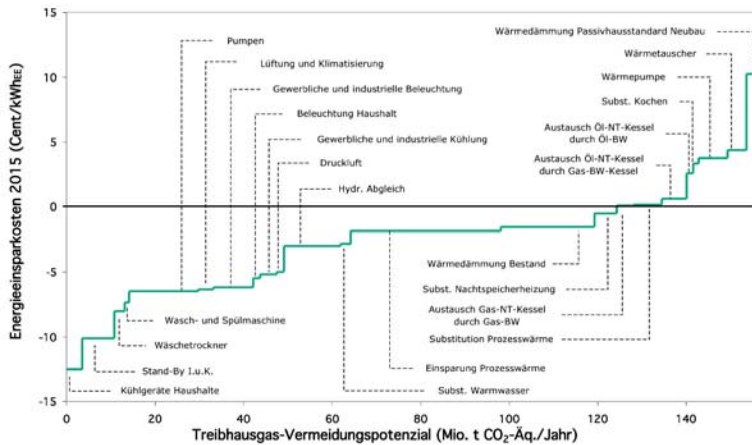


Abbildung 9: Energieeffizienzsteigerung bzw. Treibhausgasreduktion durch Querschnittstechnologien [Thomas 2006].

Im Bereich Energieeffizienz wurden typische Querschnittstechnologien auf ihr Energieeffizienzsteigerungs- und Treibhausgas-minderungspotenzial untersucht und dabei auch die Kostensenkungen durch die Energieeinsparungen ausgewiesen (bzw. Kostensteigerungen bei unter derzeitigen Rahmenbedingungen noch nicht wirtschaftlichen Optionen) [Thomas 2006]. Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse im Überblick. Eine Analyse wichtiger Querschnittstechnologien auf ihr jeweiliges Potenzial zur Steigerung der Ressourceneffizienz und Entlastung der Umwelt steht noch aus. An diesem Punkt besteht dringender Forschungsbedarf [Kristof 2007].

Querschnittstechnologien sollten auf ihr Potential zur Steigerung der Ressourceneffizienz und Entlastung der Umwelt untersucht werden

Fazit: Die nationale Rohstoffproduktivität oder auch Energieproduktivität sind keine ausreichenden Indikatoren für mehr Ressourceneffizienz und Umweltschutz. Sie vernachlässigen sowohl die Verlagerung von Wertschöpfung ins Ausland als auch die unterschiedlichen Umweltauswirkungen von Rohstoffen. Ziel sollte nicht die Entkopplung von Wachstum und Ressourcenverbrauch, sondern die Entkopplung von Wachstum und Umweltauswirkungen sein. Dazu ist es notwendig, Umweltauswirkungen von Produkten über den gesamten Lebenszyklus von der Rohstoffgewinnung über die Produktion und Nutzung bis zur Entsorgung zu bewerten.

## 1.2 Exploration / Förderung

### 1.2.1 Rohstoffförderung - ein schmutziges Geschäft?

Bergbau belastet die  
Umwelt besonders  
stark

Der Bergbau zählt zu den Wirtschaftssektoren, die die Umwelt besonders stark belasten. Während des gesamten Betriebs eines Bergbauvorhabens sowie durch die Aufbereitung der Erze entstehen Umweltprobleme.

Zerstörung  
natürlicher  
Lebensräume durch  
Exploration

Die Exploration neuer Standorte verlagert sich zunehmend in dünn besiedelte Gebiete mit hoher biologischer Vielfalt und vom Menschen noch unbeeinflusste Habitate und führt so zur **Zerstörung natürlicher Lebensräume**. Durch die Erkundung und Erschließung neuer Standorte für den Bergbau kommt es – oft schon im Vorfeld der Entwicklung der Mine – zu einer Neubesiedlung der näheren Umgebung. Zur Versorgung mit Nahrung, Brenn- und Baumaterial greifen diese Siedler häufig auf vor Ort vorhandene natürliche Ressourcen zurück, was zu einer Schädigung der Ökosysteme führt.

Abraumaterial als  
Gefahr für Böden  
und Grundwasser

Im Laufe der Förderung des Erzes entstehen große Mengen von **Abraummaterial**, die meist über Tage gelagert werden und damit auch in Konkurrenz zu anderen Landnutzungsformen stehen. Diese Abraumhalden sind Angriffspunkte für Wind- und Wassererosion und können aufgrund ihres Gehalts an Schwermetallen zur Kontamination von Boden und Grundwasser führen. Schlecht gesicherte Abraumhalden können Wasserläufe mit Sedimentmaterial belasten und flussabwärts gelegene Bereiche mit häufig kontaminierten Schlämmen und Sanden überschwemmen. Weltweit gibt es etwa 3.500 Abraumhalden [MMSD 2002].

Die Entstehung **saurer Sickerwässer** ist ein häufiges Problem im Bergbau, wenn sulfidische Erze auf gut durchlüfteten Halden oxidieren und dabei Schwefelsäure freigesetzt wird. Durch die Säure werden gleichzeitig auch Schwermetalle aus dem Erz gelöst. Dabei kommt es zu einer hohen Säurebelastung der umliegenden Gewässer. Bislang ist noch nicht vollständig geklärt, unter welchen Umständen es zu einer

Säurebildung in den Abraumhalden kommt – doch wenn der Prozess einmal eingesetzt hat, ist er nur schwer zu stoppen.

Häufig bilden alte Bergbaustandorte **Altlastenflächen**, die durch radioaktive oder schwermetallhaltige Gesteine kontaminiert sind. Zum Teil lassen sich diese Flächen durch Rekultivierungsmaßnahmen wieder nutzbar machen oder die Gefährdungen durch offen liegendes Abraummaterial reduzieren.

Alte  
Bergbaustandort  
sind häufig  
Altlastenflächen

Ein besonderes Problem stellt der Einsatz von Quecksilber bei der Goldextraktion in Kleinstbetrieben (meistens 1-Mann- oder Familienunternehmen) dar. Immerhin 20–30 % der globalen Goldförderung (500–800 t/a) werden so gewonnen. Die Goldamalgamierung ist eine schnelle, billige und einfache Methode, die deshalb bevorzugt von diesen kleinen Betrieben eingesetzt wird. Dabei ist die Effizienz der Methode gering: Um ein Gramm Gold zu gewinnen, werden etwa 1–3 Gramm Quecksilber in die Umwelt freigesetzt [UNIDO 2006].

Gewinnung von einem  
Gramm Gold entlässt  
drei Gramm  
Quecksilber in die  
Umwelt

Etwa ein Drittel der globalen Quecksilberemissionen gehen auf dieses Einsatzgebiet zurück; viele der Minenstandorte sind dauerhaft kontaminiert. Etwa 300 Tonnen Quecksilber werden pro Jahr in die Atmosphäre entlassen, etwa 700 Tonnen jährlich geraten in Form von Schlämmen direkt in die Böden und Gewässer [UNIDO 2006]. Das von den Vereinten Nationen ins Leben gerufene „Global Mercury Project“ hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2017 den Einsatz von Quecksilber im Bereich der Goldgewinnung weltweit um 50 % zu reduzieren.

Als Alternative zum Amalgamierungsverfahren wird die Cyanidlaugung eingesetzt, die jedoch auch mit Belastungen für Mensch und Umwelt verbunden ist, wenn die Cyanidlauge nicht anschließend entsprechend aufbereitet wird. Anfang 2000 führten starke Unwetter und die Schneeschmelze dazu, dass im nordrumänischen Baia Mare über 100.000 m<sup>3</sup> cyanidhaltige Schlämme aus einem Sedimentationsbecken aus der Goldaufbereitung in die Theiss flossen. Dies führte entlang einer Strecke von 1.000 km zu einem Fischsterben; auch zahlreiche Tierarten der höheren Stufen der Nahrungskette wie Fischadler oder Fischotter, starben. Entlang der Theiss wurde die gesamte Fischotterpopulation (400 Individuen) ausgerottet [WWF 2000]. Viele der Trinkwasserbrunnen entlang des Flusses waren für die Anrainer nicht mehr benutzbar. Langfristig haben sich die Fischbestände wieder erholt – Cyanid ist abbaubar und reichert sich deshalb nicht im Sediment an. Anders sieht es bei den Schwermetallen aus, die bei dem Unglück freigesetzt wurden: Sie bleiben im Sediment und werden nicht abgebaut, sondern reichern sich in der Nahrungskette an.

Cyanidlaugung birgt  
Gefahren für Mensch  
und Umwelt

Mittlerweile sind für die Goldaufbereitung auch verschiedene chemikalienfreie Methoden verfügbar, z. B. das Wilfley-Verfahren, bei dem das Gold auf einem Rütteltisch abgeschieden wird, das – eher im industriellen Bergbau eingesetzte – Wasserpropulsionsverfahren oder

ein Zentrifugenverfahren, bei dem das Konzentratgemisch nach spezifischem Gewicht sortiert wird.

Umweltprobleme  
auch bei anderen  
Aufbereitungs-  
verfahren

Auch andere Aufbereitungsverfahren können zu Umweltproblemen führen: Der Aufschluss sulfidischer Erze durch **Röstverfahren** ist mit Schwefelemissionen verbunden, die in Regionen mit geringen Umweltauflagen häufig ungefiltert in die Atmosphäre gelangen und zu sauren Niederschlägen führen können. Die **Flotation** als Methode der Aufkonzentration der Wertminerale in einem Erz basiert auf der unterschiedlichen Benetzbarkeit der sulfidischen Mineralien (z. B. Zinksulfid oder Kupfersulfid) und der Nebengesteinsminerale. Dabei wird eine Suspension der zerkleinerten Erze mit Luft durchströmt, sodass Luftblasen entstehen. Der an der Wasseroberfläche befindliche Schaum enthält die gewünschten Mineralien, die abgeschöpft und dann eingedickt werden. Eine Vielzahl von Flotationschemikalien ist dabei im Einsatz, z. B. Amine und Diamine. Diese bleiben zwar häufig an den Festphasenpartikeln hängen und treten nur in geringem Umfang in die wässrige Phase über. Ob sich das ändert, wenn mehrere Flotationsmittel miteinander kombiniert werden, ist bisher nicht erforscht.

Folgeschäden des  
Bergbaus nicht  
immer vorhersehbar

Nicht immer sind die Folgeschäden des Bergbaus leicht vorhersehbar: So wird aus Guyana berichtet, dass der Goldabbau dort zur **Ausbreitung von Malaria** in einem zuvor malariafreien Gebiet geführt hat. Die stehenden Gewässer und Pfützen, die im Zusammenhang mit der Goldsuche entstehen, bieten der Anopheles-Mücke optimale Bedingungen für die Vermehrung [Harvard Law School 2007].

Eine der größten Umweltkatastrophen in der Geschichte des Bergbaus ist die Zerstörung des Ok Tedi Flusses in Papua-Neuguinea durch eine Gold-/Kupfermine in den 1980er-/ 1990er-Jahren. Durch ein Erdbeben im Jahr 1984 wurde damals ein Damm zerstört, der die Schlämme und den Abraum aus der Mine von dem Fluss fernhalten sollte. Da der Damm nie wieder aufgebaut wurde, konnten so jedes Jahr 80 Millionen Tonnen Schlämme und Abraummaterial ungehindert in den Ok Tedi Fluss fließen, was zu großflächiger Sedimentation, einer Vergiftung der Fischpopulationen und Zerstörung der flussabwärts gelegenen landwirtschaftlichen Flächen führte. 50.000 Menschen aus 140 Dörfern sind bis heute von den Umweltfolgen betroffen; 2007 haben Dorfbewohner die damals verantwortliche Firma BHP Billiton auf 5 Mrd. US-\$ Entschädigung verklagt [The Age Company 2007].



Fazit: Der Bergbausektor zählt zu den Wirtschaftszweigen, die - oft lokal - die Umwelt stark belasten. Veränderungen des Grundwasserhaushalts, schwermetallbelastete Schlämme, Altlasten und ungesicherte Abraumhalden sowie der Einsatz toxischer Stoffe bei der Aufbereitung zählen zu den gravierendsten Problemen. Dennoch stehen alternative Verfahren zur Verfügung, die häufig auch eine höhere Rohstoffausbeute ermöglichen (vgl. Kap. 3.1.3).

### 1.2.2 Peak Oil - wann geht uns das Öl aus?

Als „Peak Oil“ wird das Datum bezeichnet, an dem die weltweite Ölförderung ihr Maximum erreicht. Ab diesem Zeitpunkt wird das Angebot an Erdöl stetig abnehmen, was nach Vorhersagen von Experten dramatische Auswirkungen auf die Weltwirtschaft haben kann, wenn bis dahin keine Alternativen zum Erdöl gefunden werden.

Das Konzept des „Peak Oil“ geht auf den US-Geologen Marion King Hubbert zurück, der bereits 1956 für Shell korrekt prognostizierte, dass die US-amerikanische Ölförderung um 1970 ihr Maximum erreicht haben würde. Seitdem versuchen Experten aufbauend auf diesem Modell den Wendepunkt der weltweiten Erdölförderung zu berechnen. Die Ergebnisse dieser Berechnungen differieren stark. So behaupten einige, der Wendepunkt stünde kurz bevor oder hätte sogar bereits stattgefunden (siehe Abbildung 10), während andere „Peak Oil“ frühestens in 30-40 Jahren ansiedeln (siehe Abbildung 11). In einem Punkt sind sich die Experten jedoch einig: Da Erdöl eine endliche Ressource ist, werden die Erdölreserven eines Tages erschöpft sein [EurActive 2007].

Endliche Ressource  
Erdöl: eines Tages  
werden die Reserven  
erschöpft sein

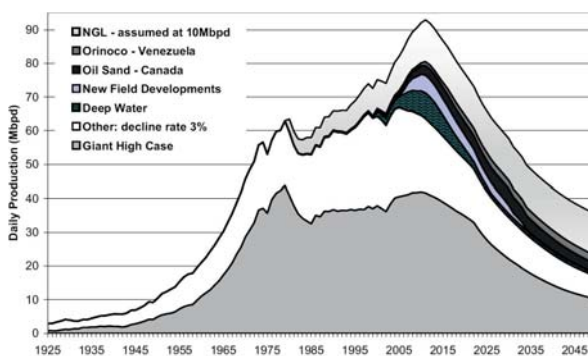


Abbildung 10: Berechnete tägliche Ölproduktion bis zum Jahr 2050 unter Einbezug neuer Fördertechnologien [Robelius 2007].

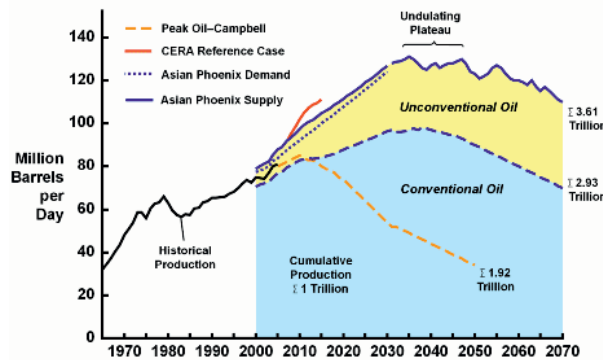


Abbildung 11: Der Vergleich unterschiedlicher „Peak Oil“-Modelle zeigt große Unterschiede bei der Prognose des zukünftigen Erdölangebots [Cambridge Energy Research Associates 2006].

Verlässliche Prognosen der Erdölreserven scheitern an intransparenter und lückenhafter Datenlage

Eine große Schwierigkeit für verlässliche Prognosen der Erdölreserven ist die intransparente und lückenhafte Datenlage. Die Informationen, die von der Internationalen Energieagentur (IEA) oder dem US Geological Survey bereitgestellt werden, basieren auf den Angaben von Förderunternehmen und erdölfördernden Staaten. Es hat sich jedoch gezeigt, dass alle wichtigen Akteure des Erdölmarkts dazu tendieren höhere Reserven anzugeben als sie tatsächlich besitzen. Ölfirmen erhöhen dadurch ihren Börsenwert, erdölproduzierende Länder erhöhen ihren internationalen Status und die großen Verbraucherländer wollen ihre Wirtschaft und Verbraucher nicht verunsichern. So musste z. B. Shell im Jahr 2004 als Folge zu optimistischer Annahmen bei den Fördermengen seine Angaben zu den eigenen Reserven um 20 % nach unten korrigieren [Mortished 2004]. Darüber hinaus geben die Staaten der OPEC größere Reserven an, um ihre Förderquoten aufrecht zu erhalten (je mehr Reserven sie angeben, desto mehr sind sie berechtigt zu fördern und desto größer fallen ihre Gewinne aus). Die meisten OPEC-Staaten haben seit 1980 ihre Angaben nicht mehr aktualisiert, obwohl seitdem viel Öl gefördert wurde und keine außergewöhnlichen Vorkommen entdeckt wurden [EurActive 2007]. Die internationale Gemeinschaft ist sich der Probleme in Bezug auf die Verlässlichkeit der Daten bewusst. Deshalb wurde 2005 die Ölmarkttransparenzinitiative Joint Oil Data Initiative [JODI 2005] ins Leben gerufen.

Die Menschheit verbraucht derzeit täglich 85 Millionen Barrel Öl. Der Internationalen Energieagentur (IEA) zufolge wird die Weltwirtschaft bis 2030 einen täglichen Ölkonsum von 130 Millionen Barrel erreicht haben [International Energy Agency 2007].

Erdöl bildet die Grundlage der industrialisierten Gesellschaften

Falls diese Nachfrage durch den Rückgang der Erdölreserven nicht befriedigt werden kann, könnte dies dramatische Auswirkungen auf die Weltwirtschaft haben. Erdöl bildet die Grundlage der industrialisierten Gesellschaften. Zusammen mit Erdgas stellt Erdöl 60 % der Energie für die globale Wirtschaft. Im Transportsektor stammen sogar 95 % der

Energie aus Erdöl [International Energy Agency 2007/2]. Aber Energie ist nur ein Teil der Erdölindustrie. Mehr als 95 % der Pestizide und 90 % der Dünger für die weltweite Nahrungserzeugung basieren auf Erdöl oder Erdgas. Auch Produkte wie Kunststoffe, Arzneimittel, Chemikalien, Schmiermittel, Kühlmittel, Farbe, Lösungsmittel, Isolierungen, Antiseptika, Tinten, Waschmittel, etc. basieren auf Erdöl. Das Überschreiten des „Peak Oil“ hätte also tiefgreifende Konsequenzen für die globale Wirtschaft [Bliss 2005].

Fazit: Die Menge der weltweiten Erdölreserven ist mit großen Unsicherheiten behaftet. Es ist höchste Zeit, durch ein Monitoring des globalen Angebots und der Nachfrage von Erdöl die Unsicherheiten bei der Bestimmung des „Peak Oil“ zu reduzieren. Akteure, die bereits jetzt in alternative, erdölfreie Technologien investieren, werden beim Übergang in eine erdölunabhängige Wirtschaft deutliche Wettbewerbsvorteile erzielen.

### 1.2.3 Kriege um Ressourcen - Wie gefährlich ist die Rohstoffknappheit?

Zu Beginn des 21. Jahrhunderts wurde Coltan zum Sinnbild für die Rolle der Rohstoffförderung bei bewaffneten Konflikten und für ethische Probleme, die im Zusammenhang mit dem Import von Rohstoffen aus Konfliktregionen stehen. Coltan ist die Bezeichnung für Mineralkonzentrate mit einem hohen Anteil der Elemente Tantal und Niob.

Tantal ist ein sehr hitze- und säurebeständiges Schwermetall, aus dem sich u. a. sehr kleine Kondensatoren fertigen lassen, die in Notebooks, Mobiltelefonen und anderen elektronischen Kleinstgeräten verwendet werden. Der Elektronik- und Miniaturisierungsboom der letzten Dekade führte zu einer rasant steigenden Nachfrage nach diesem seltenen Metall, die durch die wichtigsten Herkunftsländer wie Australien und Brasilien nicht mehr gedeckt werden konnte. Seit Beginn der 1990er-Jahre stieg die Nachfrage nach Tantal um jährlich 10 %, um 2002 einen Höchststand zu erreichen [Behrendt 2007]. Dieser Angebotsengpass fiel zeitlich mit dem Bürgerkrieg in der Demokratischen Republik Kongo zusammen, in dem von den Nachbarstaaten Ruanda, Burundi und Uganda unterstützte Rebellen Gruppen zukünftige Abbau- und Eigentumsrechten für Coltanvorkommen verkauften, um 1997 den Sturz der Regierung Mobutu zu finanzieren. Der Bürgerkrieg wurde erst 2003 unter Joseph Kabila, dem Sohn des 2001 ermordeten Rebellenführers Laurent Kabila, beendet und führte 2006 zu demokratischen Präsidentschaftswahlen; dennoch bleibt die politische Lage im Kongo instabil. Insgesamt starben nach Schätzungen von Coghlan et al. [Coghlan 2006] fast 4 Millionen Menschen in diesem Konflikt.

Die Nachfrage nach Tantal stieg in der letzten Dekade rasant

Zusammenhang  
Rohstoffsituation  
und kriegerische  
Auseinander-  
setzungen im Kongo

Die Situation im Kongo hat dazu geführt, dass 2000 ein Expertengremium des UN-Sicherheitsrates eingerichtet wurde, das explizit den Zusammenhang zwischen der Rohstoffsituation und den kriegerischen Auseinandersetzungen untersuchen sollte. Dieser Expertenkreis kam in seinem Abschlussbericht zu dem Schluss, „[...] dass der Konflikt in der Demokratischen Republik Kongo sich mittlerweile vor allem um Zugang zu sowie Kontrolle und Handel von fünf Mineralien dreht: Coltan, Diamanten, Kupfer, Kobalt und Gold.“ [UN Security Council 2001: S.41]. Insbesondere der extreme Anstieg des Weltmarktpreises zwischen 1999 und 2000 auf 200 US-\$ pro Kilogramm hat dazu geführt, dass beispielsweise die ruandische Armee durch den Verkauf von Coltan schätzungsweise 250 Millionen US-\$ innerhalb von 18 Monaten verdienen konnte – ein Betrag, der ausreichend war, um den Krieg zu finanzieren und somit zu verlängern.

Land	Konfliktressourcen	Konfliktdauer
Kolumbien	Öl, Gold, Koka	seit 1984
Peru	Koka	1980-1995
Angola	Diamanten, Öl	1975-2002
Angola (Kabinda)	Öl	seit 1975
Sierra Leone	Diamanten	1991-2000
Liberia	Diamanten, Holz, Palmöl, Eisen, Kakao, Kaffee, Marihuana, Gummi	1989-1996
Demokratische Republik Kongo	Coltan, Diamanten, Gold, Kobalt, Kupfer	1996-1997; seit 1998
Republik Kongo	Öl	1997
Sudan	Öl	seit 1983
Afghanistan	Opium, Edelsteine	1978-2001
Land	Konfliktressourcen	Konfliktdauer
Burma	Holz, Edelsteine, Opium, Zinn	seit 1949
Kambodscha	Holz, Edelsteine	1978-1997
Indonesien – Provinz Aceh	Erdgas, Holz	seit 1975
Indonesien – Provinz West-Papua	Kupfer, Gold	seit 1969
Papua-Neuguinea – Bougainville-Insel	Kupfer, Gold	1988-2001
Marokko	Phosphat, Öl	seit 1975

Tabelle 3: Bewaffnete Konflikte im Zeitraum 1990–2002, die mit Rohstoffen in Verbindung stehen [Bannon 2003].

Die Berichte des UN-Panels sorgten international für großes Aufsehen, u. a. weil der Anhang des Berichts von 2002 [UN Security Council 2002] eine Liste mit 85 Unternehmen enthält, denen vorgeworfen wird, gegen die OECD-Standards für multinationale Unternehmen [OECD 2000] zu verstoßen.

Coltan im Kongo ist nicht das einzige Beispiel für enge Verzahnung von Rohstoffförderung und kriegerischen Auseinandersetzungen. Eine Studie der Weltbank [Bannon and Collier 2003] schildert insgesamt 16 Konflikte, in denen Rohstoffe zur Verschärfung oder Verlängerung eines Konflikts beitragen oder noch immer beitragen (siehe Tabelle 3).

16 Konflikte in denen Rohstoffe eine Rolle spielen

Verschiedene internationale Initiativen sind in den letzten Jahren entstanden, die Lösungswege für diese Problematik suchen und Staaten und Unternehmen ethische Richtlinien für den Umgang mit Rohstoffen aus Krisenregionen bieten. Dazu zählen u. a. die OECD Richtlinien für multinationale Unternehmen [OECD 2000], die Global Reporting Initiative der Vereinten Nationen [Global Reporting Initiative 2006], der speziell für Diamanten entwickelte Kimberley-Prozess sowie die von führenden Bergbauunternehmen ins Leben gerufene Extractive Industries Transparency Initiative (EITI) und die ebenfalls unternehmergetriebene Global Mining Initiative zur Entwicklung von Standards für Nachhaltige Entwicklung im Bergbausektor.

Internationale Initiativen suchen Lösungswege

Die Überprüfung solcher Standards hängt häufig davon ab, ob sicher nachgewiesen werden kann, ob ein Rohstoff aus illegalem Abbau oder einer legalen Herkunft stammt. Derzeit arbeitet die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) an einem Herkunftsnachweis für Coltan, der für die Zertifizierung des Erzes eingesetzt werden könnte und Ermittlung der Herkunft des Erzes aufgrund verschiedener chemischer und physikalischer Parameter ermöglicht. Die BGR ist dabei auch in die Entwicklung von zertifizierten Handelsketten im Bereich mineralischer Rohstoffe involviert [Wagner 2007].

Fazit: Die Aussage, dass verstärkt Kriege um Rohstoffe geführt werden, ist zu stark vereinfacht. Die Verfügbarkeit von Rohstoffen in bestimmten Regionen kann allerdings, wie im Kongo, dazu führen, dass bewaffnete Konflikte verstärkt oder verlängert werden, weil sich die Krieg führenden Parteien über den Verkauf von Schürfrechten und die Kontrolle der Rohstoffquellen finanzieren.

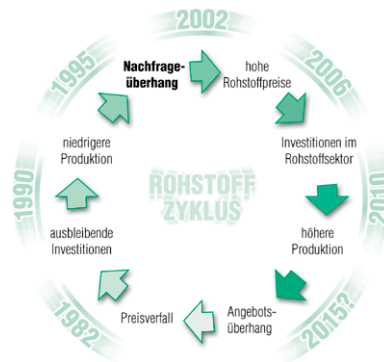
## 1.3 Distribution / Angebot

### 1.3.1 Alles Spekulation? - Wie entstehen Rohstoffpreise?

Preis ist ein Indikator für die Knappheit von Gütern

Der Preis ist der Indikator für die Knappheit von Gütern, gemessen an den verfügbaren Mengen und am Bedarf. Dabei kommt es zu einer Wechselwirkung zwischen Angebot, Nachfrage und Preis, d. h. sie beeinflussen sich gegenseitig. Dies gilt auch für Rohstoffe. Da das Auffinden und die Inbetriebnahme von Rohstofflagerstätten langwierige und aufwändige Prozesse sind, haben sich die Rohstoffpreise in der Vergangenheit in der Regel zyklisch entwickelt. So werden in Phasen starken Wirtschaftswachstums Kapazitäten aufgebaut; die bei nachlassendem Wachstum zu einem Überangebot und Preisverfall führen. Dadurch werden einzelne Minen unrentabel und müssen geschlossen werden. Das geschieht solange, bis das Angebot so gering ist, dass die Nachfrage überwiegt und die Preise wieder ansteigen. Dadurch werden neue Förderstätten rentabel und der Zyklus beginnt von vorn. Durch die starke zeitliche Verzögerung beim Aufbau neuer Kapazitäten dauern Aufschwungsphasen in Rohstoffzyklen meist relativ lang, durchschnittlich 10-15 Jahre.

Rohstoffpreise verhalten sich zyklisch



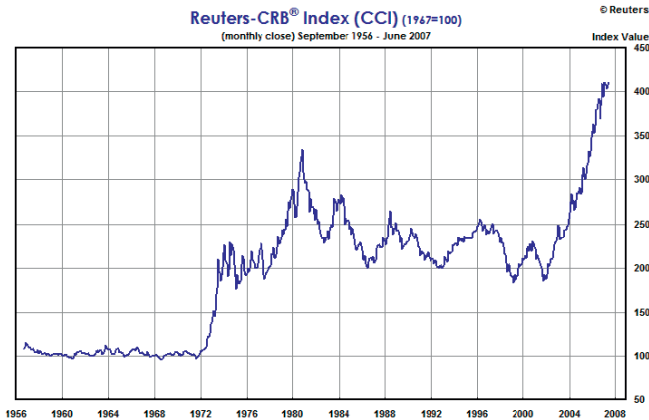
**Abbildung 12: Der Rohstoffzyklus [DRAG/Superzyklus 2007].**

2001 hat ein neuer Zyklus begonnen

Nach Aussagen der Deutschen Rohstoff AG (DRAG) hat 2001 ein neuer Zyklus begonnen, nachdem 20 Jahre lang die Rohstoffpreise nominal gesunken sind (mit Schwankungen) [DRAG/Superzyklus 2007]. Abbildung 13 zeigt den nominalen Preisverlauf des Reuters-CRB-Index, der aus verschiedenen Rohstoffen<sup>4</sup> zusammengesetzt ist. Ab 2001 ist ein starker Anstieg der Rohstoffpreise zu verzeichnen. Ein Grund für den

<sup>4</sup> Kakao, Kaffee, Zucker, Baumwolle, Kupfer, Platin, Silber, Rohöl, Mais, Erdgas, Weizen, Soja, Lebendvieh, Schweinehälften, Heizöl, Gold, Orangensaft [Reuters-CRB Index 2007]

Anstieg ist die stark wachsende Nachfrage nach Rohstoffen aus China und anderen Schwellenländern (siehe auch Kapitel 1.1.2).



**Abbildung 13: Rohstoffindex des Commodities Research Bureau [Reuters-CRB Index 2007].**

Dass es sich bei diesem Anstieg der Rohstoffpreise um einen reinen Spekulationseffekt handelt, darf also bezweifelt werden. Nichtsdestotrotz wächst der Einfluss den Finanzinvestoren auf Terminbörsen ausüben, was kurzfristig zu erheblichen Schwankungen bei den Rohstoffpreisen führen kann. Rohstoffe werden an Terminbörsen<sup>5</sup> gehandelt. Bei Terminbörsen werden Kaufverträge abgeschlossen, bei denen die Transaktionen erst in der Zukunft durchgeführt werden. Zweck einer Terminbörse ist die zeitliche und örtliche (bzw. in jüngster Zeit auch virtuelle) Konzentration des Handels und damit die Steigerung der Effizienz und der Marktliquidität, die Verringerung der Transaktionskosten sowie der Schutz vor Manipulationen.

In der Praxis zeigt sich, dass bereits einzelne Fonds für großen Wirbel an den Terminbörsen sorgen können. So geriet Anfang Februar 2007 der milliardenschwere Hedge-Fond Red Kite Management in finanzielle Schwierigkeiten, was zu einem Einbruch der Kupfer- und Zinkpreise an der London Metal Exchange (LME) führte [Bayer 2007]. Das neuerwachte Interesse der Finanzinvestoren an Rohstoffbörsen beruht auf der Suche nach Renditen, die sie bei Aktien, Anleihen und Währungen nicht finden können. Allerdings weisen Warenmärkte im Gegensatz zu Aktienbörsen einige Besonderheiten auf. Die zu einem bestimmten Zeitpunkt physisch verfügbare Menge an Öl, Gas oder Zink ist relativ klein. Das Kaufvolumen an den Terminbörsen kann das tatsächlich lieferbare Angebot beträchtlich überschreiten. Finanzstarke Investoren können das für einen Market Squeeze ausnutzen. Bei einem Market

Anstieg von Rohstoffpreisen ist kein reiner Spekulationseffekt

Bereits einzelne Fonds können für großen Wirbel an den Terminbörsen sorgen

<sup>5</sup> Die größten und wohl auch bekanntesten Terminbörsen sind die deutsch-schweizerische EUREX, die Chicago Board of Trade (CBOT), die Chicago Mercantile Exchange (CME) und die London International Financial Futures Exchange (LIFFE).

Squeeze baut ein Käufer eine dominante Position auf und drängt die Verkäufer in die Ecke. So kaufte das Handelshaus Arcadia im Sommer 2000 mehr Brent-Schiffsladungen für September als tatsächlich physisch zur Verfügung standen. In der Folge stieg der Brent-Preis Ende August 2000 um mehr als 3 US-\$ pro Barrel. Je stärker Banken und Hedge-Fonds in diese engen Märkte drängen, desto größer wird die Gefahr von Preisschwankungen und Marktmanipulationen [Bayer 2007].

Solange die physische Nachfrage das physische Angebot an Rohstoffen übersteigt, steigen die Preise

Dennoch bleibt festzuhalten, dass solange die physische Nachfrage das physische Angebot an Rohstoffen übersteigt, mittel- bis langfristig die Preise steigen bzw. hoch bleiben werden. Spekulanten können diesen Prozess nach oben oder unten verstärken. Diese Effekte sind aber kurzfristiger Natur, die in Summe nur eine höhere Volatilität bewirken (siehe Tabelle 4). Mittel- und langfristig bestimmen immer Angebot und Nachfrage die Preise. Und das Angebot wird auf Jahre hinaus knapp bleiben.

<b>Erdöl</b>	<b>8,25</b>	<b>Aluminium</b>	<b>5,53</b>	<b>Weizen</b>	<b>4,78</b>
<b>Kaffee</b>	<b>7,94</b>	<b>Soja</b>	<b>5,47</b>	<b>Kohle</b>	<b>4,03</b>
<b>Holz</b>	<b>6,65</b>	<b>Fisch</b>	<b>5,24</b>		
<b>Kupfer</b>	<b>5,98</b>	<b>Baumwolle</b>	<b>5,03</b>		

**Tabelle 4: Volatilität der Rohstoffpreise (1980 - 2007) gemessen als Standardabweichung der monatlichen Änderung in % [nach IMF 2007].**

Die Nachfrage bleibt hoch und das Angebot vorerst knapp

Trotzdem ist es nicht auszuschließen, dass es im Rohstoffsektor früher oder später zu einer Überhitzung des Marktes kommen wird. Davon ist momentan im Jahr 2008 allerdings noch nichts zu spüren. Die Nachfrage ist unverändert hoch und das Angebot vorerst weiterhin knapp. Diese Situation wird allerdings nicht endlos lange anhalten. Denn wenn die Produktionskosten nur einen Bruchteil der erzielbaren Erlöse betragen, reagiert die Angebotsseite mit einem Ausbau von Kapazitäten. Neben der Exploration und Ausbeutung neuer Lagerstätten werden neue Recycling- und Substitutionsmöglichkeiten erschlossen, sodass eines Tages wieder ein Überangebot auf den Rohstoffmärkten vorliegen wird. Der Zyklus kann von vorne beginnen (siehe Abbildung 12) [DRAG/Superzyklus 2007].

Fazit: Auch bei Rohstoffen bestimmen mittel- und langfristig immer Angebot und Nachfrage die Preise. Da das Angebot in den nächsten Jahren knapp bleiben dürfte, werden die Preise in vielen Bereichen auf einem hohen Niveau bleiben. Das wird Innovationen in den Bereichen Recycling, Substitution und Exploration fördern, so dass auf lange Sicht das Angebot die Nachfrage wieder übersteigen wird. Die Preise werden also wieder sinken.



### 1.3.2 Oligopole und Konzentrationsprozesse - diktiert die Angebotsseite den Markt?

Global betrachtet ist die Rohstoffindustrie relativ unbedeutend – der Börsenwert der TOP 59 Unternehmen betrug 2007 gerade einmal 781 Mrd. US-\$ – das ist nur etwas mehr als der Börsenwert der beiden Marktführer im Energiebereich zusammen (Exxon Mobil Corporation und Petro China Company Limited, 731 Mrd. US-\$).

Die Branche ist auch keineswegs homogen strukturiert, sondern weist das breite Spektrum von globalen Konzernen mit Jahresumsätzen im Millionenbereich bis hin zu 1-Mann-Betrieben auf, in denen in mühsamer Handarbeit Erze aus kleinen Löchern im Boden gebrochen und an Zwischenhändler verkauft werden.

Im Detail sieht die Struktur der Branche so aus: Sie wird dominiert von einer kleinen Gruppe von **großen multinationalen Konzernen** wie z. B. Rio Tinto, BHP Billiton und Alcoa (siehe Tabelle 5).

Die Rohstoffbranche wird dominiert von einer kleinen Gruppe großer multinationaler Konzerne

Unternehmen	Jahresumsatz (TTM Sales) [Mio US-\$ ]	Wichtigste Rohstoffe
BHP Billiton Limited (ADR)	35,5	breites Spektrum, u. a. Eisen, Kupfer, Uran, Nickel, Kohle, Gas, Öl
Alcoa Inc.	31,2	Aluminium
Alcan Inc. (USA)	24,5	Aluminium
Companhia Vale do Rio Doce (ADR)	23,8	breites Spektrum, u. a. Eisen, Kupfer, Nickel,
Rio Tinto plc (ADR)	21,0	Kohle, Stahl, Industriemineralien, Diamanten,
Commercial Metals Company	8,6	Stahl, Aluminium, Kupfer, Schrott
Aluminum Corp. of China Limited (ADR)	8,1	Aluminium
Freeport-McMoRan Copper & Gold Inc.	7,0	Kupfer, Gold
The Furukawa Electric Co., Ltd. (ADR)	6,2	Kupfer
Teck Cominco Limited (CAN)	6,2	Zink, Blei, Industriemetalle

Tabelle 5: Die 10 größten Firmen der Welt im Bergbausektor (ohne Stahlindustrie, ohne Gold und Silber, Juni 2007. Quelle: [www.investor.reuters.com](http://www.investor.reuters.com)).

15 Unternehmen haben einen Jahresumsatz von über 1 Millionen US-\$<sup>6</sup>. Im Stahlsektor entfielen 2006 etwa 36,4 % der globalen Bergbauproduktion von Eisenerz auf die drei größten Vertreter der Branche, Companhia Vale do Rio Doce, BHP Billiton und Rio Tinto

<sup>6</sup> [www.investor.reuters.com](http://www.investor.reuters.com)

[BGR 2007]. Diese drei Unternehmen vereinen etwa 70 % des Seehandels mit Eisenerz auf sich [BGR 2007].

**Mittelgroße Unternehmen und nationale Player** besitzen häufig mehrere kleine bis mittlere Minen, z. T. in mehreren Ländern.

Viele der kleinen Unternehmen sind im Explorationsbereich tätig

Viele der **kleinen Unternehmen (Juniors)** sind im Explorationsbereich tätig und bieten ihre Ergebnisse den großen Konzernen an. Ein Teil dieser Gruppe beschränkt sich dabei nicht nur auf das Explorationsgeschäft, sondern steigt auch selbst in den Betrieb der Förderung ein. Die Bedeutung dieser kleinen Unternehmen variiert von Land zu Land. So gab es zu Beginn des 21. Jahrhunderts in den USA nur etwa 100 solcher Unternehmen, in Kanada dagegen etwa 1.000 [MMSD 2002].

**Staatliche Bergwerksbetreiber** spielen schon seit längerem keine bedeutende Rolle mehr in dieser Branche - die meisten staatlichen Unternehmen wurden in den letzten 20 Jahren privatisiert. Der umgekehrte Trend ist derzeit jedoch im Erdölsektor zu beobachten. In Ländern wie z. B. Venezuela oder Russland wird die Erdölindustrie zunehmend wieder verstaatlicht.

13 Millionen Menschen in Kleinstunternehmen im Bergbau tätig

Nach Angaben des Sekretariats für kleine Bergbaubetriebe (Communities and Small-Scale Mining, CASM) sind weltweit etwa 13 Millionen Menschen aus über 30 Entwicklungsländern in **Kleinstunternehmen** im Bergbau tätig; 80–100 Millionen sind für ihren Lebensunterhalt von diesem Sektor abhängig<sup>7</sup>. Die Arbeitsbedingungen sind häufig sehr schlecht; es fehlen Landtitel sowie Umwelt- und Sozialstandards und die Abhängigkeit von Aufkäufern und Zwischenhändlern ist groß.

Marktkonzentration der Anbieterseite

Generell zeichnet sich der globale Rohstoffsektor durch eine zunehmende Marktkonzentration auf der Anbieterseite aus - es herrscht quasi eine Oligopolstruktur, in der einige wenige Anbieter den Markt dominieren. Für 2005 fasst die BGR (2005) zusammen:

- China hat seinen Platz als Weltmarktführer bei der Produktion von Zink, Zinn und Mangan weiter ausgebaut.
- Die Vormachtstellung der Branchenriesen Anglo American, BHP und Rio Tinto ist gewachsen.
- Die Handelsgesellschaften Xstrata und Glencore spielen bei einigen Rohstoffmärkten eine dominante Rolle.
- Insgesamt ist eine regionale Konzentration des Bergbaus zu verzeichnen.
- Allerdings gibt es für einige Stoffe (z. B. Nickel) auch den gegenläufigen Prozess einer Dezentralisierung.

<sup>7</sup> <http://www.casmsite.org/about.html>

Auch gemäß einer weiteren Analyse hat sich diese Tendenz fortgesetzt [BGR 2007]:

- Die fünf größten Minenbetreiber sind z. Zt. BHP Billiton, Rio Tinto, CVRD, Anglo American und Xstrata.
- Die hohen Gewinne der Branchenriesen führten zu einer Reihe von Fusionen und Übernahmen, deren Volumen in 2006 ca. 126 Mrd. US-\$ betrug.
- Diese Fusionen haben zwar zu einer Reihe von Verschiebungen innerhalb der Sektoren geführt, den regionalen Konzentrationsgrad gegenüber der Situation in 2003 aber nicht wesentlich verändert.
- Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich die Konsolidierungswelle in dieser Branche fortsetzen wird und der regionale sowie produzentenseitige Konzentrationsgrad ansteigen wird. Diese Einschätzung kann im Nachhinein durch den Übernahmekampf bestätigt werden, der Ende 2007 im Bergbausektor ausgefochten wurde: Der Branchenriese BHP Billiton hatte im November 2007 ein Übernahmeangebot in Höhe von 410 Mio US-\$ an Rio Tinto abgegeben [Heilmann 2007]. Später stiegen auch andere Konzerne (u. a. die Beteiligungsfirma Blackstone) in den Bieterkampf ein, als Rio Tinto das Angebot zurückwies.
- Es ist nicht auszuschließen, dass einzelne Unternehmen und Produzentenländer ihre Marktmacht einsetzen, um den Rohstoffmarkt zu ihren Gunsten zu beeinflussen.

Zur regionalen Konzentration der Rohstoffproduktion stellt Sebastian Brökelmann vom BDI fest: „Insgesamt wird der größte Teil der weltweiten Rohstoffförderung durch nur acht Länder gedeckt: Australien, Brasilien, Chile, China, Kanada, Russland, Südafrika und die USA. Durch die starke regionale Konzentration dieser Rohstoffe können in Extremfällen politische und wirtschaftliche Risiken entstehen.“<sup>8</sup>

Nur acht Länder decken den größten Teil der weltweiten Rohstoffförderung

Wie sind nun diese Konzentrationsprozesse in Hinblick auf die Rohstoffknappheit zu beurteilen?

Die Projektgruppe Rohstoffe des BMWI sieht diese Konzentrationsprozesse noch nicht als besorgniserregend an und bemerkt, dass daraus „[...] keine Gefahren für die Rohstoff-Versorgungssicherheit für die deutsche Industrie zu befürchten sind, wenngleich durch stärkere Oligopolbildung bei einzelnen Rohstoffen stärkere Preisausschläge nicht ausgeschlossen werden können.“ [BMWI 2005, S. 8f].

<sup>8</sup> <http://www.bundesregierung.de/Content/DE/EMagazines/velop/047/s4-bdi-deutsche-wirtschaft-braucht-rohstoffsicherheit.html>

Die Bundesregierung empfiehlt ein verstärktes Engagement im Bereich der Rohstoffgewinnung

In ihren „Elementen einer Rohstoffstrategie“ [Die Bundesregierung 2007] empfiehlt die Bundesregierung als Antwort auf diese Entwicklungen eine verstärkte Rückwärtsintegration der deutschen rohstoffverarbeitenden Industrie, d. h. ein verstärktes Engagement im Bereich der Rohstoffgewinnung, v. a. im Bereich der Metalle. Außerdem sieht sie die Notwendigkeit, das bisher vorhandene Instrumentarium von Investitions Garantien zu überprüfen, um eine verstärkte Diversifizierung der Bezugsquellen zu ermöglichen.

Fazit: Eine verstärkte Konzentration auf der Anbieterseite in den letzten Jahren /Jahrzehnten ist zu beobachten. Diese wird von Experten zwar kritisch beobachtet, jedoch noch nicht als bedrohlich für die deutsche Wirtschaft eingeschätzt. Die nationale Rohstoffstrategie der Bundesregierung empfiehlt ein verstärktes Engagement der deutschen Wirtschaft im internationalen Bergbausektor, um den Zugang zu kritischen Rohstoffen langfristig zu sichern.

### 1.3.3 Rohstoffimporte - Wie abhängig ist die deutsche Wirtschaft?

Es ist schon fast eine Binsenweisheit: Deutschland ist ein traditionell rohstoffarmes Land, das für die Aufrechterhaltung seiner Wirtschaft – abgesehen von einigen sogar für den Export bedeutsamen Rohstoffen wie Braunkohle oder Kali- und Steinsalzen – fast alles importieren muss.

Etwa 80 % der in Deutschland benötigten Rohstoffe werden im Land gewonnen

Und doch werden etwa 80 % der Rohstoffe, die in Deutschland benötigt werden, im Land gewonnen [BGR 2006]. Dabei handelt es sich jedoch vorwiegend um lokal erzeugte und gehandelte Baustoffe, die zwar mengenmäßig ins Gewicht fallen, aber nicht so stark zur Wertschöpfung beitragen wie z. B. Metalle, bei denen eine Importabhängigkeit von nahezu 100 % besteht.

Abbildung 14 zeigt in der Übersicht den Anteil der jeweiligen Rohstoffe am Importvolumen der deutschen Rohstoffeinfuhren für das Jahr 2005. Es wird deutlich, dass Energierohstoffe wie Erdöl, Erdgas und in weit geringerem Umfang Kohle den größten Anteil des Gesamteinfuhrwerts von 77 Mrd. Euro ausmachen [BGR 2006].

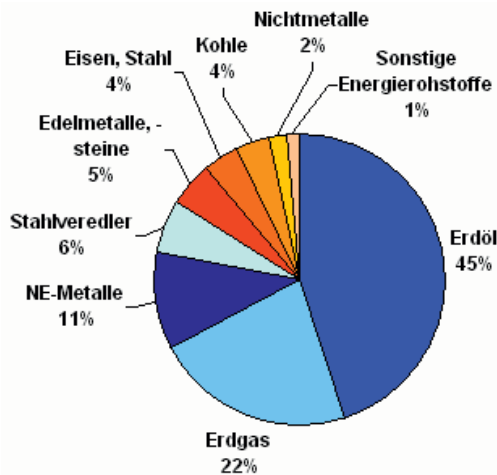


Abbildung 14: Anteil der Rohstoffgruppen am deutschen Gesamtimportwert 2005 [BGR 2006].

In den 1970er und 1980er Jahren beteiligten sich deutsche Unternehmen noch intensiv an ausländischen Bergbauvorhaben, um Rohstoffquellen zu sichern; heute dagegen haben internationale Projekte kaum mehr eine Bedeutung.

Internationale Projekte in Deutschland kaum von Bedeutung

Angesichts dieser starken Importabhängigkeit von Rohstoffen stellt sich die Frage, ob es in Deutschland bestimmte Branchen oder bestimmte Rohstoffe gibt, bei denen diese Abhängigkeit besonders kritisch zu bewerten ist, da es eventuell zu Versorgungsengpässen kommen könnte.

Die Projektgruppe Rohstoffe im BMWi hat in ihrem Bericht zur aktuellen rohstoffwirtschaftlichen Situation [BMWi 2005a] eine Reihe von Branchen genannt, die unterschiedliche Handlungsspielräume beim Umgang mit verstärkten Knappheiten und gestiegenen Rohstoffpreisen aufweisen und von den Preissteigerungen 2004/2005 unterschiedlich stark betroffen waren.

Die *Stahlindustrie* ist zwar mit Preissteigerungen bei Koks, Schrott und Eisenerz konfrontiert, kann diese Preissteigerungen jedoch an ihre Kunden weitergeben. Die Preissteigerungen konnten der Branche nichts anhaben – im Gegenteil, sie konnte 2004 Rekordgewinne einfahren. 2006 und 2007 waren Rekordjahre in der deutschen Rohstahlproduktion seit der Wiedervereinigung [Ameling 2007].

Die Stahlindustrie, kann Preissteigerungen an ihre Kunden weitergeben

Die *Stahl- und Metallverarbeitung, die Automobilindustrie und Automobilzulieferer, der Schiffbau und der Maschinen- und Anlagenbau* hingegen haben eher Schwierigkeiten, die höheren Preise (insbesondere für Stahl) an Abnehmer und Endverbraucher weiterzugeben, da sie z. B. durch langfristige Abnehmerverträge gebunden sind.

Besonders betroffen sind die *Kabelhersteller*, da sie sowohl Preissteigerungen für Kunststoffe als auch Kupfer hinnehmen müssen.

Bauindustrie und Baustoff-, Steine und Erdenindustrie ist nicht so stark von Importen abhängig

Die *Bauindustrie* und die *Baustoff-, Steine und Erdenindustrie* ist nicht so stark von Importen abhängig, da ein Großteil der Baustoffe auf dem heimischen Markt verfügbar sind – für Bauvorhaben mit hohem Stahlanteil trifft dies jedoch nicht zu.

Für die *chemische Industrie* ist insbesondere der Rohölpreis entscheidend.

Die *Weißgüter- und Elektroindustrie* kann höhere Kosten für Stahlblech und NE-Metalle an die Endverbraucher weitergeben.

Rohstoff	Bemerkung
<b>Kupfer</b>	Hohe Recyclingquote in Deutschland und geringe Konzentration der Kupfererz fördernden Unternehmen dämpfen Importabhängigkeit.
<b>Aluminium</b>	Kritischer als Bauxitabhängigkeit sind die Strompreise.
<b>Eisenerz</b>	Keine hohe Unternehmenskonzentration; Ressource ist praktisch als unerschöpflich anzusehen.
<b>Zink</b>	Zukunft der deutschen Zinkhütten eher durch Verlagerungsprozesse der Automobilindustrie und Energiepreise geprägt als durch Zinkförderung.
<b>Chrom</b>	Quasi-Monopol Südafrikas durch Produktionsausbau in Kasachstan abgedeckt.
<b>Germanium</b>	Substituierbarkeit in der Mikroelektronik durch Aluminium oder Titan (Katalysatoren) oder Silizium (bei der Chipherstellung).
<b>Vanadium</b>	Reserven reichen noch 250 Jahre; zudem ist der Legierungrohstoff substituierbar.
<b>Flussspat</b>	Heimische Förderung könnte durch Preisanstiege wieder attraktiv werden.
<b>Tantal</b>	Künftige Recyclingmöglichkeiten, Substitutionspotenziale und ausreichende Reserven und Ressourcen lassen die Verfügbarkeit weniger kritisch erscheinen als allgemein angenommen.
<b>Graphit</b>	Einer der wenigen Rohstoffe, deren Preis real höher ist als in den 1950er Jahren.
<b>Magnesit</b>	Künftig weiterhin hohe Nachfrage vorhersehbar; derzeitige Konzentration auf wenige Förderländer könnte durch neue Gewinnungsverfahren aus dem Meerwasser entschärft werden.
<b>Platinmetalle</b>	Hohe Konzentration der Platinvorräte auf Südafrika ist nicht unbedenklich. Hohe Preise werden die Recyclingquoten bei dieser Gruppe noch weiter steigern.

**Tabelle 6: Langfristige Einschätzung der Rohstoffknappheit für 12 ausgewählte und als potenziell kritisch eingestufte Rohstoffe. Nach [Fronde 2005].**

In einer Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie [Fronde 2005] wurden zwölf Rohstoffe identifiziert, die in einem Zeithorizont bis 2025 potenziell kritisch für die deutsche Wirtschaft werden könnten. Als kritisch wurden dabei Rohstoffe eingestuft, deren Förderung sich auf wenige Länder konzentriert, und die als politisch und wirtschaftlich instabil angesehen werden. Nach Einschätzung der Autoren ist jedoch langfristig nur für die wenigsten dieser Stoffe die Situation tatsächlich als kritisch einzustufen; in vielen Fällen sind andere Faktoren (z. B. Strompreise bei der Aluminiumherstellung) stärker limitierend als die Verfügbarkeit des Rohstoffs (siehe Tabelle 6).

Zwölf Rohstoffe  
werden als  
potenziell kritisch  
gesehen

Fazit: Die Importabhängigkeit der deutschen Industrie ist nichts Neues; auf mittlere Sicht stehen Rohstoffe weiterhin zur Verfügung. Insgesamt stellt sich jedoch die Frage, durch welche Strategien die deutsche Wirtschaft ihre Importabhängigkeit bei bestimmten Rohstoffen abfedern kann.





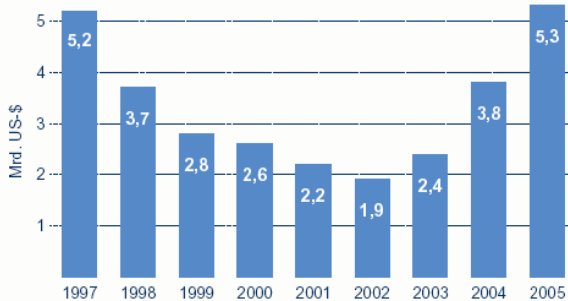
## 2 INNOVATIONSSTRATEGIEN GEGEN ROHSTOFFKNAPPHEIT

### 2.1 Erschließung neuer Rohstoffquellen

#### 2.1.1 Potenziale

Steigender Rohstoffbedarf und steigende Rohstoffpreise sorgen für eine Stimulation der Rohstoffexploration. Nachdem jahrelang nur verhalten in Rohstoffexploration investiert wurde, steigen weltweit seit 2002/2003 die globalen Ausgaben für Exploration (siehe Abbildung 15).

Steigender Rohstoffbedarf und steigende Rohstoffpreise sorgen für eine Stimulation der Rohstoffexploration



**Abbildung 15: Weltweite Explorationsausgaben für die Rohstofferkundung 1997–2005 [Wagner 2005].**

Nach Angaben der Metals Economics Group [2007] betragen 2006 die weltweiten Investitionen in Explorationsvorhaben (außer Eisen) 7,5 Mrd. US-\$. Seit dem Investitionstief in 2002 ist dies das vierte Jahr in Folge, in dem die Investitionen wieder ansteigen. Dabei beteiligen sich zunehmend kleinere Explorationsfirmen (Juniors), die 2006 mit 50 % der Investitionen den größten Anteil trugen, gefolgt von großen und mittleren Firmen. Diese Verlagerung von großen auf kleinere Unternehmen wird u. a. darauf zurückgeführt, dass die wenigen vielversprechender Projekte; die in den nächsten fünf Jahren entwickelt werden können, zu klein für die großen Player des Rohstoffgeschäfts sind. Staatliche Investitionen machen nur einen sehr geringen Anteil der Gesamt-Investments im Rohstoffbereich aus.

Regional gesehen liegt der Schwerpunkt der Investitionen auf Explorationsvorhaben in Lateinamerika, gefolgt von Kanada, Afrika und Australien. Zunehmend wird auch in Regionen investiert, die hohe politische Risiken bergen (ehemalige Sowjetrepubliken, Afrika, Lateinamerika), da die Länder mit geringeren politischen Risiken bereits relativ gut erforscht und erkundet sind [Metals Economics Group 2007].

Schwerpunkte der Explorationsvorhaben

45 % der globalen Investitionen fließen in Gold-Explorationsvorhaben, 32 % in Vorhaben zur Gewinnung von unedlen Metallen, 12 % in Diamanten und 3 % in Metalle der Platin-Gruppe.

Angesichts der künftigen Bedarfs- und Wachstumsprognosen stellt sich für künftige Explorationsvorhaben nicht nur die Frage nach der Erschließung der „low hanging fruit“, sondern der strategischen Erschließung neuer Rohstoffquellen und Explorationsverfahren.

### 2.1.2 Neue Rohstoffquellen

Suche nach neuen  
Rohstoffquellen  
konzentriert sich  
auf wenig erforschte  
Gebiete

Die Suche nach neuen Rohstoffquellen konzentriert sich zunehmend auf die bisher wenig erforschten Polargebiete, die Schelfgebiete der Kontinente, ihre Ränder und die Tiefsee. Im August 2007 erregten russische Polarforscher weltweites Aufsehen, als sie in 4.000 Metern Tiefe auf dem Festlandssockel der Arktis eine russische Flagge hissten, um sich den Zugang zu den dort vermuteten Rohstoffvorräten (Öl, Gas, Gold, Diamanten) zu sichern [Focus-online 2007].

Meeresgrund gilt als  
einer der  
zukunftssträchtigen  
potenziellen  
Lagerstätte

Der Meeresgrund gilt als eine der zukunftssträchtigen potenziellen Lagerstätten. Als besonders interessant werden Manganknollen, Methanhydrat und Buntmetalle angesehen. So erkundet die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe seit 2005 ein zwischen 4.000 und 5.000 m unter dem Meeresspiegel gelegenes Gebiet zwischen Hawaii und Mexiko, um dort vorkommende polymetallische Manganknollen zu untersuchen, die neben den Hauptbestandteilen Mangan und Eisen auch Buntmetalle wie Kupfer, Nickel und Kobalt enthalten [BMW 2005b]. Dabei ist das grundsätzliche Interesse an diesen Manganknollen nicht neu. Schon in den 1970er- und 1980er-Jahren bestand angesichts hoher Rohstoffpreise ein großes Explorationsinteresse – bis hin zur Erteilung einer Förderlizenz im Zentralpazifik an ein Förderkonsortium – das jedoch angesichts des folgenden allgemeinen Verfalls der Rohstoffpreise schnell wieder nachließ.

Die deutsche Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe ist in eine Reihe von weiteren Explorationsvorhaben eingebunden:

Im Rahmen einer internationalen Forschungsfahrt wurde im Tonga-Inselbogen eine Kette von über 20 Tiefseevulkanen untersucht. Dort treten heiße, metallreiche Lösungen aus dem Meeresboden, die auf Erzvorkommen mit erhöhten Kupfer- und Goldgehalten schließen lassen. Aus der Untersuchung dieser Vulkane erhofft man sich ein verbessertes Verständnis der Lagerstättenbildung und damit eine verbesserte Wissensbasis für die Auffindung von Lagerstätten an Land [BGR 2006b].

Historische  
Einschlagstellen von  
Meteoriten als  
Rohstoffquelle

Eine weitere Rohstoffquelle sind historische Einschlagstellen von Meteoriten, da sie für die Förderung interessanter Erze in großer Menge enthalten können. Ein Beispiel ist der süd-kanadische Sudbury-Komplex, der besonders hohe Nickel-Gehalte sowie Kupfer und Platinmetalle aufweist. Ein Problem bei der Förderung stellt jedoch das Auffinden der weit verzweigten Gänge mit abbauwürdigen Konzentrationen dar. Der

lohnenswerte Abbau wird durch die bisher schwer vorhersagbare räumliche Lage und das überraschende Aussetzen oder Vertauben der Gänge behindert. Die Entwicklung eines Modells, das den Bau und die Lage dieser Gänge beschreibt, ist Aufgabe eines aktuellen Forschungsprojekts [BGR 2006b].

Ölschiefer sind tonige oder kalkige Gesteine, die einen hohen Gehalt an organischem Kohlenstoff aufweisen. Dieser liegt in Form von Kerogen, einer Vorläufersubstanz des Erdöls vor. Um aus den Ölschiefern Öl zu gewinnen, muss das Gestein zunächst erhitzt (verschwelt), dann abgekühlt und das entstehende Gasgemisch schließlich abdestilliert werden. Trotz der großen vorhandenen weltweiten Vorräte (über 6.000 Millionen Tonnen gewinnbare Ressourcen) ist die Nutzung der Ölschiefer derzeit nur eingeschränkt möglich und selten wirtschaftlich. Die Verschwelung ist ein energieaufwändiger Prozess; durch den geringen Anteil von 10–30 % Kerogen am Sedimentmaterial entstehen große Mengen an Abraummateriale, und die Förderung im Tagebau führt zu starker Flächennutzungskonkurrenz [Blendinger 2004]. Ölschiefer werden auch als Grundstoff in der chemischen Industrie eingesetzt, z. B. bei der Herstellung von Linoleum oder Zement.

Ölschiefer enthalten Vorläufer-Substanzen von Erdöl

Ölsand ist eine Mischung aus Ton, Sand, Wasser und Kohlenwasserstoffen. Die größten Lagerstätten befinden sich in Kanada und in Venezuela. Abgebaut werden die Ölsande im Tagebau oder indem Wasserdampf in tiefere Schichten eingeleitet wird, wodurch sich Bitumen und Sand voneinander trennen und das Bitumen abgepumpt werden kann. Die International Energy Agency bezweifelt jedoch, dass Ölsande künftig global eine wichtige Rolle für die Energieversorgung spielen werden [IEA 2007]. Die Ölsande spielen vor allem für die Ölförderung in den Nicht-OPEC-Ländern eine wichtige Rolle; dort dürfte der Anstieg der Ölproduktion bis 2030 in erster Linie auf nicht-konventionelle Ölressourcen zurückzuführen sein. Ebenso wie die Gewinnung der Ölschiefer ist die Ölsandgewinnung mit großen Umweltproblemen verbunden. Im Schnitt müssen zwei Tonnen Ölsand gefördert werden, um 1 Barrel (159 l) Rohöl zu fördern [Gärtner 2007].

Auch Ölsand enthält Erdöl-Grundstoffe

Dennoch haben die steigenden Weltmarktpreise für Rohöl dazu geführt, dass wieder verstärkt Ölschiefer und -sande gefördert werden, z. B. in der kanadischen Provinz Alberta. Obwohl etwa 20 % der Energie, die später als Öl gewonnen werden kann, für die Förderung eingesetzt wird und obwohl der Ölschlamm zur Aufbereitung 500 km weit in Pipelines transportiert werden muss, lohnt sich der Aufwand [Gärtner 2007]. Shell will die Produktion im Athabasca Oil Sands Project bis 2010 für ca. 12 Mrd. US-\$ um 100.000 Barrel pro Tag ausbauen derzeit werden etwa 155.000 Barrel täglich gefördert. Die Rohstoffknappheit wirkt sich jedoch auch hier negativ auf die Gewinnmargen aus. Die Förderinfrastruktur erfordert hohe Mengen an Stahl und anderen Rohstoffen, die derzeit sehr teuer sind.

Verstärkter Abbau von Ölschiefer und -sand

Geologische,  
geophysikalische und  
geochemische  
Verfahren

### 2.1.3 Neue Technologien der Rohstoffgewinnung

Bei der Rohstoffexploration kommt eine Vielzahl von geologischen, geophysikalischen und geochemischen Verfahren zum Einsatz, die alle das Ziel haben, Anomalien in der Erdkruste zu entdecken, die erhöhte Konzentrationen bestimmter Mineralien aufweisen. Laut einer australischen Studie werden dabei immer dann hohe Erfolgsraten erzielt, wenn neue Explorationstechnologien zum Einsatz kommen oder neue geologische Erkenntnisse vorliegen [Hogan 2004]. Üblicherweise werden verschiedene Verfahren kombiniert, um eine gute räumliche Abschätzung einer Lagerstätte zu bekommen.

Traditionelle  
geologische  
Methoden kommen  
nach wie vor zum  
Einsatz

**Geologische Methoden** wie die Interpretation geologischer Karten oder Datenbanken über geologische und petrographische Informationen gehören traditionell zum Handwerkszeug des Explorationsgeologen und werden nach wie vor eingesetzt. Dennoch stehen diese Informationen nicht überall auf der Welt in hinreichender Qualität zur Verfügung. Viele Informationen befinden sich in Firmenbesitz und sind daher nicht öffentlich zugänglich. In Madagaskar werden derzeit die grundlegenden Voraussetzungen für die Exploration geschaffen. Hier wurde mittels Finanzierung durch die Weltbank eine aktuelle geologische Karte erstellt. Neben der üblichen kartografisch-geologischen Aufnahme der Gesteine an der Erdoberfläche wurde besonderer Wert auf die genaue Lokalisierung und Klassifizierung von Rohstoff-Vorkommen gelegt [BGR 2006b]. Zunehmend werden Modellierungsverfahren eingesetzt.

Verfahren	Messprinzip
Seismik	Untersuchung des Verhaltens von aktiv angeregten elastischen Wellen im Untergrund
Seismologie	Untersuchung seismischer Wellen im Erdinneren, angeregt durch Erdbeben, Vulkanausbrüche, usw.
Potentialfeldmethoden	Vermessung von Erdmagnetfeld und Erdschwerefeld
Elektromagnetik	Erkundung des Untergrundes über die Untersuchung seiner elektromagnetischen Eigenschaften
Radarverfahren	Erkundung des oberflächennahen Untergrundes oder von Untertagebergbau durch Radar
Radiometrie	Untersuchung der natürlichen Strahlung aus dem Untergrund

**Tab. 7: Übersicht über verschiedene geophysikalische Verfahren zur Erkundung der Struktur der Erde (Quelle: www.bgr.de, Oktober 2007).**

Beim Einsatz **geophysikalischer Methoden** wird versucht, Unterschiede in den physikalischen Eigenschaften verschiedener Mineralien und Gesteinsformationen möglichst räumlich zu erfassen und darzustellen. Tab. 7 gibt einen Überblick über die wichtigsten Verfahren.

Dabei führt häufig erst die Kombination verschiedener Methoden zu einem genauen und sicheren Ergebnis.

Kombination verschiedener Methoden führt zu genaueren Ergebnissen

Insbesondere die **Fernerkundung** hat in den letzten Jahren und Jahrzehnten an Bedeutung für die Exploration gewonnen, da die Daten in immer besserer Auflösung und Verortung vorliegen.

Seismische Verfahren werden häufig für die Erdölprospektion eingesetzt, sind jedoch im Allgemeinen zu teuer für die Suche nach mineralischen Lagerstätten.

Die Deutsche Rohstoff AG, ein neu gegründeter Investor im Bereich der Exploration, beschreibt verschiedene Phasen der Exploration (siehe Tab. 8), die jeweils mit verschiedenen Methoden assoziiert werden. Dabei sieht sie die Durchführung von Bohrungen nach wie vor als die entscheidende Methode an, um verlässliche Informationen über die Qualität einer Lagerstätte zu bekommen [Deutsche Rohstoff AG 2007].

Verschiedene Phasen der Exploration

Phase	Methodeneinsatz
Frühphasen-Exploration	geologische Hypothesen, historische Daten, Entnahme und Analyse von Oberflächenproben, seismische oder magnetische Untersuchungen
Lagerstätten-Identifizierung	Probebohrungen, Grabungen
Lagerstätten-Definition	Flächenbohrungen
Vorstudien	Untersuchungen zur Abbaubarkeit des Erzes
Machbarkeitsstudie	Ökonomische Methoden
Konstruktion	Aufbau von Gebäuden und Gerätschaften, Umweltverträglichkeitsstudien
Produktion	Fördertechnologien, Laugungsverfahren, Flotation

**Tab. 8: Phasen der Exploration und eingesetzte Methoden. Verändert nach [Deutsche Rohstoff AG 2007].**

Die Bohrtechnologien machen bei Explorationsvorhaben einen besonders hohen Teil der Kosten aus. Während im Bereich der Erdöl- und Erdgasprospektion viele Innovationen entstanden sind (z. B. Richtbohren, horizontales Bohren), werden diese bislang nicht standardmäßig in der Exploration mineralischer Rohstoffe eingesetzt.

Dies liegt u. a. daran, dass der Durchmesser für Mineralienbohrungen meist kleiner ist als für Erdöl und Erdgas und deshalb die Aufsätze für die Bohrer nicht richtig dimensioniert sind oder erst angepasst werden müssten [National Academy of Sciences 2002].

Richtbohren bietet  
Möglichkeiten zur  
Kosteneinsparung

Durch **Richtbohren** könnten künftig erhebliche Kosteneinsparungen möglich sein: Die Firma Murray & Roberts Cementation hat z. B. eine Methode entwickelt, bei der ein Bohrkopf in ein bestehendes Bohrloch eingeführt wird und seitliche Verzweigungen bohrt – bis in einer Tiefe von 3.000 Metern. Die Kosteneinsparungen ergeben sich daraus, dass nur ein senkrechtes Bohrloch anstatt mehrerer benötigt wird, um ein ausreichend großes Explorationsgebiet abzudecken [SPG Media 2006].

**Geochemische Verfahren** wie die **Röntgenfluoreszenzanalytik** werden eingesetzt, um die Element-Gesamtgehalte von Feststoffen quantitativ zu bestimmen. Üblich ist der Einsatz von Laborgeräten; mittlerweile gibt es aber auch tragbare Einheiten, die direkt vor Ort Aufschluss über den Wertstoffgehalt einer Lagerstätte geben können.

Die Erhöhung der Ausbeute der förderwürdigen Mineralien bei der Erzaufbereitung kann ebenfalls zu einer verbesserten Nutzung von Rohstoffquellen beitragen:

Biolaugung als  
Alternative zu  
herkömmlichen  
Laugungsverfahren

Als Alternative zu herkömmlichen Laugungsverfahren mit Säuren oder Basen, die das gewünschte Metall aus dem Gestein lösen, wird zunehmend das Verfahren der **Biolaugung** (Bioleaching) eingesetzt. Auf Basis eines mikrobiellen Aufschlusses lassen sich so auch Erze nutzen, die nach herkömmlichen Methoden nicht abbauwürdig wären. Dabei wird das zerkleinerte Erz mit einer mit Bakterien angereicherten sauren Lösung besprenkelt, die Wertstoffe – z. B. Kupfer oder Gold – aus dem Gestein löst. Die dabei eingesetzten Mikroorganismen – z. B. Bakterien, die zweiwertiges zu dreiwertigem Eisen oxidieren – kommen häufig natürlicherweise in der Umgebung von Lagerstätten vor, so dass man ihnen nur geeignete Umweltbedingungen bieten muss, um sie anzureichern. Ein Viertel der globalen Kupferproduktion stammt bereits aus der Biolaugung [Kehse 2006].

Derzeit wird in einem EU-Projekt untersucht, wie sich biologische Verfahren auch für komplexe Kupfererze oder für die Extraktion von Nickel und Zink nutzen lassen. Selbst metallhaltiger Sondermüll oder Staub aus geschreddertem Elektronikschrott lässt sich durch den Bakterieneinsatz aufbereiten [Kehse 2006], dabei werden Ausbeuten von bis zu 95 % erzielt.

Eine bessere Umweltverträglichkeit des Bioleaching-Verfahrens ergibt sich daraus, dass z. B. bei der Kupferaufbereitung auf das schwefelhaltige Abgase produzierende Röstverfahren sulfidischer Erze verzichtet werden kann, oder dass das in vielen Erzen enthaltene giftige Arsen durch die Bakterien in unschädliches Eisenarsenat umgewandelt wird.

Ein neues **Flotationsverfahren** könnte den Einsatz umweltschädlicher Flotationschemikalien reduzieren. An der Humboldt-Universität in Berlin wird derzeit erforscht, ob sich dazu auch Ultraschall einsetzen lässt. Bei der Trennung von Kohle und den mineralischen Bestandteilen soll mit dem neuen Verfahren gleichzeitig eine Steigerung der Ausbeute erzielt werden [Ehret 2005].

Neue  
Flotationsverfahren

#### 2.1.4 Mülldeponien als Rohstoffquellen

Eine bisher eher vernachlässigte Rohstoffquelle sind Mülldeponien. Durch die gestiegenen Rohstoffpreise und neue verfügbare Technologien zur Stofftrennung könnte die Rohstoffförderung aus Mülldeponien (engl. landfill mining) durchaus zu einem lukrativen Geschäft werden. So enthalten amerikanische Müllkippen mehr Aluminium als pro Jahr an Rohstoffen neu gewonnen wird. Auch PC-Schrott ist ein interessanter Rohstofflieferant: eine Tonne PC-Schrott enthält mehr Gold als 17 Tonnen goldhaltiges Gestein. Darüber hinaus werden die Japaner bis zum Jahr 2010 ca. 610 Millionen platinhaltige Mobiltelefone weggeworfen haben [Trendletter 2006].

Mülldeponien gelten  
als vernachlässigte  
Rohstoffquellen



**Abbildung 16:** Links: Metallgewinnung in der Deponie Elbisgraben, Schweiz [BAFU 2006]. Rechts: Der Müllberg der 16 Millionen Einwohnerstadt Manila ist über 40 Meter hoch angewachsen [Ärzte für die Dritte Welt 2007].

In den Müllverbrennungsanlagen der Schweiz fallen jährlich ca. 640.000 Tonnen Schlacke an. Darin enthalten sind – trotz Separatsammlung – einige zehntausend Tonnen Metall. Viele Gebrauchsgüter bestehen zudem aus Verbundstoffen - einer Kombination aus Metall, Kunststoff, Holz und Keramik, die sich im angelieferten Abfall nicht auftrennen lässt. Praxisversuche der Hochschule Rapperswil, Schweiz haben gezeigt, dass sich Metalle nach dem Verbrennen relativ einfach aus der Schlacke zurück gewinnen lassen (siehe auch Kapitel 2.3.3). So genannte Backenbrecher aus dem Bergbau zertrümmern die mineralischen Schlackebrocken. Die weniger als zwei Millimeter großen Krümel werden abgesiebt und zurück bleiben die größeren, lediglich verformten Metallstücke. Diese lassen sich schließlich – nach Sorten getrennt – als Rohstoffe wieder nutzen [BAFU 2006].

Im Hausmüll können  
einige zehntausend  
Tonnen Metall  
enthalten sein

Ein möglicher Weg  
Mülldeponien in  
Entwicklungsländern  
zu erschließen sind  
Bioreaktoren

Ein möglicher Weg Mülldeponien in Entwicklungsländern (siehe Abbildung 16 rechts) zu erschließen sind Bioreaktoren, die direkt auf den Müllhalden eingesetzt werden. Möglich wird dies, da der Müll in diesen Ländern mehr als 50 % organische Anteile und bis zu 40 % Wasser enthält (zum Vergleich: Der Wasseranteil des Hausmülls in den USA beträgt nur 25 %). So können einzelne abgeschlossene Bioreaktor-Zellen geschaffen werden, in denen die geeigneten Inhaltsstoffe vor Ort kontrolliert biologisch abgebaut werden. Erst wenn dieser Prozess abgeschlossen ist, würde man die Reaktoren öffnen und die Endprodukte nutzen. Im Mittel entstehen dabei 50 % Kompost und 10 % Metalle (die mit Metallabscheidern zu gewinnen wären). Der Rest ist Plastik und anderes inertes Material, das zum Beispiel in Treibstoffe umgewandelt werden könnte [Gräbner 2007].

Fazit: Steigender Rohstoffbedarf und steigende Rohstoffpreise sorgen für eine Stimulation der Rohstoffexploration. Die Suche nach neuen Rohstoffquellen konzentriert sich zunehmend auf die bisher wenig erforschten Polargebiete, die Schelfgebiete der Kontinente, ihre Ränder und die Tiefsee. Dabei können durch neue kostengünstige Verfahren auch in bereits erforschten Regionen Vorkommen erschlossen werden, die bisher nicht rentabel waren. Beispiele sind das Richtbohren oder auch neue Analysemethoden wie die Röntgenfluoreszenz für eine effizientere Nutzung von Lagerstätten. Daneben werden auch zunehmend umweltfreundlichere Verfahren wie das Biolaugen und chemiefreie Flotationsverfahren entwickelt und eingesetzt. Neue verfügbare Technologien zur Stofftrennung machen auch die Rohstoffförderung aus Mülldeponien (engl. landfill mining) zu einem lukrativen Geschäft.



## 2.2 Steigerung der Ressourceneffizienz

### 2.2.1 Potenziale

Die Verknappung von Rohstoffen macht die Steigerung der Ressourceneffizienz nicht nur zu einem umweltpolitischen sondern vor allem auch zu einem wirtschaftlichen Thema. Knappe Rohstoffe bedeuten hohe Preise, so dass mehr Effizienz mit einem hohen finanziellen Einsparpotenzial einhergeht. Kurz gefasst: „Mehr Ressourceneffizienz steigert die Wettbewerbsfähigkeit und entlastet die Umwelt“. Das Thema Ressourceneffizienz steht also in Zeiten hoher Rohstoffpreise sowohl in der Politik als auch in der Wirtschaft hoch im Kurs.

Mehr  
Ressourceneffizienz  
steigert die  
Wettbewerbs-  
fähigkeit und  
entlastet die Umwelt

Es gibt allerdings noch einen weiteren Aspekt, der Ressourceneffizienz attraktiv macht. Nicht nur die Preise für die Beschaffung von Rohstoffen sind gestiegen, sondern auch die Preise für die Entsorgung von Emissionen bei der Produktion, Nutzung und Entsorgung von Produkten steigen an. Beispiele dafür sind der Handel mit CO<sub>2</sub>-Zertifikaten im Rahmen des europäischen Handelssystems ETS, aber auch strengere Emissionsgrenzen und Richtlinien, wie die Diskussion um Obergrenzen beim CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Automobilbereich zeigt.

Ressourceneffizienz  
kann Emissionen  
reduzieren

Die Steigerung der Ressourceneffizienz verfolgt also zwei Ziele:

1. Verringerung des Rohstoffeinsatzes
2. Verringerung stofflicher Emissionen (Luft- und klimarelevante Schadstoffe, Schadstoffe in Abwässern, Siedlungs- und gewerbliche Abfälle)

Lebenszyklusanalysen liefern die Grundlage für Verbesserungen der Ressourceneffizienz. Dabei handelt es sich um Input-/Output-Analysen auf jeder Stufe der Wertschöpfungskette also von Gestaltung, Planung, Herstellung, Vertrieb, Gebrauch bis zur Entsorgung eines Produkts oder einer Dienstleistung.

Ein Beispiel für Ressourceneffizienzpotenziale liefert die Wertschöpfungskette von Papier (Abbildung 17) [Hawken 2000]. Auf der Stufe der Rohstoffgewinnung kann eine Ertragssteigerung des Zellstoffs pro Hektar um den Faktor 5,0 durch Bezug aus Weichholzplantagen statt aus natürlich gewachsenem Wald erreicht werden. Werden zusätzlich Nichtholzfasern (z. B. Stroh) plus Recyclingmaterial verwendet, erhöht sich die Rohstoffeffizienz noch einmal um den Faktor 1,67. Auf der Stufe der Produktion ist durch die Verwendung von weniger Fasern pro Blatt Papier eine Erhöhung der Materialeffizienz um den Faktor 1,33 möglich.

Ressourceneffizienz-  
potenziale am  
Beispiel der  
Papierherstellung

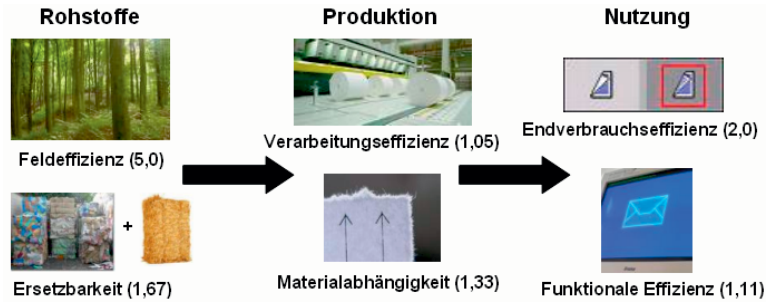


Abbildung 17: Effizienzpotenziale in der Wertschöpfungskette von Papier. Insgesamt erhält man Einsparungen um den Faktor 26 also 96 % weniger Waldfläche für Zellstoffanbau [Hawken 2000].

Durch verbesserte Verfahren und Geräte kann zusätzlich eine Steigerung der Verarbeitungseffizienz von Zellstofffabriken um den Faktor 1,05 erreicht werden. Bei der Papiernutzung kann durch die Einführung von beidseitigem Drucken und Kopieren, Wiederverwendung als Schmierpapier, etc. eine Erhöhung der Effizienz um den Faktor 2,0 erreicht werden. Die Vermeidung unerwünschter Ausdrücke von E-Mails könnte zusätzlich einen Faktor 1,11 bringen. Alle diese Maßnahmen zusammen multiplizieren sich zu einer Effizienzsteigerung um den Faktor 26. Das würde in diesem Beispiel eine Reduktion der Anbaufläche für den Zellstoff um 96 % bedeuten.

Papierherstellung und -nutzung bieten große Effizienzpotenziale

Der größte Hebel für mehr Effizienz liegt am Ende der Wertschöpfungskette

Das Beispiel Papier zeigt nicht nur, dass auf allen Stufen der Wertschöpfungskette Effizienzpotenziale vorhanden sind, sondern auch dass der größte Hebel für mehr Effizienz am Ende der Wertschöpfungskette liegt. Eine um den Faktor 2,0 erhöhte Effizienz bei der Nutzung bedeutet auch um den Faktor 2,0 geringere Produktion und um den Faktor 2,0 weniger Anbaufläche. Es lohnt sich also, die Wertschöpfungskette vom Ende her nach Potenzialen zu untersuchen. Denn mehr Effizienz beim Verbrauch bedeutet auch, dass kleinere Anlagen für die Bereitstellung von Energie und Materialien ausreichen und weniger Rohstoffe benötigt werden. Solche Effizienzgewinne multiplizieren sich mit jedem Schritt zurück zum Anfang der Wertschöpfungskette. Als Ergebnis können substantielle Einsparungen bei den Rohstoffen erzielt werden – z. B. eine um 96 % geringere Anbaufläche für Zellstoff zur Papierherstellung.

### 2.2.2 Produktgestaltung

Bei der Produktgestaltung wird die Basis für die Eigenschaften und den Aufbau von Produkten gelegt. Dabei sollten Produkte so gestaltet werden, dass die Umweltbelastungen während des gesamten Produktlebenszyklus möglichst klein gehalten werden. Das Konzept des Ökodesigns liefert dazu einen systematischen und umfassenden Betrachtungs- und Gestaltungsansatz. Es ermöglicht Produzenten, in

Ökologische Innovationen in jeder Phase der Wertschöpfung

jeder Phase der Wertschöpfung und des stofflichen Lebensweges ökologische Innovationen voranzubringen [UBA 2007].



**Abbildung 18: Der Bürostuhl „Picto“ als klassisches Beispiel für Ökodesign (nähere Erläuterung siehe Text) [Wilkhahn 2007].**

Ein klassisches Beispiel für Ökodesign ist der Bürostuhl „Picto“ von Wilkhahn, der bereits 1992 auf den Markt kam (siehe Abbildung 18). Der Stuhl besteht hauptsächlich aus drei Materialgruppen: Aluminiumdruckguß, das zwar mit großen Energieaufwand hergestellt wird, sich jedoch durch lange Haltbarkeit und sehr gute Recyclingfähigkeit auszeichnet, schwermetallfreiem Polypropylen und einheimischem Buchenholz. Zum Reparieren kann der Bürostuhl vollständig auseinander genommen werden, Kleber kommen nicht zum Einsatz. Die Bezüge sind aus Wolle oder Mischqualitäten und durch Klemmverbindungen abnehmbar. Ältere Modelle können beim Hersteller mit aktueller Technik aufgemöbelt werden, und die Rücknahme des ausgedienten Stuhls ist garantiert. Wiederverwertung und Recycling stehen bei der Entsorgung an erster Stelle [BUND 1997].

Bürostuhl Picto als  
Beispiel für  
Ökodesign

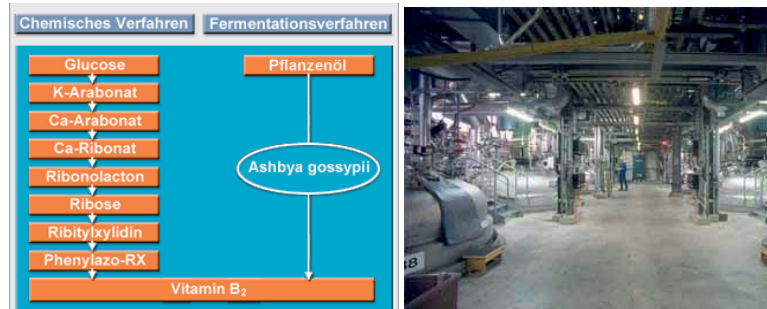
Um Produkte umweltverträglich zu gestalten, stehen unterstützende Instrumente wie Checklisten, Handbücher und Computerprogramme zur Verfügung, die eine quantitative und qualitative Bewertung von Produktentwürfen erlauben. Darüber hinaus werden Grundsätze des Ökodesigns mittlerweile auch in Produktnormen übernommen. Prominentes Beispiel ist die Richtlinie 2005/32/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte (EuP-Richtlinie oder Ökodesign-Richtlinie). Dort hat die Europäische Kommission erstmals die Anforderungen des Ökodesigns in einer Richtlinie explizit verankert [UBA 2007].

Quantitative und  
qualitative  
Bewertung von  
Produktentwürfen

### 2.2.3 Weiße Biotechnologie

Als weiße Biotechnologie wird die Nutzung biologischer Mittel und Verfahren für die Optimierung industrieller Prozesse bezeichnet. Dabei wird zwischen enzym- und zellkatalysierten Umsetzungen (Biotransformation) und fermentativer Herstellung unterschieden. Bei der Biotransformation entstehen Produkte in ein- oder wenigstufigen

Prozessen, während bei fermentativen Verfahren ganze Stoffwechselwege für die Produktion genutzt werden.



**Abbildung 19:** Herstellung des Vitamins B<sub>2</sub> bei BASF. Links: Vergleich des mehrstufigen chemischen Verfahrens mit der einstufigen Fermentation. Rechts: In großen Fermentern produzieren Kulturen des Pilzes *Ashbya gossypii* das Vitamin B<sub>2</sub> [BASF 2007].

Potenziale der  
weißen  
Biotechnologie

Das große Potenzial der weißen Biotechnologie liegt vor allem in der Einsparung von Syntheseschritten, im geringeren Rohstoffverbrauch, in der höheren Energieeffizienz, in verminderten Emissionen und dadurch in der Summe auch in einer Reduktion der Produktionskosten. Das Vitamin B<sub>2</sub> (Riboflavin) beispielsweise wurde bis 1990 in einer komplexen, mehrstufigen Synthese hergestellt, bis es Forschern und Entwicklern der BASF gelang, eine einstufige Fermentation auf der Basis von Sojaöl zu etablieren (siehe Abbildung 19). Dieses biotechnologische Verfahren wies gegenüber dem petrochemischen Verfahren große Vorteile auf: 95 % weniger Abfälle, 30 % weniger CO<sub>2</sub>-Emission und 60 % geringerer Ressourcenverbrauch. Dadurch sanken die Kosten für die Vitamin-B<sub>2</sub>-Herstellung um 40 % [Richter-Maierhofer 2005].

Anwendungsmöglich-  
keiten für weiße  
Biotechnologie

Die Anwendungen für die weiße Biotechnologie sind vielfältig. Von den mehr als 3.000 bekannten Enzymen werden bereits rund 150 kommerziell genutzt. Mit neuen, meist umweltfreundlicheren Verfahren und Produkten gewinnt die weiße Biotechnologie zunehmend auch in anderen Industriezweigen an Bedeutung, so in der Lebensmittel-, Textil-, Kosmetik- und Papierindustrie. Derzeit liegt der Anteil von Chemieprodukten, die biotechnologisch hergestellt werden, bei 5 %. Bis zum Jahr 2010 wird jedoch mit einer Erhöhung auf 10 bis 20 % gerechnet mit steigender Tendenz. Das heißt, dass bis 2010 die weiße Biotechnik an bis zu 60 % aller Chemieprodukte in irgendeiner Form beteiligt sein könnte [McKinsey 2003].

#### 2.2.4 Nanotechnologien

Vielfältige  
Potenziale der  
Nanotechnologien

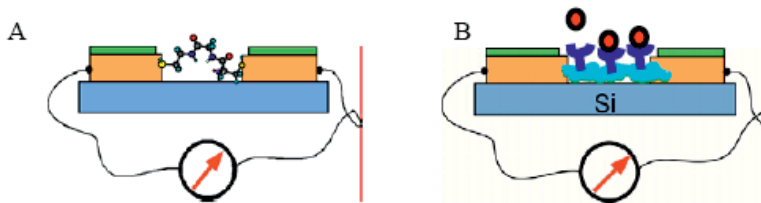
Nanotechnologische Lösungen bieten vielfältige Potenziale zur ressourceneffizienten Nutzung. Nanokatalysatoren zeichnen sich beispielweise durch ein hohes Oberflächen/Volumen-Verhältnis aus und damit einhergehend einer erhöhten Reaktivität. Chemische Reaktionen

lassen sich bei mildereren Bedingungen und mit höheren Ausbeuten umsetzen, das spart Material und Energie. Im Automobilbereich sorgen z. B. Nanopartikel aus Ceroxid als Treibstoffadditiv für eine effizientere Verbrennung und geringere Emissionen, dies führt zu Treibstoffeinsparungen. Nanoskalige Molybdänsulfid-Teilchen ( $\text{MoS}_2$ ) haben sich als effiziente Katalysatoren für die Entschwefelung von Kraftstoffen herausgestellt [Gemming 2007]. Nanokatalysatoren sind von solch elementarem Interesse, dass ihr Einsatz für viele weitere Bereiche untersucht wird.

Beispiel Nanopartikel aus Ceroxid optimieren den Verbrennungsprozess

Nanotechnologien für die Sensortechnologien sind vor dem Hintergrund eines effizienten Ressourceneinsatzes ebenfalls von großem Interesse (siehe Abbildung 20). Einerseits tragen sie zur Miniaturisierung der Bauteile bei, was Materialeinsparungen mit sich bringt und die Sensor-Geräte kleiner, leichter und mobiler macht. Andererseits sind Nanopartikel, wie beispielsweise Quantenpunkte vielversprechende Fluoreszenzmarker und auch nanoskalige Sonden für die Detektion verschiedener Pathogene oder Schwermetalle werden erforscht.

Verbesserung von Sensortechnologien



**Abbildung 20:** Zwei Beispiele für Nanosensoren. A: Zwischen zwei Elektroden wird ein leitfähiges Molekül mit spezifischer Sequenz eingebunden (z. B. ein Peptid). Dieses kann mit Metallionen interagieren – die daraus resultierende Änderung der Leitfähigkeit wird detektiert. B: Zum Nachweis großer Moleküle werden leitfähige Polymere, bestückt mit spezifischen Probenmolekülen, zwischen zwei Elektroden eingespannt. Bei Bindung der Zielmoleküle ändert sich die Leitfähigkeit.

Am Beispiel der Papierherstellung soll aufgezeigt werden, welche weitreichenden Einsatzmöglichkeiten für Nanotechnologien bestehen, in der industriellen Produktion effizient mit den relevanten Rohstoffen umzugehen:

Beispiel: Nanotechnologien in der Papierherstellung

Neue Nanomaterialien und insbesondere Nanokomposite können herkömmliche Materialien ersetzen und zu leichteren und widerstandfähigeren Materialien führen. Dadurch kann Material eingespart werden.

Nanopartikel und Nanokatalysatoren zeichnen sich durch große Oberflächen aus, insbesondere nanoskalige Flockungs-Systeme werden daher in der Papierherstellung untersucht. Aufgrund der höheren

Reaktivität der Nanoteilchen werden hiervon weniger benötigt als von traditionellen Flockungsmitteln.

Die Papierherstellung benötigt sehr viel Wasser; die Schließung des Wasserkreislaufs und die Behandlung des Abwassers mit nanoporösen Membranen können ebenfalls zu deutlichen Einsparungen an Betriebsmitteln führen.

Nanoskalige Pulver-  
beschichtungen von  
Papieren haben  
Vorteile

Die Beschichtung von Papieren mit z. B. Polymeren für eine bessere Haptik oder Optik ist heute oft Standard. Nanoskalige Pulverbeschichtungen haben gegenüber den heutigen nassen Verfahren einige Vorteile. Zum Einen muss das Papier nicht genässt und wieder getrocknet werden und zum Anderen werden chemische Zusätze eingespart; der Beschichtungsprozess wird insgesamt effizienter und es resultieren mitunter auch verbesserte Produkteigenschaften [Puurunen 2006].

Das Beispiel der Papierherstellung zeigt, wie Nanotechnologien über den gesamten Verlauf der Produktionskette zu Ressourceneinsparungen führen können, die direkt oder auch indirekt Einsparungen an Rohstoffen bedeuten.

Weitere  
Einsparmöglichkeiten  
durch  
Nanotechnologien

Weitere Ansatzpunkte für die Einsparung von Material- und Betriebsmitteln durch Nanotechnologien bieten sich beispielsweise im Bereich neuer Werkstoffe (siehe Kapitel 2.2.7) oder bei der Substitution von Rohstoffen (siehe Kapitel 2.4.2). Auch in zahlreichen anderen Bereichen bieten sich teils enorme Potenziale für einen effizienteren Umgang mit Ressourcen. Dies gilt z. B. für das Thema Energie. Effiziente Beleuchtungsquellen, nanoskalige Dämmmaterialien, neue Elektrodenmaterialien oder Oberflächenstrukturierungen sowie neue Treibstoffadditive werden mit großen Hoffnungen verbunden. Im Bereich Wasser und Boden ist z. B. der Einsatz von Nanotechnologien für die Wasserreinigung oder die zielgerechte Ausbringung von Pflanzenbehandlungsmitteln in der Landwirtschaft mittels nanotechnologischer Lösungen von breitem Interesse. In der industriellen Produktion lassen sich ganze Produktionsabläufe optimieren (siehe Beispiel Papier) und insbesondere nanoskalige Beschichtungen und Nanokomposite sind heute verbreitet zu finden. Für einen Überblick und weitere Beispiele siehe [Bachmann 2007].

### 2.2.5 Überkritische Fluide

Überkritische Fluide  
als umweltschonende  
Lösungs- und  
Reaktionsmittel

Überkritische Fluide sind gasförmige Stoffe mit Eigenschaften, die zwischen denen eines Gases und einer Flüssigkeit liegen. Durch Veränderung eines oder mehrerer Parameter im Phasendiagramm wie z. B. des Drucks lassen sich die Eigenschaften überkritischer Fluide kontinuierlich verändern, so dass sie sich entweder eher wie ein Gas oder eher wie eine Flüssigkeit verhalten (siehe Abbildung 21 links).

Überkritische Fluide werden als Lösungs- und Reaktionsmittel in folgenden Gebieten bereits wirtschaftlich eingesetzt:

- Stofftrennung, z. B. Entkoffeinierung von Kaffeebohnen und Teeblättern, Herstellung von Hopfenextrakt, Anreicherung von Vitaminen.
- Herstellung und Verarbeitung von Materialien, z. B. kleinste Partikel, dünne Schichten.
- Chemischen Reaktionen, z. B. Herstellung von Methyl ethylketon, Oxidation von Schadstoffen.

Um neuartige Prozesse für weitere Anwendungen überkritischer Fluide zu entwickeln, werden im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramms 1019 „Überkritische Fluide als Lösungs- und Reaktionsmittel“ ihre physikalisch-chemischen Eigenschaften, Phasengleichgewichte, Stoff- und Wärmeübertragung sowie chemische Kinetik bei hohen Drücken untersucht [DFG/SPP1019 2003].

DFG Schwerpunktprogramm 1019 „Überkritische Fluide als Lösungs- und Reaktionsmittel“

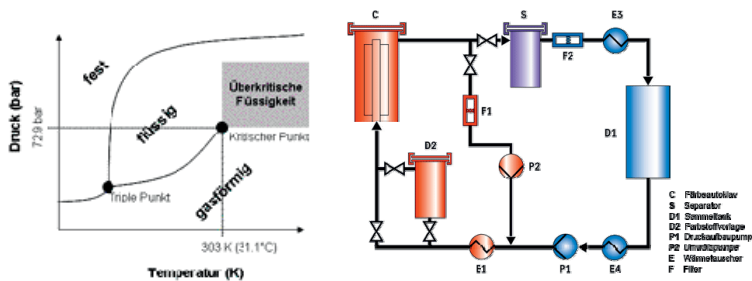


Abbildung 21: Links: Darstellung des überkritischen Bereichs in einem PT-Diagramm [JVSE 2007]. Rechts: Schema eines Färbeprozesses mit überkritischem CO<sub>2</sub> [Uhde 2007].

Die besonderen Eigenschaften überkritischer Fluide ermöglichen neue und umweltschonende Verfahren in der Produktion. So haben z. B. die ADO Gardinenwerke GmbH & Co. und Uhde High Pressure Technologies gemeinsam mit Forschern vom Deutschen Textilforschungszentrum Nord-West in Krefeld das Wasser beim Färben von Stoffen mit überkritischem CO<sub>2</sub> ersetzt (siehe Abbildung 21 rechts). Die Vorteile des innovativen Verfahrens liegen vor allem in seiner Umweltfreundlichkeit: Der bei der Färbung nicht verbrauchte Farbstoff liegt nach dem Prozess in Pulverform vor und es entsteht kein Abwasser. Das verwendete CO<sub>2</sub> kann zu über 90 % recycelt werden. Im Unterschied zur Wasserfärbung bedarf es auch keiner Nachwäsche der gefärbten Textilien mit schwefelhaltigen Substanzen, die die kommunalen Kläranlagen belasten. Zudem entfällt die Trocknung der gefärbten Ware. Solche verkürzten Prozesszeiten sparen zusätzliche Energie. Gewonnen wird das CO<sub>2</sub> größtenteils aus der Abluft bestehender Prozesse zur Gewinnung stickstoffhaltiger Substanzen. Deshalb erfolgt keine zusätzliche Umweltbelastung oder Förderung der Aufheizung der

Beispiel:  
Wasserfreie  
Textilfärbung

Erdatmosphäre durch den Einsatz des Kohlendioxids in der Textilveredelung [Behr 2003].

### 2.2.6 Bionik

Verfahrens- und Entwicklungsprinzipien biologischer Systeme

Das Wort Bionik setzt sich aus den Begriffen Biologie und Technik zusammen. Bionik als wissenschaftliche Disziplin befasst sich mit der technischen Umsetzung von Konstruktions-, Verfahrens- und Entwicklungsprinzipien biologischer Systeme [VDI 1993]. In der Biologie haben diejenigen Populationen, die in der Lage sind, mit knappen Ressourcen besonders effizient umzugehen, Vorteile. Das Wachstum und Wohlergehen von Organismen und Populationen wird durch limitierende Faktoren [Odum 1983], wie z. B. das Angebot von Licht, Wasser, Nährstoffe und Lebensraum, begrenzt. Organismen müssen mit dem zurechtkommen, was sie vorfinden (Opportunismusprinzip). Daher gibt es in der Natur erstaunliche Beispiele für einen besonders effizienten Umgang mit knappen Ressourcen und damit mögliche Vorbilder für Nachhaltigkeit in ressourcenökonomischer Hinsicht [Oertel/Grunwald 2006].

Natürliche biologische Materialien besitzen oft wünschenswerte Eigenschaften

Natürliche biologische Materialien besitzen häufig eine hohe Stabilität und Funktionalität bei verhältnismäßig geringem Materialeinsatz. Ihre besonderen mechanischen Eigenschaften erzielen sie mit Materialien, die in der Natur leicht verfügbar sind.

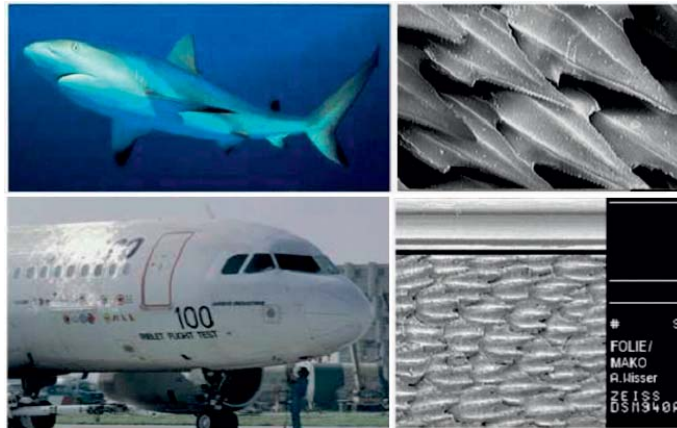


Abbildung 22: Haihaut (Vergrößerung oben rechts) als Vorbild für Oberflächen mit reduziertem Strömungswiderstand. Durch die Beschichtung mit einer analog strukturierten Folie (rechts unten) konnte der Strömungswiderstand eines Airbus um 8 % und der Treibstoffverbrauch um 4 % reduziert werden [HTW 2006].

Das Ergebnis sind oftmals streng funktionell, hierarchisch aufgebaute Werkstoffe, da natürliche Systeme während ihres Wachstums sukzessiv aus einzelnen Molekülen aufgebaut werden (bottom-up). Ein charakteristisches Merkmal natürlicher Materialien ist die Verwendung chemisch identischer Grundwerkstoffe, die aufgrund ihrer



unterschiedlichen Strukturierung unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen. Viele biologische Materialien sind Mehrkomponentenmaterialien oder Composite. Dadurch finden sich in der Natur auch ungewöhnliche Kombination von Materialeigenschaften, wie z. B. Festigkeit und Elastizität. Nicht zuletzt ist die Lebensdauer natürlicher Materialien an ihre Funktion angepasst. Sie sind biologisch abbaubar und damit Bestandteil eines natürlichen Kreislaufs [Oertel/Grunwald 2006].

Die bekanntesten Beispiele für die technische Umsetzung biologischer Prinzipien sind der Klettverschluss und der Lotuseffekt. Abbildung 22 zeigt ein Beispiel, bei dem ebenfalls die Oberflächenstruktur eine entscheidende Rolle spielt. So führten Analogiebetrachtungen an der Feinstruktur der Schuppen eines Mako-Haifisches zu den sog. Riblet-Folien. Durch die Oberflächenstruktur besitzt die Haihaut einen erheblich geringeren Strömungswiderstand als die glatten Schuppenoberflächen anderer Fische und kann sich erheblich schneller im Wasser vorwärts bewegen. Die Firma 3M hat diesen Riblet-Effekt 1990 in einer Folie umgesetzt, die auf einem Testflugzeug des Typs Airbus aufgebracht wurde. Dadurch konnte die Wandreibung um 8 % verringert werden. Da 50 % des Gesamtwiderstandes eines Flugzeuges durch die Wandreibung entstehen, konnte eine Reduktion des Treibstoffverbrauchs um 4 % erzielt werden [HTW 2006].

Eine Vielzahl weiterer Beispiele hat bereits gezeigt, dass die Natur mit den Konstruktions-, Verfahrens- und Entwicklungsprinzipien biologischer Systeme eine ideale Basis für die Entwicklung ressourceneffizienter Materialien bietet. Die Herausforderung besteht dabei nicht nur im Auffinden und Verstehen neuer Prinzipien, sondern vor allem auch in der technischen Umsetzung bereits bekannter Prinzipien.

### 2.2.7 Neue Werkstoffe und werkstoffgerechte Konstruktion

Mit einem Kostenanteil von rund 40 % ist der Materialeinsatz der größte Kostenfaktor im verarbeitenden Gewerbe (siehe Abbildung 23). Im Jahr 2004 haben Deutschlands Unternehmen allein für Material rund 600 Milliarden Euro ausgegeben. Im Branchendurchschnitt sehen Experten in diesem Bereich noch erhebliche Einsparpotenziale in der Größenordnung von 10–15 %. In einigen Bereichen seien sogar bis zu 30 % möglich [VDI-Expertenforum 2007]. Ansatzpunkte für diese Einsparungen können organisatorische, technische Maßnahmen oder direkte Änderungen an den Produkten unter Effizienzgesichtspunkten sein.

Haihaut als Vorbild für die Verringerung des Luftwiderstands von Flugzeugen

Technische Umsetzung biologischer Prinzipien als Herausforderung

Erhebliche Einsparpotenziale bei Materialien

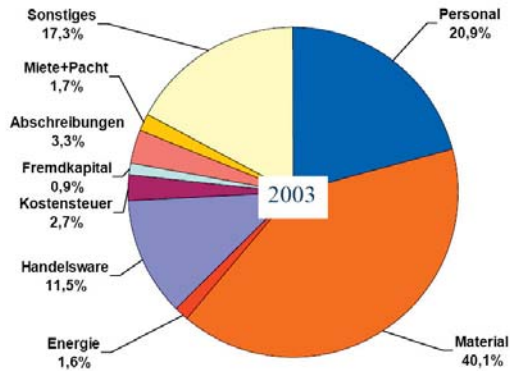


Abbildung 23: Kostenstruktur im verarbeitenden Gewerbe in Deutschland im Jahr 2003 (Quelle: Statistisches Bundesamt) [demea 2006].

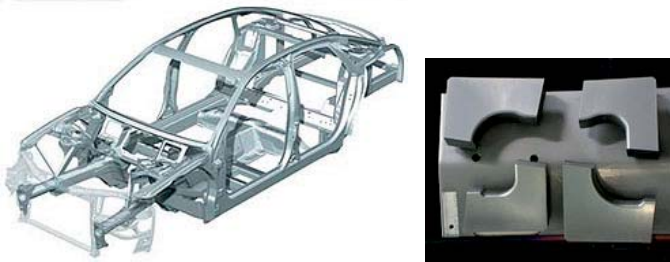
Mehr Material-  
effizienz bietet der  
Leichtbau

Eine Möglichkeit für mehr Materialeffizienz bietet der Leichtbau. Dabei können nicht nur Gewicht und Kosten gesenkt werden, sondern Produkten auch neue Eigenschaften verliehen werden. Der Leichtbau ist daher eine Gemeinschaftsaufgabe von Konstruktions-, Werkstoff- und Fertigungstechnik. Eine Orientierung für den Einsatz des Leichtbaus bietet die Bionik (siehe Kapitel 2.2.6). Denn: „Ein hervorragender Lehrmeister für einen effizienten Leichtbau ist die Natur mit ihrer Adaptionsfähigkeit an äußere Belastungen – mechanisch, thermisch, medial – bei hoher Energie- und Materialeffizienz.“ [Hufenbach 2007]. Branchenübergreifend lohnende Ansatzpunkte für den Leichtbau sind: die Materialauswahl, die virtuelle Produktentwicklung und der Fertigungsprozess. So verringern zum Beispiel die Hersteller von Premiumfahrzeugen durch einen optimalen Mix aus Verbundwerkstoffen das Fahrzeuggewicht. Die notwendige Steifigkeit wird durch unterschiedliche Wandstärken in den Blechen oder mit Hilfe von Aluminiumprofilen erzielt (siehe Abbildung 24 links). Große Potenziale für Gewichtseinsparungen bieten auch faserverstärkte Kunststoffe. So lässt sich zum Beispiel in der Fördertechnik das Gewicht von Fahrkörben um 50 % reduzieren. Neben Energieeinsparungen werden so auch neue Antriebskonzepte ermöglicht, die mit einem geringeren Platzbedarf für Maschinenräume einhergehen.

Nanokomposite und  
neue  
Nanomaterialien

Im Bereich Werkstoffe und Leichtbau sind auch Nanotechnologien von immer stärkerem Interesse. Ein prominentes Beispiel sind Kohlenstoffnanoröhren, die unterschiedlichen Artikeln, besonders aus dem Sport- und Automobilbereich beigemischt werden. Die Verbundmaterialien zeichnen sich besonders durch hohe Festigkeit und ein geringes Gewicht – ein Viertel von Stahl – aus. Kohlenstoffnanoröhren werden daher intensiv als Kompositmaterialien für Kunststoffe, Metalle und Keramiken untersucht.

Im klassischen Maschinenbau mit schnell bewegten Komponenten bieten textilverstärkte Composite ganz neue Lösungen. So wird beim Gehäuse eines Hubschraubergetriebes durch textilverstärkte Leichtbauweise mit beanspruchungsgerechten Einleitungsbereichen eine Gewichtsreduzierung von 35 % erzielt. Auch in der Bioverfahrenstechnik und bei erneuerbaren Energien ergeben sich durch technologische Neuentwicklungen mittels intelligenter Verbundstoffe und integrierter Aktuatorik und Sensorik neue Möglichkeiten. Entscheidend ist der Einsatz des richtigen Materials an der richtigen Stelle zum richtigen Preis [Hufenbach 2007].



**Abbildung 24:** Links: Audi hat mit dem Spaceframe ein Konzept für den Einsatz von Aluminium für den Rahmen in Serienfahrzeugen entwickelt [Kollmann 2006]. Rechts: Harteste Beschichtung eines Umformwerkzeuges nach dem Diamor-Verfahren [FHG IWS 2007].

Neben dem Leichtbau bietet auch die Dünnschichttechnologie große Potenziale zur Materialeinsparung. In allen Bereichen, in denen der Oberfläche eine zentrale Funktion zukommt, kann durch das Aufbringen dünner Schichten auf ein günstiges Trägermaterial Energie und Material eingespart werden. Bekanntestes Beispiel ist die Fotovoltaik. Im Gegensatz zu den Silizium-Zellen, die aus mono- oder multikristallinen Si-Blöcken zu 0,1–0,2 mm dicken Wafern gesägt werden, wird bei Dünnschichtzellen die aktive Schicht auf ein Substrat aufgebracht. Die Dicke der Schicht beträgt dabei nur ca. 1–2  $\mu\text{m}$ . Gängige Materialien für Dünnschichtzellen sind: amorphes Silizium (a-Si:H), mikrokristallines Silizium ( $\mu\text{c-Si:H}$ ), Gallium-Arsenid (GaAs), Cadmium-Tellurid (CdTe) oder Kupfer-Indium-(Gallium)-Schwefel-Selen-Verbindungen (CIS). Die Energie- und Ressourceneffizienz dieser Ansätze drückt sich in der energetischen Amortisation der unterschiedlichen Zellen aus. Die energetische Amortisation beschreibt den Zeitpunkt, zu dem die Energie, die für die Herstellung einer Photovoltaikzelle aufgewandt wurde, durch selbige wieder erzeugt wurde. Bei dieser Kennzahl schneiden Dünnschichtzellen wie amorphes Silizium und CIS am besten ab (siehe Tabelle 7).

Andere Anwendungsbereiche der Dünnschichttechnologie betreffen den Schutz von Oberflächen vor Beschädigung, Abrieb, Korrosion, Schmutz und Bakterien. So hat zum Beispiel das Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS) in Dresden eine superharte

Dünnschicht-  
technologie spart  
Energie und Material

Schutz von  
Oberflächen,  
Beschichtungen

Kohlenstoffschicht entwickelt, die sich bei Raumtemperatur auf Werkzeuge und Maschinenkomponenten auftragen lässt. Dadurch kann selbst auf Kunststoffe eine verschleißfeste Oberfläche aufgetragen werden, die aufgrund geringer Adhäsion wenig oder keine Schmiermittel benötigt. Ein erfolgreiches Anwendungsbeispiel wurde mit einem beschichteten Tiefenziehwerkzeug realisiert, das statt der üblichen 120.000 Hübe die zehnfache Leistung erbringt (siehe Abbildung 24 rechts). Auch nanotribologische Schichten z. B. im Motorbau auf den Oberflächen von Zylindern, Kolben oder Kugellagern verringern Reibung und Verschleiß; bis zu 15 % Treibstoff lassen sich einsparen.<sup>9</sup>

Solarzellentyp	Energetische Amortisationszeit
monokristallines -Si	4,6 Jahre
multikristallines Si	3,2 Jahre
amorphes Si	2,3 Jahre
CIS	1,3 Jahre

**Tabelle 7: Energetische Amortisationszeiten für verschiedenen Typen von Solarzellen. Verändert nach [Quaschnig 2002].**

Weitere potenzielle Einsatzgebiete finden sich überall dort, wo in der Produktion keine Schmiermittel eingesetzt werden dürfen, wie in der Lebensmittelindustrie, Pharmazie und Textilherstellung [VDI-Expertenforum 2007].

Fazit: Die Steigerung der Ressourceneffizienz verfolgt zwei Ziele. Erstens die Verringerung des Rohstoffeinsatzes und zweitens die Verringerung stofflicher Emissionen (Luft- und klimarelevante Schadstoffe, Schadstoffe in Abwässern, Siedlungs- und gewerbliche Abfälle). Lebenszyklusanalysen liefern mit Input-/Output-Analysen auf jeder Stufe der Wertschöpfungskette die Grundlage zur Verbesserung der Ressourceneffizienz. Dabei geht es sowohl um die Optimierung der Produktgestaltung als auch um neue Verfahren wie die weiße Biotechnologie, die Anwendung überkritischer Fluide oder den Einsatz von Nanotechnologien. Weitere Quellen höherer Effizienz können neue Werkstoffe und die Prinzipien der Bionik sein. Dabei lohnt es sich, die Wertschöpfungskette vom Ende her nach Potenzialen zu untersuchen, da sich Effizienzgewinne direkt auf alle vorgelagerten Stufen auswirken. So bedeutet z. B. ein geringerer Papierverbrauch weniger Rohstoffe, Wasser und Energie in der Produktion und dadurch auch weniger Bäume für Papierfasern.

<sup>9</sup> <http://www.div-blickpunkt.de/bw12-07/blick-4.htm>

## 2.3 Erhöhung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen

### 2.3.1 Potenziale

Nach Aussagen des „Sustainability Yearbook 2007“ der SAM Group gibt Europa ca. 300 Milliarden Euro jährlich für Müllbeseitigung und Recycling aus. Weltweit wird nur ein Drittel des erzeugten Mülls recycelt. Die restlichen zwei Drittel landen auf Deponien [SAM Group 2007]. Gängige metallische Rohstoffe, die in Deutschland zu Sekundärrohstoffen recycelt werden, sind Eisen und Stahl, Blei, Kupfer, Zink sowie Aluminium. Weitere nichtmetallische Materialgruppen sind Glas, Papier und Pappe, Kunststoffe sowie Verbundstoffe.

Die Verteuerung der Rohstoffe in den letzten Jahren hat auch der Recyclingbranche neue Perspektiven eröffnet. Denn mit der verstärkten Nachfrage nach Rohstoffen im Allgemeinen stiegen nicht nur die Preise für Primärstoffe, sondern auch die Preise für Sekundärrohstoffe. So stieg der Preis für Stahlschrott aufgrund der starken Nachfrage aus China seit Mitte 2003 bis Mitte 2007 um annähernd 250 % [BDE 2007].

Nur ein Drittel des weltweiten Mülls wird recycelt

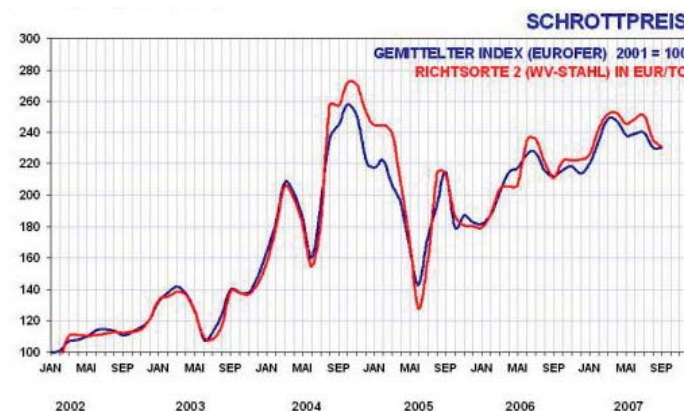


Abbildung 25: Entwicklung der Schrottpreise in den Jahren 2002 - 2007 [BDE 2007].

Die weltweite Produktion von Sekundäraluminium lag im Jahr 2004 bei 7,8 Millionen Tonnen, wovon 2,4 Millionen Tonnen auf das Konto der EU gehen. In Deutschland wurden im Jahr 2006 795.500 Tonnen produziert – etwa 25 % der jährlichen Gesamtproduktion von Aluminium (ca. 75 % sind Primäraluminium); mit steigender Tendenz wie in den meisten Industriestaaten. Ein zentraler Aspekt des Aluminiumrecyclings ist die Energieeffizienz. Der Energieeinsatz ist bis zu 95 % niedriger als bei der Gewinnung von Primäraluminium. In Deutschland beträgt die Aluminium-Recyclingrate im Verkehrs- und Bausektor über 95 %, und bei den Verpackungen insgesamt 76 %. In diesem Bereich liegt

Sekundäraluminium als Rohstoffquelle

Deutschland deutlich über dem europäischen Durchschnitt von 40 % [aluinfo 2007].

Rohstoff	Recyclingrate <sup>1</sup> (2005) [ %]	geschätzte Recyclingrate <sup>2</sup> 2025 [ %]
Aluminium	35	50
Blei	59	-
Eisen	55	50
Kobalt	20 - 25	-
Kupfer	54	35 - 50
Molybdän	10	-
Nickel (EU-15)	35 - 45	-
Tantal (USA)	20	Potenzial vorhanden
Zink	41 (2003)	40

<sup>1</sup>in Deutschland, <sup>2</sup>global

**Tabelle 8: Aktuelle und geschätzte künftige Recyclingraten wichtiger Rohstoffe [BGR 2005b] [Fronde 2005].**

Recyclingrate von  
Stahlschrott  
zwischen 44 % und  
70 %

Ein Vergleich des Einsatzes von Stahlschrott bei der Stahlerzeugung zeigt eine breite Streuung des Recyclinganteils verschiedener Länder: Deutschland liegt mit einer Recyclingrate von 44 % bei der Stahlerzeugung im Mittelfeld, während die USA mit 70 % Spitzenreiter sind und in China nur 22 % Schrott für die Stahlproduktion eingesetzt werden [Bardt 2006]. Ein Grund für die unterschiedlichen Recyclingraten sind die unterschiedlichen Verfahren, die für die Stahlerzeugung vorwiegend eingesetzt werden: Das in Deutschland weit verbreitete Oxygenstahlverfahren erlaubt keinen so hohen Einsatz von Stahlschrott wie das in anderen Ländern angewandte Elektrostahlverfahren.

Energieeinsparung  
durch Recycling

Der Einsatz von Sekundärrohstoffen und Recycling ist nicht nur durch die Materialeinsparungen attraktiv, sondern auch durch die mit dem Recycling verbundenen Energieeinsparungen. So wird geschätzt, dass der Einsatz von Sekundärrohstoffen anstelle der Primärstoffe für Stahl, Aluminium, Brennstoffe, Verpackungen und Zink in Deutschland 2005 zu einer zusätzlichen Wertschöpfung von 3,7 Milliarden Euro geführt hat. Dabei entfallen rund zwei Drittel auf die damit verbundenen Energieeinsparungen. Tabelle 9 beziffert die eingesparten Importe von Primärrohstoffen und die Energieeinsparungen durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen in Deutschland im Jahr 2005 [Bardt 2006].

	eingesparte Primärrohstoffe	eingesparte Energie	Summe
<b>Stahl</b>	1.234	1.062	2.296
<b>Aluminium</b>	138	566	704
<b>Brennstoffe</b>	–	343	343
<b>Verpackungen</b>	–	225	225
<b>Zink</b>	70	25	95
<b>Gesamt</b>	1.442	2.221	3.663

**Tabelle 9: Zusätzliche Wertschöpfung aufgrund des Einsatzes von Sekundärrohstoffen in Deutschland im Jahr 2005 durch eingesparte Importe von Primärrohstoffen und Energieeinsparungen in Millionen Euro [Bardt 2006]. Stahl: Energieeinsparungen aus der Produktion von Elektro Stahl. Verpackungen: vom Dualen System Deutschland gesammelte Verpackungen, ohne Weißblech und Aluminium, Energie einschließlich Energieträger als Primärrohstoffe (Quelle: Institut der deutschen Wirtschaft Köln).**

Auch bei Kunststoffen spielt Recycling eine immer wichtigere Rolle. So wird der Weltmarkt für das PET-Recycling zurzeit mit extremen Veränderungen in der gesamten Polyester-Recycling-Kette konfrontiert. Aufgrund der hohen Nachfrage der boomenden chinesischen Textilindustrie verändern sich Materialpreise und Absatzwege. In China werden PET-Flaschen zu Polyesterfasern weiterverarbeitet, aus denen Kleidung oder auch Teppiche gefertigt werden.

Recycling von Kunststoffen

Die Menge der in Europa gesammelten gebrauchten PET-Artikel erreichte 2005 ein Volumen von 796.000 Tonnen, das sind 15,1 % mehr als im Vorjahr. Dies geht aus einer Statistik von Petcore<sup>10</sup>, Brüssel, hervor. Dabei steigt die Sammlungsrate weiterhin deutlich stärker als der PET-Verbrauch. Den größten Anteil daran hatte 2005 Deutschland, wo 32 % der verkauften PET-Behälter oder gut 200.000 Tonnen gesammelt wurden.

Sammlerate gebrauchter PET-Artikel bis 32 %

Der Export zurückgegebener PET-Flaschen nach Fernost ging leicht von 18,8 % auf 17,6 % oder 140.000 Tonnen zurück. 100.000 Tonnen dieses exportierten Leerguts stammten trotz der großen Recyclingkapazitäten in Deutschland und den angrenzenden Ländern von deutschen Einzelhändlern [Plastverarbeiter 2006]. Die enorme Nachfrage aus Asien bedroht die deutsche PET-Recycling-Industrie. Die sieht ihre Chance nun in der Verarbeitung des wertvollen Rohmaterials zu höherwertigen Endprodukten [Plasticker 2006]. Im Jahr 2006 wurden die meisten rückgeführten PET-Behälter (57 %) zu Polyesterfaserprodukten recycelt, wobei dieser Anteil rückläufig ist (70 % in 2003 gegenüber 65 % in 2004). Im Gegensatz dazu verdreifachte sich die Verwendung von PET-

<sup>10</sup> PET containers recycling Europe

Rezyklat für Polyesterplatten für thermogeformte Anwendungen in den Jahren 2004 und 2005 auf 16,2 %. Auch die Wiederverwendung in PET-Flaschen (bottle-to-bottle) nahm stetig zu und lag 2006 bei 15,2 %, während andere Absatzmärkte wie Umreifungen mit 7,8 % relativ gering blieben [Plastverarbeiter 2006].

### 2.3.2 Logistik

Effiziente Sammlung  
von  
Sekundärrohstoffen

Die Gewinnung von Sekundärrohstoffen beginnt in der Regel mit der Sammlung des zu recycelnden Materials. Zur Optimierung dieses Prozesses kommen bereits neueste Technologien aus dem Bereich Logistik zum Einsatz. So sammelt die Scholz Recycling GmbH an über 200 Standorten in knapp 10.000 Abfallcontainern die unterschiedlichsten Metallschrottsorten. Dieser Sekundärrohstoff wird nach einer eventuell notwendigen Aufbereitung wieder dem Rohstoffkreislauf zugeführt. Zur Optimierung des internen Container-Managements hat das Recycling-Unternehmen im Rahmen der Betriebsdatenerfassung eine RFID-basierte Container-Kennzeichnung eingeführt (siehe Abbildung 26 links). Dadurch konnten Arbeitsabläufe erleichtert und der Informationsstand deutlich verbessert werden [RFID-Atlas 2006].



**Abbildung 26:** Links: RFID-Transponder an einem Container für Metallschrott [RFID-Atlas 2006]. Rechts: Die Kennzeichnung elektronischer Geräte mit Smart Labels soll die Aufbereitung von Elektronikschrott effizienter gestalten [ELVIES 2007].

Im Rahmen des Verbundprojekts „Effiziente Logistik und Verwertung durch den integrierten Einsatz von Smartlabels im Elektro- und Elektronikschrott (ELVIES)“ werden die Anforderungen an Produktkennzeichnungssysteme für eine effizienzoptimierte Gestaltung von Logistik, Rücknahme, Recycling und Entsorgung untersucht [ELVIES 2007]. Im Rahmen des Elektro- und Elektronikgerätegesetzes (ElektroG) besteht für die Hersteller die Pflicht, ein Sammel- und Verwertungssystem für ihre Altgeräte zu etablieren, dessen Kosten sie zu tragen haben. Durch den Einsatz „intelligenter“ Technologien lassen sich die Kosten eines solchen Kreislaufwirtschaftssystems deutlich verringern. Daher untersucht das Projekt, wie vorhandene moderne Technologien, zum Beispiel Smart-Labels, im logistischen System der Einsammlung, Sortierung und Verwertung von Altgeräten

Intelligente  
Technologien  
verringern Kosten



effizienzsteigernd eingesetzt werden können. Darüber hinaus würde ein solches System die Chance bieten, den Ansatz der „Integrierten Produktpolitik“ (IPP) der EU besser zu verwirklichen [ELVIES 2007].

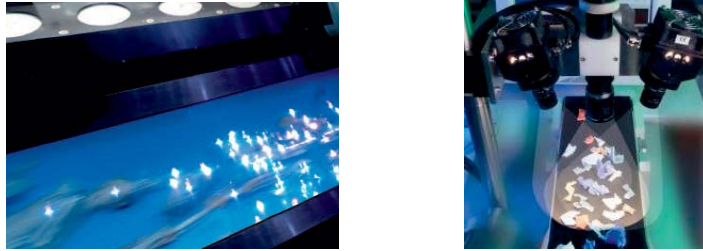
### 2.3.3 Sortierung und Aufbereitung

Eines der wichtigsten Kriterien für die Einsatzmöglichkeiten von Sekundärrohstoffen ist deren Qualität. Die Kunst besteht darin, die Qualitätsanforderungen der Nachfrager mit möglichst effizienten Verfahren zu erreichen. Die Sortierung steht am Anfang der Aufbereitung heterogener Abfallgemische. Mit immer präziseren Messmethoden versucht die Recyclingbranche schon bei der Sortierung eine möglichst große Stoffqualität sicherzustellen. Bei „klassischen“ Sortieraggregaten wie Magnetscheidern, Wirbelstromscheidern oder Windsichtern interagiert ein Kraftfeld direkt mit den spezifischen Materialeigenschaften wie Magnetisierbarkeit, Leitfähigkeit oder Flugfähigkeit und sorgt so für eine räumliche Trennung der unterschiedlichen Fraktionen. Kriterien wie Farbe, Form, Transmissionsverhalten oder Volumen lassen sich mit solchen Verfahren jedoch nicht als Trennmerkmal nutzen. Erst durch den Einsatz einer sensorgestützten Sortierung erschließt sich die Möglichkeit, eine oder sogar mehrere bisher ungenutzte Stoffeigenschaften gleichzeitig für eine Sortierung zu verwenden [Killmann 2006].

Qualität von  
Sekundärrohstoffen  
- Sortierung  
entscheidend

Ein Beispiel stellt die Verarbeitung von Aluminiumschrotten in Sekundärschmelzwerken zu hochwertigem Aluminium dar. Nur wenn der Schrott in Form von sortenreinen Guss- oder Knetlegierungen vorliegt, ist diese Art der Verarbeitung möglich. Derzeit sind automatisch arbeitende Sortiergeräte zur Trennung in Guss- und Knetlegierungen für ein werkstoffliches Recycling auf hohem Qualitätsniveau noch nicht verfügbar. Daher entwickelt das Fraunhofer Institut für Lasertechnik ILT im Rahmen des Verbundprojektes SILAS ein neues, lasergestütztes Identifikationsverfahren, mit dem ein hoher Materialdurchsatz bei gleichzeitig hohem Reinheitsgrad der sortierten Fraktionen erreichbar ist. Ziel des Projektes ist der Aufbau einer Testanlage, mit der die Funktionsfähigkeit des Verfahrens unter praxisrelevanten Betriebsbedingungen nachgewiesen werden kann. Der Verfahrensansatz beruht auf einer Kombination aus Bildverarbeitung, lasergestützter Geometrieerfassung und Laser-Emissionsspektrometrie (siehe Abbildung 27 links). Neben geometrischen und optischen Merkmalen des Sortiergutes wird die chemische Zusammensetzung der Einzelkörner laserspektroskopisch bestimmt und das Sortiergut anschließend entsprechend der auf den Messgrößen basierenden Sortierentscheidung automatisch in zwei oder mehr Fraktionen getrennt [Fraunhofer ILT 2007].

Beispiel  
Aluminiumschrott



**Abbildung 27:** Links: Momentaufnahme der Online-Analyse mit Laser-Emissionsspektrometrie von Al-Schrottproben [Fraunhofer ILT 2007]. Rechts: Sortierung von Altpapier mit NIR-Spektroskopie [INGEDE 2007].

Flexodruck  
erschwert das  
Papierrecycling

Deutschland ist der fünftgrößte Papiererzeuger der Welt. Im Jahr 2005 betrug die Gesamtproduktion 21,7 Millionen Tonnen, der Verbrauch belief sich hier zu Lande auf 19,2 Millionen Tonnen. Davon wurden 15,1 Millionen Tonnen als Altpapier gesammelt, das entspricht einer Rücklaufquote von 79 % [Linsmeier 2007]. Was passiert, wenn bei der Entwicklung neuer Herstellungsverfahren von Produkten nicht die gesamte Wertschöpfungskette bis zur Wiederverwertung betrachtet wird, zeigt folgendes Beispiel. Für das Papierrecycling muss das gesammelte Papier zunächst von papierfremden Bestandteilen wie Holz, Kunststoffen, Metallen oder Textilien getrennt werden. Doch für die Herstellung von hellem Recyclingpapier reicht das seit einiger Zeit nicht mehr aus. Um aus Altpapier das weiße Papier für Zeitungen und Zeitschriften, Kopierpapier oder Hygienepapiere herzustellen, muss die Druckfarbe entfernt werden – diesen Prozess bezeichnet man als Deinking (nach dem englischen Wort „ink“ für Druckfarbe). Dieses Verfahren funktioniert bei herkömmlichen Offsetdruckfarben, aber nicht beim so genannten Flexodruck. Ein Verfahren, das seit einigen Jahren auch für Zeitungen eingesetzt wird. Das hat zur Folge, dass die Flexozeitungen vor dem Recycling aussortiert werden müssen. Dazu entwickelt INGEDE<sup>11</sup> zusammen mit dem Forschungszentrum CTR<sup>12</sup> in Villach, Österreich eine Sortieranlage, die durch Sensorsysteme im nahen Infrarot und im sichtbaren Licht den „stofflichen Fingerabdruck“ der Altpapierproben misst (siehe Abbildung 27 rechts). Bisher wurden mit dem System Kartons aus dem Altpapier entfernt. Das weiterentwickelte neue System hat eine höhere Auflösung und einen größeren Spektralbereich, um so auch Papier mit Flexodruckfarben erkennen und aussortieren zu können [INGEDE 2007].

Moderne  
Sortieranlagen  
stellen Mülltrennung  
in Haushalten in  
Frage

Aufgrund der großen Fortschritte im Bereich der Sortiertechnologien wurde bereits 2002 in einer Studie der Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg gefordert, bis auf Glas und Papier die Mülltrennung von Küchenabfällen und

<sup>11</sup> Internationale Forschungsgemeinschaft Deinking-Technik

<sup>12</sup> Carinthian Tech Research AG

Kunststoffverpackungen in Haushalten aufzugeben. So kann in der Inertstoffaufbereitung einer Trockenstabilatanlage<sup>13</sup> die Schwergutfraktion in die Fraktionen Eisen, Nichteisenmetalle, Batterien, farblich sortiertes Glas und eine mineralische Fraktion aufgetrennt werden. Weißglas, Braunglas und Grünglas erfüllen dabei die Spezifikationen der Glashütten für eine direkte Verwertung. Optional kann auch noch eine Mischkunststofffraktion ausgeschleust werden. Die Leichtfraktion und das Trockenstabilat stellen einen schadstoffreduzierten Ersatzbrennstoff dar, der lagerstabil ist und zur Energieerzeugung, in Zementwerken oder auch zur Methanolherstellung eingesetzt werden kann. Dadurch wird eine nahezu vollständige Verwertung der Abfälle aus Haushalten möglich [ta-akademie 2002].



**Abbildung 28: Aufbereitung von MVA-Schlacke für die Metallrückgewinnung. Ein Brecher zerkleinert die vorsortierte Schlacke auf wenige Millimeter [Jordi 2005].**

Selbst in der Schlacke von Müllverbrennungsanlagen sind oftmals noch wertvolle Rohstoffe vorhanden, die durch eine Aufbereitung zurückgewonnen werden können. So konnte 2003 in einem Pilotprojekt in der Schweiz gezeigt werden, dass sich durch eine entsprechende Aufbereitung aller Schlacken aus Schweizer MVAs immerhin etwa 56.000 Tonnen Metalle recyceln ließen. Davon würde allein die mögliche Ausbeute an Nichteisenmetallen – wie Aluminium, Kupfer und Zink – rund 20.000 Tonnen ausmachen, was deutlich über dem Sammelergebnis sämtlicher separat erfasster Kleinmetalle aus Haushalten in der Schweiz liegt. Eine Studie hatte gezeigt, dass die Schlacke 10 % Eisen, 2 % Aluminium und 1 % Kupfer enthält. Bei der Aufbereitung wird das angelieferte Material zuerst grob gesiebt und von größeren Schrottteilen befreit. Dann zerkleinert ein Brecher die Schlacke auf wenige Millimeter, wobei die lediglich verformten Metallstücke in den verschiedenen Sieben zurück bleiben (siehe Abbildung 28). Anschließend sortieren drei Magnetabscheider und eine Wirbelstromabtrennung für Nichteisenmetalle die Wertstoffe aus. Damit können ungefähr 10 % der angelieferten Schlackenmenge in Form verschiedener Metallfraktionen

Schlacke von  
Müllverbrennungs-  
anlagen als  
Rohstoffquelle

<sup>13</sup> Verfahren, um der Restabfallmenge Wasser zu entziehen. Dadurch wird die weitere Aufbereitung erleichtert.

abgetrennt und wieder in den Produktionskreislauf zurückgeführt werden [Jordi 2005].

### 2.3.4 Grenzen des Recyclings

Recycling und der Ersatz des Primärrohstoffs durch sekundäre Rohstoffquellen sind ein entscheidender Faktor für die künftige Entwicklung des globalen Rohstoffverbrauchs. Während in einzelnen Produktbereichen (z. B. Blei aus Batterien) schon weitgehend geschlossene Stoffkreisläufe mit Recyclingquoten von über 90 % bestehen, gibt es andere Stoffe, die bisher kaum recycelt werden und bei denen auch nur ein geringes Potenzial gesehen wird (z. B. Magnesit, Flussspat, Vanadium [Fronde 2005]). So stellt zum Beispiel Vanadium als Stahlveredler meist nur einen geringen Anteil einer Stahlliegierung dar und geht bei der Wiedereinschmelzung in die Schlacke über. Darüber hinaus steigt für alle Rohstoffe ab einer spezifischen Recyclingquote der Energieaufwand für die Sammlung und Reinigung überproportional an, so dass sich das Recycling nicht mehr lohnt. Höhere Quoten sind dann nur durch effizientere Recyclingprozesse oder höhere Rohstoffpreise zu erreichen.

Einige Rohstoffe nur schwer recyclebar

Höhere Recyclingquoten sind nicht zwangsläufig umweltfreundlicher

Aber auch eine hohe Recyclingquote muss nicht zwangsläufig eine Entlastung der Umwelt bedeuten. So sehen die Automobilhersteller die durch die EU beschlossene Erhöhung der stofflichen Recyclingquote von Altautos von 80 % auf 85 % ab 2015 als problematisch an, da für viele Kunststoffteile, die für den Leichtbau verwendet werden, noch kein Markt für die Wiederverwertung existiert. Wären die Hersteller durch die neue Quote gezwungen, mehr Metallteile zu verwenden, würde das Fahrzeuggewicht steigen und damit auch der Energieverbrauch der Fahrzeuge während der Nutzung [ACEA 2007]. Da die Energieaufwendungen in der Nutzungsphase ca. 85 % des gesamten Energieverbrauchs eines PKWs von der Herstellung bis zur Entsorgung betragen, hätte dies zusätzliche Umweltbelastungen zur Folge [Gensch 2004].



Abbildung 29: Recycelbare Kunststoffteile eines BMWs (Quelle: BMW AG).

Darüber hinaus gibt es Probleme beim Recycling der Plastikbestandteile von Autos. Eine Umfrage unter 300 Kunststoffrecyclingunternehmen in Europa und den Vereinigten Staaten hat ergeben, dass die derzeitigen Technologien nicht ausreichen, um alle Plastikbestandteile eines Autos zu recyceln [Science for Environment Policy 2007]. Die Autoren der Studie „State of the art of plastic sorting and recycling: Feedback to vehicle design“ schlagen daher vor, Recyclinganforderungen bereits beim Design der Autos zu berücksichtigen, um Recyclingquoten zu erhöhen [Froelich 2007].

Viele Plastikteile von Autos noch nicht recyclebar

Ein wichtiger Aspekt des Recyclings ist der ökonomische Lebenszyklus von Produkten. Sind die Absatz- und somit Produktionszahlen eines Produkts rückläufig, so fallen im Laufe der Zeit mehr Teile dieses Produkts für Wiederverwertung und Recycling an, als für neue Produkte des gleichen Typs benötigt werden. So lange das recycelte Material in anderen Produkten eingesetzt werden kann, ist das nicht so problematisch. Schwieriger wird es, wenn in den Produkten giftige oder gefährliche Materialien zum Einsatz gekommen sind. Das gilt vor allem für eine Reihe von Schwermetallen wie Blei, Quecksilber und Chrom. So spielte zum Beispiel Blei über Jahrzehnte hinweg eine wichtige Rolle in vielen Anwendungen. Mittlerweile wurde es aber aufgrund seiner toxischen Wirkung aus vielen Produkten wie Benzin, Farbe und Sanitärinstallationen verbannt.

Problematische Inhaltsstoffe - Recycling oder Entsorgung?

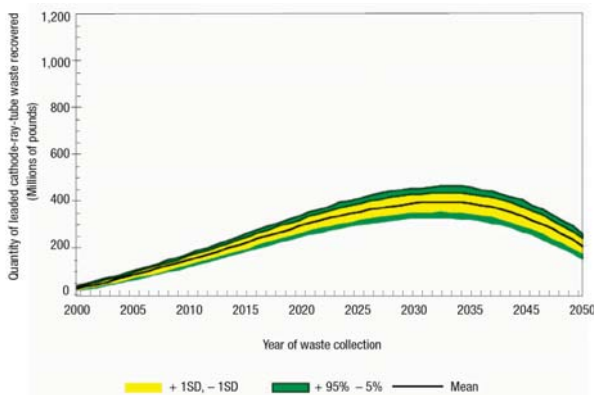


Abbildung 30: Erwartete Menge des Bleimülls durch die Entsorgung von Bildröhren in den USA [Linton 2004].

In anderen Produkten wie Bildröhren sorgt der technische Fortschritt dafür, dass kein Blei mehr benötigt wird. Durch entsprechende Vorschriften bei der Entsorgung von Bildröhren bei gleichzeitig rückläufigem Markt für Bleianwendungen wird daher in den USA in den nächsten Jahren mit einem starken Anstieg des Bleiaufkommens durch entsorgte Bildröhren gerechnet (siehe Abbildung 30). Eine echte Lösung für dieses Problem ist noch nicht in Sicht. Entweder werden neue Anwendungen für recycelte toxische Materialien gefunden oder sie

Überangebot recycelter toxischer Stoffe

müssen so behandelt werden, dass sie nicht mehr in toxischer Form vorliegen [Linton 2004].

Fazit: Die Verteuerung der Rohstoffe in den letzten Jahren hat auch der Recyclingbranche neue Perspektiven eröffnet. So stieg der Preis für Stahlschrott aufgrund der starken Nachfrage aus China seit Mitte 2003 bis Mitte 2007 um annähernd 250 %. Der Einsatz von Sekundärrohstoffen und Recycling ist nicht nur durch die Materialeinsparungen attraktiv, sondern auch durch die mit dem Recycling verbundenen Energieeinsparungen. Zentraler Ansatzpunkt für die weitere Erhöhung von Recyclingquoten ist das Produktdesign. Neue Verfahren beim Druck von Zeitschriften können genauso Probleme bereiten, wie gesetzlich vorgegebene Recyclingquoten. Eine möglichst hohe Recyclingquote ist nicht immer die beste Lösung für die Umwelt. Es gilt stets die Gesamtbilanz aus Rohstoffbereitstellung, Produktion, Nutzung und Entsorgung zu betrachten, um Umweltauswirkungen zu minimieren.

## 2.4 Substitution knapper Rohstoffe

### 2.4.1 Potenziale

Eine Möglichkeit, auf die Knappheit bzw. steigende Preise von Rohstoffen zu reagieren, ist die Substitution eines Rohstoffs durch einen anderen Rohstoff, durch einen neuen Werkstoff mit vergleichbaren Eigenschaften oder durch eine komplett neue Anwendung, die den Rohstoff überflüssig macht.

Substitution von Rohstoffen

Substitution sollte aber nicht nur dazu dienen kurzfristige Schwankungen der Rohstoffpreise und -verfügbarkeit abzufedern, sondern vor allem langfristig zur Flexibilisierung des Materialeinsatzes in den Verarbeitungsstufen der Wertschöpfungskette beitragen sowie die Nachhaltigkeit durch Einsatz ökonomisch und ökologisch vorteilhafter Materialien zu fördern [Bundesregierung 2007].

Die Potenziale einer Substitution können je nach Anwendung beträchtlich sein. Im Fokus des öffentlichen Interesses steht derzeit ganz klar die Substitution fossiler Rohstoffe durch erneuerbare Rohstoffe (siehe Kapitel 2.4.3). Ursachen hierfür sind der stetig steigende Ölpreis in Verbindung mit der unsicheren Versorgungslage (siehe Kapitel 1.2.2) und die Reduktionsziele für Treibhausgase zur Minderung des Klimawandels. Auch wenn der Preis für ein Metall zu stark ansteigt und mit günstigeren Materialien oder Prozessen vergleichbare Ergebnisse erzielt werden können, kommt es in der Regel zu Substitution (siehe Kapitel 2.4.2). In der Literatur wird auch von Substitution gesprochen, wenn im Rahmen des Recyclings ein Primärrohstoff durch einen Sekundärrohstoff ersetzt wird (siehe Kapitel 2.3).

### 2.4.2 Metall- und Nichtmetallrohstoffe

Verschiedene Ursachen, die zur Substitution eines Rohstoffs führen können, veranschaulicht das Beispiel Kupfer. Lag der Metallkupferpreis im Februar 2007 noch bei ca. 450 Euro / 100 kg, so stieg der Preis bis Oktober 2007 auf ca. 650 Euro / 100 kg, ein Anstieg um mehr als 40 % [thecopperlink 2007]. Es ist also für viele Anwendungen durchaus reizvoll, Kupfer durch Materialien oder Prozesse zu ersetzen, die nicht so starken Preisschwankungen unterworfen sind. So kann Kupfer im Strombereich durch Aluminium oder im Telekommunikationsbereich durch Glasfaser, Nutzung des Stromnetzes oder Funk substituiert werden.

Beispiel:  
Substitution von Kupfer



**Abbildung 31: Substitution durch technische Entwicklung: Um gleiche Bandbreiten zu erzielen, muss ein Kupferkabel ca. 100-mal dicker als eine einzelne Glasfaser sein (Quelle: FOS FiberOptics Stockreiter).**

Aluminium statt  
Kupfer für die  
Stromleitung

Bei der Stromleitung kann Kupfer direkt durch Aluminium ersetzt werden. Zwar hat Aluminium eine geringere Leitfähigkeit und erfordert daher größere Kabeldicken als Kupfer, ist aber deutlich leichter und dadurch vielfältiger einsetzbar. Der Aluminiumpreis lag im Oktober 2007 bei ca. 170 Euro / 100 kg, also bei fast einem Viertel des Preises von Kupfer [LME 2007]. Bestimmend für die Substitution in spezifischen Anwendungsfeldern ist jedoch das Volumenverhältnis von Kupfer und Aluminium. Da Aluminium ein um den Faktor 3,3 geringeres Materialgewicht besitzt, erzielt es in strukturellen Anwendungen wesentliche Vorteile. Außerdem wurde durch technologische Entwicklungen das Isoliermaterial zunehmend günstiger, so dass das vergleichbar dickere isolierte Aluminiumkabel zunehmend rentabel wurde [Erdmann 2004]. So sind seit dem starken Anstieg des Kupferpreises im Jahr 2007 rund 2 % des Kupferbedarfs an alternative Werkstoffe verloren gegangen. In einem Worst-Case-Szenario sehen Analysten einen Verlust von 5 % bis 10 % bis zum Ende der Dekade. Befürchtet werde vor allem ein Wechsel von Kupfer hin zu Aluminium [Alu-web.de 2007].

Rohstoff	Substitutionsmöglichkeiten
Aluminium	Kupfer, Magnesium, Titan, Verbundwerkstoffe, Glas, Papier, Stahl (Verpackungen)
Blei	Plastik, Aluminium, Eisen, Zinn
Chrom	alternative Oberflächenbeschichtungen (z. B. Titan/ Zirkonium)
Eisen	Aluminium, Plastik, Verbundwerkstoffe
Kobalt	z. Zt. nicht möglich
Kupfer	Aluminium, Titan, Stahl, Glasfaser, Plastik
Magnesium	Zink, Aluminium, Kalziumkarbid
Molybdän	z. Zt. nicht möglich
Nickel (EU-15)	Aluminium, beschichtete Stähle, Plastik, Titanlegierungen
Tantal (USA)	Niob, Aluminium, Keramik, Platin, Titan, Zirkonium
Zink	Aluminium, Plastik, Stahl, Magnesium

**Tabelle 10: Substitutionspotenzial ausgewählter Rohstoffe. Verändert nach [BGR 2005b].**



Die Substitution von Kupfer durch Glasfaser bei Kabeln der Informationsübertragung wird vor allem von der technischen Entwicklung getrieben. Die Forderung nach immer höheren Übertragungsraten macht den Übergang von Kupfer auf Glasfaser erforderlich, da Kupferkabel bei gleicher Bandbreite ca. 100-mal dicker sind als Glasfaserkabel (siehe Abbildung 31). Andere technische Möglichkeiten zur Substitution bietet die drahtlose Datenübertragung, bei der die Kabel durch elektromagnetische Wellen substituiert werden.

Glasfasern oder  
Funk statt Kupfer  
zur  
Datenübertragung

Tabelle 10 zeigt das Substitutionspotenzial ausgewählter Rohstoffe [BGR 2005b]. Es wird deutlich, dass viele Rohstoffe substituiert werden können.

Ein gutes Beispiel für die Substitution eines gesundheitsgefährdenden Materials ist der vollständige Ersatz von Chrom(VI)-Verbindungen, die traditionell im Korrosionsschutz von verzinkten Metallen im Automobilbereich und in der Elektroindustrie eingesetzt wurden. Seit dem Jahr 2006 herrscht ein Chrom(VI)-Verbot für die Elektroindustrie und seit 2007 auch ein entsprechendes Verbot für die Automobilindustrie. Eine Alternative zu der Verwendung dieses krebserzeugenden Stoffes ist die Dickschichtpassivierung mit Chrom(III)-Verbindungen, bei denen Siliziumdioxid-Nanopartikeln in die Oberflächenschicht eingelagert werden [Reinhold 2007].

Substitution von  
giftigen Chrom-IV-  
Verbindungen

Durch Nanotechnologien lassen sich noch weitere Rohstoffe substituieren, wie das Beispiel elektronisches Papier zeigt. Würden Zeitungen, die heute noch auf Papier gedruckt werden, auf einfach zu aktualisierendem elektronischen Papier verlegt, würden enorme Mengen des Rohstoffes Papier eingespart. Die technische Basis für elektronisches Papier bilden funktionale nanoskalige Polymere, die wie Silizium als Leiter, Halbleiter oder Isolator dienen können.

Elektronisches  
Papier

### 2.4.3 Biomasse

Verknappung, steigende Preise für fossile Rohstoffe (siehe Abbildung 32) und die Herausforderungen des Klimaschutzes haben in den vergangenen Jahren zu einem regelrechten Boom bei der Substitution fossiler Rohstoffe durch nachwachsende Rohstoffe geführt. Im Fokus der Anstrengungen stehen Anwendungen für die Wärme-, Kraftstoff- und Stromerzeugung, aber auch die stoffliche und technische Weiterverarbeitung in der Industrie. Nachwachsende Rohstoffe sind dabei nicht nur auf pflanzliche Biomasse beschränkt. Es können alle organischen Ressourcen genutzt werden, also auch tierische Fette, Schlachtrückstände und Tierkadaver.

Substitution fossiler  
Rohstoffe boomt



**Abbildung 32: Energiepreisentwicklung in Deutschland von 2002–2007. Aufgrund von Versorgungsengpässen kam es im 2. Halbjahr 2006 zu einem massiven Anstieg der Pelletpreise [DEPV 2007].**

Beispiele für die stoffliche Verwertung von Biomasse reichen von der klassischen Verwendung von Holz im Bausektor oder auch Möbeln und Papier bis zu den neueren Feldern wie faserverstärkten Kunststoffen (siehe Kapitel 2.2.7) und der weißen Biotechnologie (siehe Kapitel 2.2.3).

Holz als Brennstoff

Im Bereich der energetischen Verwertung erfährt sowohl die Verwendung von Holz als Brennstoff als auch die Umwandlung von Biomasse in flüssige Biokraftstoffe einen regelrechten Nachfrageboom, der ähnliche Effekte zur Folge hat wie die hohe Nachfrage im restlichen Rohstoffsektor. So kam es aufgrund von Versorgungsengpässen im 2. Halbjahr 2006 zu einem massiven Anstieg der Holzpelletpreise in Deutschland (siehe Abbildung 32). Erst eine Ausweitung des Angebots sorgte ab Januar 2007 wieder für eine Beruhigung des Pelletmarktes und einen deutlichen Rückgang der Preise [DEPV 2007].

Ausweitung der Anbauflächen

Die Auswirkung der staatlich geförderten Nachfrage nach Biomasse für flüssige Biokraftstoffe zeigt sich eindrucksvoll am Beispiel des Biodiesels. Die Politik hat seit der Einführung der Ökosteuern in Deutschland im Jahr 2000 sowohl auf nationaler wie auch auf EU-Ebene zahlreiche Gesetze und Verordnungen erlassen, um die Produktion und die Nachfrage von Biodiesel anzuregen. Biodiesel wird aus Raps hergestellt. Abbildung 33 zeigt die starke Ausweitung der Anbaufläche in den letzten 10 Jahren [Pöl-Tec 2007].

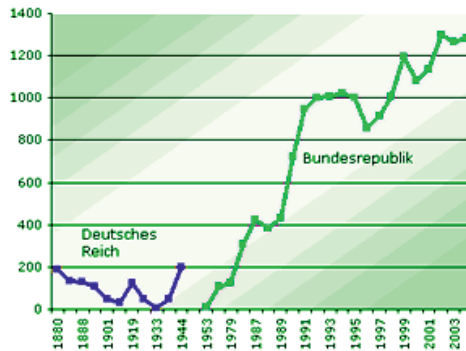


Abbildung 33: Raps-Anbauflächen in Deutschland seit 1880 (in 1000 ha) [Pöl-Tec 2007]

Durch den Rapsanbau für Biodiesel wurden im Jahr 2005 bereits 1 Millionen ha Anbaufläche in Deutschland gebunden. Davon werden rund 400.000 ha für die Produktion von Rapsöl für die Nahrungsmittelindustrie und etwa 100.000 ha für die Bereiche Oleochemie<sup>14</sup> und Schmierstoffe benötigt. Die Anbaufläche von Raps hat sich mit 1,4 Millionen ha (geschätzt für die Ernte 2006) innerhalb von 15 Jahren praktisch verdoppelt.

Rapsanbau für Biodiesel

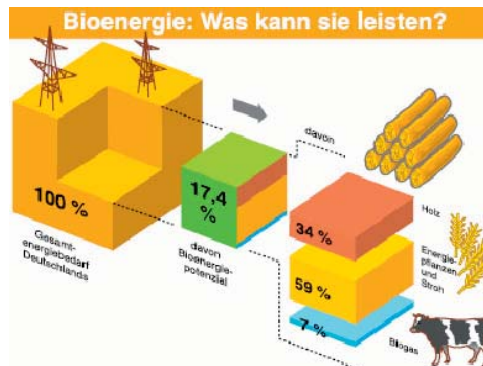


Abbildung 34: Biomasse liefert heute nicht einmal 2 % des deutschen Bedarfs an Strom, Wärme und Kraftstoffen – im Jahr 2030 könnten es über 17 % sein. Nicht nur Biogas, Waldrestholz, Schwachholz, Reste aus der Holzverarbeitung und die großen Mengen des bislang ungenutzten Holzzuwachses bieten Potenziale. Auch Energiepflanzen und Stroh haben für die Energieversorgung der Zukunft erhebliche Bedeutung [FNR 2006].

Das gesamte Anbauflächenpotenzial wird auf 1,6 bis maximal 1,8 Millionen ha geschätzt [Bockey 2006]. Würden davon 1,5 Millionen ha für die Erzeugung von Biodiesel genutzt, könnten damit mehr als 2 Millionen Tonnen Biodiesel erzeugt werden. Da der gesamte Dieselverbrauch in Deutschland ca. 30 Millionen Tonnen beträgt, könnte

Anbaufläche in Deutschland könnte nur einen Bruchteil des Kraftstoffbedarfs decken

<sup>14</sup> Unter der Oleochemie versteht man die Chemie von Fetten und Ölen.

also auch unter Ausnutzung des derzeitigen Anbaupotenzials in Deutschland nur ein Bruchteil des Bedarfs durch Biodiesel gedeckt werden.

In Verbindung mit dem theoretischen Bioethanolpotenzial in Deutschland von 6,3 Millionen Tonnen pro Jahr ergibt sich für den im Jahr 2010 in Deutschland erwarteten Verbrauch ein Substitutionspotenzial von rund 30 % [Bockey 2006]. Die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe hat für Deutschland im Jahr 2030 basierend auf heimischer Biomasse ein Bioenergiepotenzial von 17,4 % errechnet (siehe Abbildung 34) [FNR 2006].

Biokraftstoffe für  
Flugbenzin

Diese Zahlen würden sich allerdings nochmals deutlich ändern, wenn Biokraftstoffe in großem Maßstab im Flugverkehr zum Einsatz kämen. Erste Tests mit Passagiermaschinen, deren Flugbenzin Beimengungen von Biokraftstoffen enthält, sind bereits für 2008 geplant. Ein Komplettumstieg der Luftfahrtindustrie auf Biokraftstoffe würde nach Berechnungen von Experten eine Rapsanbaufläche von der Größe Europas benötigen. Bis Biokraftstoffe jedoch flächendeckend im Flugverkehr eingesetzt werden können, werden wohl noch einige Jahre vergehen. Die Herstellung von Flugbenzin aus 100 % Biomasse gilt derzeit noch als technisch zu aufwändig [Umweltdialog 2007].

Mikroalgen zur  
Erzeugung von  
Biodiesel

Einen alternativen Weg zur Erzeugung von Biodiesel und -ethanol bieten Mikroalgen. Algen-Reaktoren können auf der gleichen Grundfläche 100-mal mehr Biodiesel erzeugen, als der Anbau von Energiepflanzen wie Mais und Raps erbringt. Beim US-Unternehmen Vertigro werden dazu Algen in hintereinander angeordneten Kunststoffpanelen (siehe Abbildung 35 links) mit in Wasser gelösten Nährstoffen und Vitaminen sowie CO<sub>2</sub> versorgt und können im Idealfall alle 24 Stunden ihr Gewicht versechsfachen. Sobald die Algen einen bestimmten Wachstumspunkt erreicht haben, wird die Nahrungszufuhr radikal heruntergeschraubt. Die Algen reagieren darauf, indem sie 70 % ihres Gewichts in Öl umwandeln, das sich zu 100 % kontinuierlich ernten und zu Biodiesel verarbeiten lässt. Übrig bleibt eine an Proteinen und Kohlenhydraten reiche Biomasse, die als Dünger und Tierfutter verkauft werden kann [Wiwo 2007].

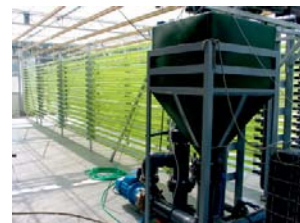


Abbildung 35: Links: Kunststoffpanele mit Mikroalgen, Algenzucht bei Vertigro [Global Green Solutions 2007]. Rechts: „Greenhouse Gas Mitigation Project“ an der Jacobs Universität Bremen [IRCCM 2007].

Ein deutsches Konsortium aus Hochschule Bremen, Jakobs-Universität, Novagreen und Alfred-Wegener-Institut verfolgt einen ähnlichen Ansatz. Dort setzt man neben der Erzeugung von Biodiesel vor allem auch einen Schwerpunkt bei der Bekämpfung von Treibhausgasen. Ziel des Greenhouse Gas Mitigation Project (GGMP) ist es, CO<sub>2</sub>-Abgase aus benachbarten Kraftwerken durch sonnenbeschienene transparente Systeme (Bioreaktoren) mit Mikroalgen zu leiten. Während die Rauchgase in feinen Bläschen durch die Algensuppe perlen, lösen sich CO<sub>2</sub> und Stickoxide im Wasser. Dort wirken sie wie ein Dünger und werden von den Algen verbraucht. Durch Fotosynthese und Wachstum verwandeln die Mikroorganismen die Schadstoffe in Sauerstoff und noch mehr Algen. Diese werden abgeschöpft und zu Treibstoffen verarbeitet, ihr Fettanteil vornehmlich zu Diesel, die Kohlenhydrate zu Ethanol. 30.000 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr könnte ein Quadratkilometer Algenfarm bei diesem System einfangen. Der Verkauf von Treibstoff und Emissionsrechten soll ausreichen, um die Anlage wirtschaftlich zu betreiben. Damit sich eine Algenzucht rechnet, sind sonnenreiche Standorte Voraussetzung. Da Algen auch in Salzwasser gedeihen, könnten auch aride Gebiete am Meer genutzt werden [Rührmair 2007].

Pilotprojekt in  
Bremen: Algen als  
CO<sub>2</sub>-Senken

Neben der energetischen findet auch die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe besonders im chemisch-technischen und im pharmazeutischen Bereich breite Anwendung. Beispiele sind die Herstellung von Tensiden, Schmierstoffen und Hydraulikflüssigkeiten, bei der Papierherstellung, im Baubereich, in Verbundwerkstoffen sowie bei der Herstellung von Holzprodukten und Holzwerkstoffen. Im chemisch-technischen Bereich werden in Deutschland jährlich bereits rund 2,7 Millionen Tonnen nachwachsende Rohstoffe stofflich genutzt, von denen rund 2 Millionen Tonnen direkt in der chemischen Industrie eingesetzt werden. Der Anteil von Rohstoffen aus deutschem Anbau beträgt dabei 30–40 %.

Stoffliche Nutzung  
nachwachsender  
Rohstoffe

Insgesamt wird deutlich, dass nur ein Bruchteil des deutschen Rohstoffbedarfs durch heimische Biomasse gedeckt werden kann. Zum Teil steht nicht genug Anbaufläche zur Verfügung oder aber der Anbau in Deutschland ist aus klimatischen Gründen nicht möglich oder schlicht zu teuer ist. Das heißt, in Zukunft wird der Bedarf an Biomasse zunehmend über Importe sichergestellt werden müssen. Das weltweit nachhaltig nutzbare Biomassepotenzial wird auf etwa 25 % des heutigen globalen Primärenergieverbrauchs geschätzt.

Heimische Biomasse  
deckt nur einen  
Bruchteil des  
Rohstoffbedarfs ab

Mit der Ausweitung der Biomasseproduktion im internationalen Rahmen gehen zusätzlich erhebliche Gefahren eines Raubbaus an den Naturgütern der Erzeugerländer einher, dem durch verbindliche Standards entgegengewirkt werden muss [SRU 2007].

Für die globale Flächennutzung ergeben sich dadurch zahlreiche Konfliktfelder (siehe Tabelle 11).

<b>energetische Nutzung</b>
<b>stoffliche Nutzung</b>
<b>Nutzung für Ernährung und Futter</b>
<b>Nutzung für andere Belange: Naturschutz, Bebauung, Fotovoltaik etc.</b>

**Tabelle 11: Konfliktfelder der globalen Flächennutzung beim Anbau von Biomasse.**

Kaskaden- und  
Koppelnutzung von  
Biomasse

Für die effizientere Nutzung von Biomasse werden Konzepte wie die Kaskaden- und Koppelnutzung verfolgt. Bei der Kaskadennutzung wird die Biomasse für mehrere aufeinanderfolgende Verwendungszwecke mit abnehmender Wertschöpfung eingesetzt. Einfachstes Beispiel ist die stoffliche Verwertung, der nach Ablauf der Nutzungsdauer die energetische Verwertung folgt. Bei der Koppelnutzung werden unterschiedliche Komponenten der Biomasse parallel für verschiedene Anwendungen genutzt. Es wird, versucht, sämtliche Nebenprodukt der Verarbeitung zu nutzen. Dieses Konzept ist derzeit unter dem Stichwort Bioraffinerie Gegenstand intensiver Forschungsbemühungen.

Umweltverträgliche  
Biomasse durch  
Biodiversität

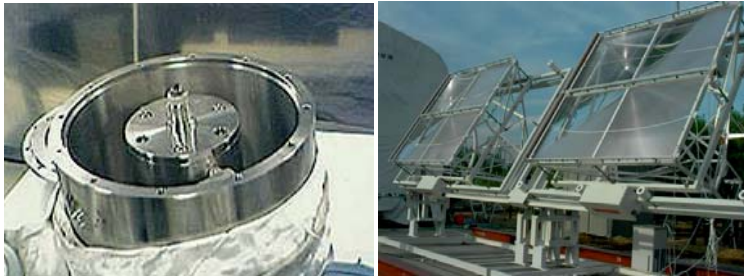
Einen interessanten Ansatz, die Umweltauswirkungen des Biomasseanbaus zu verringern und gleichzeitig hohe Erträge zu erwirtschaften, bietet der Anbau von „Low-Input High Diversity (LIHD) Grassland Biomass“ auf landwirtschaftlichen Brachflächen. Durch eine Untersuchung, die sich über 10 Jahre von 1994–2004 erstreckt hat, konnte festgestellt werden, dass mit der Aussaat von bis zu 16 verschiedenen Grassorten auf landwirtschaftlicher Brachfläche nach 10 Jahren bis zu 238 % mehr Bioenergie gewonnen werden kann, als mit Monokulturen. Darüber hinaus führt LIHD-Bioenergie zu einer effektiven CO<sub>2</sub>-Minderung, da beim Anbau 4,4 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Hektar und Jahr sequestriert, aber bei der Erzeugung des Biokraftstoffs nur 0,32 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Hektar und Jahr freigesetzt werden. Würden weltweit 5·10<sup>8</sup> ha landwirtschaftlicher Brachfläche für den LIHD-Anbau genutzt, könnten 13 % des globalen Kraftstoffbedarfs und 19 % des globalen Strombedarfs gedeckt werden. Gleichzeitig würde der CO<sub>2</sub>-Ausstoß um 15 % reduziert [Tilman 2006].

Die unterschiedlichen Verwendungszwecke, das beschränkte Angebot und die Umweltauswirkungen von Biomasse erfordern einen strategischen Ansatz, um eine nachhaltige Nutzung sicherzustellen. Denn Biomasse ist als nachwachsender Rohstoff erneuerbar und in diesem Sinne unerschöpflich, die jährlichen Fördermengen sind jedoch beschränkt.

#### 2.4.4 Magnesium als Energieträger für erneuerbare Energien

Einen neuen Weg zur Ersetzung fossiler Treibstoffe durch erneuerbare Energie geht eine japanische Arbeitsgruppe am Tokio Institute of Technology. Ihnen ist es gelungen, einen Energiekreislauf zu demonstrieren, der auf der energetischen Nutzung der Reaktion von Magnesium mit Wasser basiert. Ergebnis dieser Reaktion ist Magnesiumoxid, heißer Wasserdampf und Wasserstoff, der in einem weiteren Schritt energetisch genutzt werden kann. Das Magnesiumoxid wird anschließend durch intensive Laserbestrahlung wieder in Magnesium und Sauerstoff dissoziiert. Die Laser sollen dabei entweder direkt mit Sonnenenergie (siehe Abbildung 36 rechts) oder durch andere erneuerbare Energien betrieben werden. Da Magnesium das achthäufigste Element auf der Erde ist und zu etwa 1,4 % am Aufbau der Erdkruste beteiligt ist, stünde für diesen Kreislauf genug Magnesium als Energieträger zur Verfügung [Narayan 2007].

Magnesium als  
Energieträger



**Abbildung 36:** Links: Magnesium Injektions-Motor [Mitsubishi 2006]. Rechts: Fresnel-Linsen zur Erzeugung von Laserstrahlen aus Sonnenlicht [Narayan 2007].

Ein so genannter MAGIC<sup>15</sup>-Motor wurde bereits 2006 vom japanischen Fahrzeughersteller Mitsubishi hergestellt (siehe Abbildung 36 links). Nach Angaben des Unternehmens könnte dieser Motor in Zukunft in Kraftwerken, Fabriken, Schiffen und sogar Automobilen eingesetzt werden [Mitsubishi 2006]. Der Magnesiumenergiekreislauf soll im Juli 2008 auf dem G8-Gipfel in Toyako, Japan, als Lösung für einen sauberen Energiekreislauf vorgestellt werden [Levenstein 2007].

Vorstellung eines  
„Magnesium-Motors“

<sup>15</sup> MAGnesium Injection Cycle

Fazit: Eine Möglichkeit, auf die Knappheit bzw. steigenden Preise von Rohstoffen zu reagieren, ist die Substitution eines Rohstoffs durch einen anderen Rohstoff, durch einen neuen Werkstoff mit vergleichbaren Eigenschaften oder durch eine komplett neue Anwendung, die den Rohstoff überflüssig macht. Die Substitution sollte aber nicht nur dazu dienen, kurzfristige Schwankungen der Rohstoffpreise und -verfügbarkeit abzufedern, sondern vor allem langfristig zur Flexibilisierung des Materialeinsatzes in den Verarbeitungsstufen der Wertschöpfungskette beitragen sowie die Nachhaltigkeit durch den Einsatz ökonomisch und ökologisch vorteilhafter Materialien fördern. Dies gilt auch für die Substitution fossiler Energieträger durch Biomasse. Die unterschiedlichen Verwendungszwecke, das beschränkte Angebot und die Umweltauswirkungen der Nutzung von Biomasse erfordern einen strategischen Ansatz, um eine nachhaltige Nutzung sicherzustellen. Denn Biomasse ist als nachwachsender Rohstoff erneuerbar und in diesem Sinne unerschöpflich, die jährlichen Fördermengen sind jedoch beschränkt.



### 3 INITIATIVEN AUS POLITIK UND WIRTSCHAFT

#### 3.1 Initiativen der Bundesregierung

Im März 2007 verkündete die Bundeskanzlerin Angela Merkel auf dem 2. Rohstoffkongress des BDI **Elemente einer nationalen Rohstoffstrategie**. Zu den Grundprinzipien einer Rohstoffstrategie der Bundesregierung zählen demnach u. a.:

Nationale  
Rohstoffstrategie

- die weitere Verfolgung eines liberalisierten Weltmarkts auch im Bereich der Rohstoffversorgung,
- die Vernetzung verschiedener für die Rohstoffpolitik relevanter Politikbereiche,
- der Abbau von Handelshemmnissen,
- die Förderung rohstoffpolitischer Ansätze in der Entwicklungspolitik,
- die Erhöhung der Transparenz im Rohstoffbereich (z. B. Finanzmanagement),
- die Verbesserung des Garantieinstrumentariums mit Blick auf Diversifizierung der Bezugsquellen,
- die Förderung der Rückwärtsintegration der deutschen rohstoffverarbeitenden Industrie (Aufbau von Beziehungen zu Zulieferern zur Sicherung der Rohstofflieferung),
- Verbesserung des Zugangs zu internationalen Rohstoffdaten,
- Erhöhung der Materialeffizienz und der Substitutionsmöglichkeiten,
- Förderung des Einsatzes nachwachsender Rohstoffe,
- Erhöhung der Recyclinganteile,
- bessere Nutzung heimischer Rohstoffpotenziale,
- Stärkung der nachhaltigen Rohstoffwirtschaft.

Darüber hinaus hat die Bundesregierung in ihrer **Nachhaltigkeitsstrategie** formuliert, dass die Indikatoren Energie- und Rohstoffproduktivität bis 2020 gegenüber 1990 bzw. 1994 verdoppelt werden sollen [Bundesregierung 2002]. Diese Indikatoren sind allerdings in der Kritik, da sie die Verlagerung von Wertschöpfung ins Ausland und die daraus resultierenden Umweltauswirkungen bisher nicht ausreichend berücksichtigen (siehe auch Kapitel 1.1.3).

Nachhaltigkeits-  
strategie der  
Bundesregierung

Im März 2007 wurde ein offenes **Netzwerk Ressourceneffizienz** ins Leben gerufen, in dem Vertreter von Wirtschaft, Wissenschaft und Politik zusammenarbeiten sollen. Leitziel des Netzwerks ist es, Deutschland bis zum Jahr 2020 zur ressourceneffizientesten Volkswirtschaft der Welt und damit zum Vorreiter beim schonenden und

Netzwerk  
Ressourceneffizienz

Deutsche  
Materialeffizienz-  
agentur - demea

umweltverträglichen Umgang mit Energie und Rohstoffen zu machen [BMU 2007].

Auf Initiative des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) ist 2005 die **Deutsche Materialeffizienzagentur - demea** - entstanden. Sie ist beauftragt:

- Das öffentliche Bewusstsein über das Potential der Materialeffizienz zu schärfen und Informationen darüber zur Verfügung zu stellen.
- Unternehmen zu motivieren, Materialeffizienzpotenziale zu erschließen und bei der Teilnahme an dem Förderprogramm VerMat zu unterstützen.
- Den Aufbau von Unternehmensnetzwerken zur rentablen Steigerung von Materialeffizienz zu fördern (NeMat).

Im Rahmen dieser Initiative wird der **Deutsche Materialeffizienzpreis** vergeben. Mit dem Preis werden beispielhafte Lösungen von kleinen und mittleren Unternehmen zur Steigerung der Materialeffizienz im eigenen Unternehmen oder bei ihren Kunden ausgezeichnet. Die besten fünf Konzepte werden jeweils mit 10.000 Euro prämiert [Demea 2007].

Auch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat im Bereich Ressourcen und Rohstoffe mehrere Forschungsförderprogramme auf den Weg gebracht:

Förderung  
rohstoffintensiver  
Branchen und  
Produktionszweige

Mit der Förderrichtlinie **„Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Rohstoffintensive Produktionsprozesse“** legt das BMBF einen Schwerpunkt auf rohstoffintensive Branchen und Produktionszweige. Hinsichtlich Effizienzsteigerung kann in diesen Wirtschaftsbereichen eine große Hebelwirkung erreicht werden. Deshalb zielt die Fördermaßnahme auf rohstoffnahe Industrien mit hohem Primär Materialeinsatz, etwa die Verarbeitung von mineralischen Rohstoffen (u. a. Metalle) oder die Herstellung von chemischen Grundstoffen. Im Fokus stehen Produktionsbereiche wie die Herstellung bzw. Verarbeitung von Eisen, Stahl, Nichteisenmetallen, Glas, Papier und Keramik sowie die Chemie-, Baustoff und Textilindustrie. Sie stehen am Beginn von weit verzweigten Wertschöpfungsketten und hier erzielte Effekte wirken sich auf alle anschließenden Produktionsverfahren und Produkte aus. Die Fördermaßnahme unterstützt Wissenschaft und Wirtschaft, hierzu gemeinsam innovative Technologien und Verfahren zu entwickeln und zu erproben. Zukunftsweisend sind Lösungen, die den Rohstoffeinsatz nicht nur auf Betriebsebene, sondern entlang einer gesamten Prozesskette optimieren.

Förderprogramm  
WING

Das Förderprogramm **„Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft (WING)“** wurde in intensiver Zusammenarbeit mit Werkstoffherstellern und -anwendern, Vertretern aller Wissenschaftsorganisationen, der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde erarbeitet. Mit dem

Projekt WING verfolgt das BMBF das Ziel Innovationen von Technologien für nachhaltige Entwicklungen zu stärken. Der Projektschwerpunkt liegt dabei auf der Förderung von Werkstoffentwicklungen in den exportstarken Branchen Maschinenbau, Fahrzeugbau, chemische Industrie, Elektrotechnik / Elektronik und Information / Kommunikation [BMBF 2007].

### 3.2 Initiativen auf EU-Ebene

Wie oben beschrieben hat die Bundesregierung die Chancen für wirtschaftliche und umweltpolitische Entwicklungen im Bereich der nachwachsenden Rohstoffe erkannt. Vor allem Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben für die stoffliche Verwertung nachwachsender Rohstoffe werden vom Bund finanziell gefördert. Um die Forschung auf diesem Gebiet europaweit voranzutreiben, setzt sich die Bundesregierung gegenüber der EU Kommission verstärkt für Beihilfen von Demonstrationsvorhaben in diesem Bereich ein. Des Weiteren drängt die Bundesregierung auf die Entwicklung einer europäischen Strategie zur stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe, um den Einsatz dieser Ressourcen in der EU voranzutreiben [Bundesregierung 2005].

Entwicklung einer europäischen Strategie

Auf Grund der unterschiedlichen Forschungsergebnisse und -ansätze in den EU Mitgliedstaaten im Bereich der nachwachsenden Rohstoffe plant das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) die Initiierung einer Arbeitsgruppe, deren Koordinierungsergebnisse in Forschung und Entwicklung zu einem neuen ERA-NET für nachwachsende Rohstoffe führen könnte [SCARnet, 2005].

Neues ERA-NET für nachwachsende Rohstoffe geplant

Auch die Organe der Europäischen Union sind sich des Problems der Rohstoffknappheit bewusst. Im Juni 2001 verabschiedete der Europäische Rat von Göteborg eine Europäische Nachhaltigkeitsstrategie (SDS). Mit dieser sollte die im März 2000 verabschiedete Lissabon-Strategie für Wachstum und Beschäftigung um eine Umweltdimension ergänzt werden. In der SDS werden sechs Themenbereiche genannt, die nicht nachhaltige Trends wiedergeben, eines dieser Themenfelder ist das Ressourcenmanagement. Folgende Ziele werden in der Europäischen Nachhaltigkeitsstrategie für diesen Bereich genannt:

Europäische Nachhaltigkeitsstrategie

- eine bessere Bewirtschaftung der natürlichen Ressourcen und die Vermeidung ihrer Übernutzung
- Verbesserung der Ressourceneffizienz, um die Gesamtnutzung nicht erneuerbarer Ressourcen und der damit verbundenen Umweltauswirkungen der Rohstoffnutzung zu verringern; dabei sollten erneuerbare Ressourcen so genutzt werden, dass ihre Regenerationskapazität nicht überstiegen wird

- Erlangung und Aufrechterhaltung eines Wettbewerbsvorteils durch Verbesserung der Ressourceneffizienz und Förderung von Öko-Innovationen
- Abfallvermeidung und effizientere Nutzung natürlicher Ressourcen durch Anwendung des Lebenszykluskonzeptes und Förderung von Wiederverwendung und Recycling

Um diese Ziele zu erreichen, soll unter anderem die Europäische Umweltagentur den Mitgliedstaaten bei der Messung der Ressourceneffizienz unterstützend zur Seite stehen [Rat der Europäischen Union 2006].

Streichung der Subventionen für die Erzeugung von Biokraftstoffen

Die EU Kommission kündigte 2007 an, das Subventionsprogramm für die Erzeugung von Biokraftstoffen, das 2004 als Teil der gemeinsamen Landwirtschaftspolitik mit dem Ziel, den europäischen Biokraftstoffsektor zu stärken, eingeführt wurde, zu kürzen. Als Begründung gab die Kommission an, dass die Landwirte innerhalb der EU ihre Tätigkeiten bereits vornehmlich auf die Produktion von Biokraftstoffen ausrichten und eine Anbaufläche für Biokraftstoffe von zwei Millionen Hektar bereits überschritten worden sei [Euractiv 2007].

### 3.3 Internationale Initiativen

Leitsätze der OECD für multinationale Unternehmen

Auf internationaler Ebene gibt es im Bereich der Rohstoffförderung einige Initiativen des Good Governance-Ansatzes. So haben beispielsweise die **OECD-Staaten Leitsätze für multinationale Unternehmen** verabschiedet [OECD 2000], um

- die Aktivitäten multinationaler Unternehmen und derer, die im Ausland tätig sind, mit den rechtlichen und ethischen Auffassungen der OECD-Staaten in Einklang zu bringen
- das gegenseitige Vertrauen zwischen den Unternehmen und der Gesellschaft zu stärken
- die Investitionsumwelt zu verbessern
- den Beitrag multinationaler Unternehmen an einer nachhaltigen Entwicklung zu erhöhen.

EITI - Initiative mehrerer Regierungen

Als ein weiteres Beispiel ist die **Extractive Industries Transparency Initiative (EITI)** zu nennen, die von den Regierungen mehrerer Staaten gemeinsam mit der Zivilgesellschaft und dem Privatsektor in einem Multi-Stakeholder Prozess gegründet wurde. Ziel dieser Initiative ist es, die häufig intransparenten rohstoffinduzierten Geldströme offenzulegen, um bei rohstoffreichen Ländern einen verantwortungsvollen Umgang mit dem Gewinn aus ihren Rohstoffvorkommen zu erreichen.

Als Mitglied des globalen EITI-Aufsichtsrates setzt sich die Bundesregierung sowohl politisch, als auch finanziell für die Erreichung dieses Zieles ein. Um der Förderung transparenter Märkte zu einer umwelt- und sozialgerechten sowie wirtschaftlich rentablen Rohstoffversorgung in den Industriestaaten gerecht zu werden, hat die Bundesregierung ein Pilotvorhaben zur Zertifizierung von Handelsketten im Rohstoffbereich in Auftrag gegeben [Bundesregierung 2007].

Die Bergbauindustrie initiierte internationale Projekte, wie das **Mining, Mineral and Sustainable Development (MMSD)**, um die Nachhaltigkeitsstrategien um den Aspekt der Good Governance zu ergänzen. Das Projekt wurde vom World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) eingebracht und von der Global Mining Initiative (GMI) unterstützt. MMSD sollte sicherstellen, dass Nachhaltigkeitsstandards international eingehalten und umgesetzt werden, um zu verhindern, dass importierte Rohstoffe den Vorstellungen des nachhaltigen Wirtschaftens nicht genügen. Allerdings haben weder MMSD, noch andere internationale Initiativen bisher ein einheitliches und allgemein akzeptiertes Bewertungssystem zur Einhaltung der Nachhaltigkeitsstandards speziell im Bergbau- und Rohstoffsektor hervorgebracht [Umweltbundesamt 2007].

Internationales  
Projekt MMSD

Nach dem Vorbild des Weltklimarates berief das UN-Umweltprogramm (UNEP) den **Ressourcen-Rat**, der sich erstmals am 8. und 9. November 2007 in Budapest traf. Aufgabe des Gremiums ist es, neue Wege zur Entkoppelung von Wirtschaftswachstum und Umweltzerstörung zu finden. Die Arbeitsschwerpunkte sollen dabei auf den Themen Biokraftstoffe und Wiederverwertung von Metallen liegen. Ein weiteres Ziel des Rates ist es, eine Wissensdatenbank aufzubauen, die die derzeitige Nutzung der natürlichen Ressourcen und der damit verbundenen Umweltbelastungen erfasst [Rat für Nachhaltige Entwicklung 2007].

UNEP beruft  
Internationalen  
Ressourcen-Rat ein



## 4 ANHANG

### 4.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Links: Globale Wachstumsraten des BIP jeweils im Vergleich zum Vorjahr. Rechts: Veränderungen des CRB-Metals Subindex zwischen 2002 und 2005 .....	17
Abbildung 2: Entwicklung des Kupferpreises seit der letzten Preishausse 1995 .....	18
Abbildung 3: Weltförderung in t und realer Tantalpreis in US-\$/t .....	19
Abbildung 4: Entwicklung des nominalen Bruttosozialprodukts Chinas seit 1952.....	21
Abbildung 5: Abschätzung des künftigen chinesischen Verbrauchs einiger wichtiger Rohstoffe .....	22
Abbildung 6: Vergleich des Bruttoinlandsprodukts pro Kopf Chinas und Deutschlands.....	23
Abbildung 7: Rohstoffproduktivität und Wirtschaftswachstum in Deutschland von 1994–2005 (1994 = 100) .....	24
Abbildung 8: Verwendung von heimischen Rohstoffen und Rohstoffimporten in Europa. Entwicklung für fossile Brennstoffe sowie Mineralien und Erze in den EU-15 von 1970–2001 .....	26
Abbildung 9: Energieeffizienzsteigerung bzw. Treibhausgasreduktion durch Querschnittstechnologien .....	27
Abbildung 10: Berechnete tägliche Ölproduktion bis zum Jahr 2050 unter Einbezug neuer Fördertechnologien.....	31
Abbildung 11: Der Vergleich unterschiedlicher „Peak Oil“-Modelle zeigt Unterschiede bei der Prognose des zukünftigen Erdölangebots.....	32
Abbildung 12: Der Rohstoffzyklus .....	36
Abbildung 13: Rohstoffindex des Commodities Research Bureau .....	37
Abbildung 14: Anteil der Rohstoffgruppen am deutschen Gesamtimportwert 2005 .....	43
Abbildung 15: Weltweite Explorationsausgaben für die Rohstofferkundung 1997–2005 .....	47
Abbildung 16: Links: Metallgewinnung in der Deponie Elbisgraben, Schweiz. Rechts: Der Müllberg der 16 Millionen Einwohnerstadt Manila ist über 40 Meter hoch angewachsen .....	53
Abbildung 17: Effizienzpotenziale in der Wertschöpfungskette von Papier. Insgesamt erhält man Einsparungen um den Faktor 26 also 96 % weniger Waldfläche für Zellstoffanbau.....	56
Abbildung 18: Der Bürostuhl „Picto“ als klassisches Beispiel für Ökodesign (nähere Erläuterung siehe Text) .....	57
Abbildung 19: Herstellung des Vitamins B2 bei BASF. Links: Vergleich des mehrstufigen chemischen Verfahrens mit der einstufigen Fermentation. Rechts: In großen Fermentern produzieren Kulturen des Pilzes <i>Ashbya gossypii</i> das Vitamin B2.....	58
Abbildung 20: Zwei Beispiele für Nanosensoren. A: Zwischen zwei Elektroden wird ein leitfähiges Molekül mit spezifischer Sequenz eingebunden (z. B. ein Peptid). Dieses kann mit Metallionen interagieren – die daraus resultierende Änderung der Leitfähigkeit wird detektiert. B: Zum Nachweis großer Moleküle werden	

leitfähige Polymere, bestückt mit spezifischen Probenmolekülen, zwischen zwei Elektroden eingespannt. Bei Bindung der Zielmoleküle ändert sich die Leitfähigkeit. ....	59
Abbildung 21: Links: Darstellung des überkritischen Bereichs in einem PT-Diagramm. Rechts: Schema eines Färbeprozesses mit überkritischem CO <sub>2</sub> .....	61
Abbildung 22: Haihaut (Vergrößerung oben rechts) als Vorbild für Oberflächen mit reduziertem Strömungswiderstand. Durch die Beschichtung mit einer analog strukturierten Folie (rechts unten) konnte der Strömungswiderstand eines Airbus um 8 % und der Treibstoffverbrauch um 4 % reduziert werden .....	62
Abbildung 23: Kostenstruktur im verarbeitenden Gewerbe in Deutschland im Jahr 2003.....	64
Abbildung 24: Links: Audi hat mit dem Spaceframe ein Konzept für den Einsatz von Aluminium für den Rahmen in Serienfahrzeugen entwickelt. Rechts: Haftfeste Beschichtung eines Umformwerkzeuges nach dem Diamor-Verfahren.....	65
Abbildung 25: Entwicklung der Schrottpreise (2002 - 2007).....	67
Abbildung 26: Links: RFID-Transponder an einem Container für Metallschrott. Rechts: Die Kennzeichnung elektronischer Geräte mit Smart Labels soll die Aufbereitung von Elektronikschrott effizienter gestalten .....	70
Abbildung 27: Links: Momentaufnahme der Online-Analyse mit Laser-Emissionsspektrometrie von Al-Schrottproben. Rechts: Sortierung von Altpapier mit NIR-Spektroskopie.....	72
Abbildung 28: Aufbereitung von MVA-Schlacke für die Metallrückgewinnung. Ein Brecher zerkleinert die vorsortierte Schlacke auf wenige Millimeter .....	73
Abbildung 29: Recyclbare Kunststoffteile eines BMWs. ....	74
Abbildung 30: Erwartete Menge des Bleimülls durch die Entsorgung von Bildröhren in den USA .....	75
Abbildung 31: Substitution durch technische Entwicklung: Um gleiche Bandbreiten zu erzielen, muss ein Kupferkabel ca. 100-mal dicker als eine einzelne Glasfaser sein.....	78
Abbildung 32: Energiepreisentwicklung in Deutschland von 2002–2007. Aufgrund von Versorgungsengpässen kam es im 2. Halbjahr 2006 zu einem massiven Anstieg der Pelletpreise.....	80
Abbildung 33: Raps-Anbauflächen in Deutschland seit 1880.....	81
Abbildung 34: Biomasse liefert heute nicht einmal 2 % des deutschen Bedarfs an Strom, Wärme und Kraftstoffen – im Jahr 2030 könnten es über 17 % sein. Nicht nur Biogas, Waldrestholz, Schwachholz, Reste aus der Holzverarbeitung und die großen Mengen des bislang ungenutzten Holzzuwachses bieten Potenziale. Auch Energiepflanzen und Stroh haben für die Energieversorgung der Zukunft erhebliche Bedeutung.....	81
Abbildung 35: Links: Kunststoffpanele mit Mikroalgen, Algenzucht bei Vertigro. Rechts: „Greenhouse Gas Mitigation Project“ an der Jacobs Universität Bremen .....	82



Abbildung 36: Links: Magnesium Injektions-Motor [Mitsubishi 2006]. Rechts: Fresnel-Linsen zur Erzeugung von Laserstrahlen aus Sonnenlicht .....	85
---	----

## 4.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Chinas globaler Rang beim Importvolumen [US-\$] wichtiger Rohstoffe 2005.....	21
Tabelle 2: Materialklassen der EU-27 (+ Türkei) mit den größten Umweltauswirkungen.....	27
Tabelle 3: Bewaffnete Konflikte im Zeitraum 1990–2002, die mit Rohstoffen in Verbindung stehen. ....	35
Tabelle 4: Volatilität der Rohstoffpreise (1980–2007). ....	38
Tabelle 5: Die global größten 10 Firmen im Bergbausektor.....	39
Tabelle 6: Langfristige Einschätzung der Rohstoffknappheit für 12 ausgewählte und als potenziell kritisch eingestufte Rohstoffe.....	45
Tabelle 7: Energetische Amortisationszeiten für verschiedenen Typen von Solarzellen. ....	66
Tabelle 8: Aktuelle und geschätzte künftige Recyclingraten wichtiger Rohstoffe.....	68
Tabelle 9: Zusätzliche Wertschöpfung aufgrund des Einsatzes von Sekundärrohstoffen in Deutschland im Jahr 2005 durch eingesparte Importe von Primärrohstoffen und Energieeinsparungen in Millionen Euro.....	69
Tabelle 10: Substitutionspotenzial ausgewählter Rohstoffe.....	79
Tabelle 11: Konfliktfelder der globalen Flächennutzung beim Anbau von Biomasse.....	84
Tabelle 12: Studienmöglichkeiten zur Thematik „Rohstoffe“.....	106

## 4.3 Quellenverzeichnis

- [ACEA 2007] European Automobile Manufacturers Association:  
(ACEA) „Recycling of vehicles, a complex challenge“.  
<http://www.acea.be/recycling/>, 17.10.2007.
- [Allianz/OECD 2005] Allianz/OECD: „Opportunities and risks of  
Nanotechnologies“. Juni 2005.
- [aluinfo 2007] aluinfo: „Recycling“, Gesamtverband der  
Aluminiumindustrie e. V. <http://www.aluinfo.de/>, 17.10.2007.
- [Alu-web.de 2007] Alu-web.de: „Kupfernachfrage leidet unter der  
Substitution durch Aluminium“. <http://www.alu-web.de/>, 8.10.2007.
- [Ameling 2007] Ameling, D.: Stahlindustrie in Deutschland mit neuem  
Rekord. Pressegespräch am 7. Oktober 2007. Berlin, 2007.

- [Ärzte für die Dritte Welt 2007] Ärzte für die Dritte Welt 2007: „Bei den ‚Müllmenschen‘ vom Smokey Mountain in Payatas“. <http://www.aerzte-dritte-welt.de>, 15.10.2007.
- [Bachmann 2007] Bachmann G., Grimm V., Hoffknecht A., Luther W., Ploetz C., Reuscher G., Teichert O., Zweck A.: Nanotechnologien für den Umweltschutz. Zukünftige Technologien Nr. 71, 2007.
- [BAFU 2006] Bundesamt für Umwelt der Schweizerischen Eidgenossenschaft (BAFU): „Die Deponie als Rohstofflager“. Fokus Juli/August 2006.
- [Bannon 2003] Bannon I., Collier P.: Natural Resources and Violent Conflict. Options and Actions. The World Bank, Washington, 2003.
- [Bardt 2006] Bardt, H.: Die gesamtwirtschaftliche Bedeutung von Sekundärrohstoffen. IW-Trends 3/2006. Institut der deutschen Wirtschaft, Köln. 2006.
- [BASF 2007] BASF: „Mikroorganismen als Synthesereaktoren: Fermentative Herstellung von Vitamin B2“. <http://www.corporate.basf.com>, 15.10.2007.
- [Bayer 2007] Bayer, T.: „Wild, wilder, Warenmärkte“. Financial Times Deutschland, 18.06.2007.
- [BDE 2007] Bundesverband Deutscher Stahlhandel: „Aktuell: Schrottpreiszuschlag“. <http://stahlhandel.com/de/content/aktuell/schrottpreiszuschlag/>, 16.10.2007.
- [Behr 2003] Behr, S.: „CO<sub>2</sub> färbt Textilien umweltfreundlich – Prototyp kurz vor Bau“. innovationsreport, [http://www.innovationsreport.de/html/berichte/biowissenschaften\\_chemie/bericht-21411.html](http://www.innovationsreport.de/html/berichte/biowissenschaften_chemie/bericht-21411.html), 08.10.2007.
- [Behredt 2007] Behredt, S., Scharp, M., Kahlenborn, W., Feil, M., Dereje, C., Bleischwitz, R. und Delzeit, R.: Seltene Metalle. Maßnahmen und Konzepte zur Lösung des Problems konfliktverschärfender Rohstoffausbeutung am Beispiel Coltan. Berlin, UBA-Texte 08/07, 2007.
- [BGR 2005] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Kurzbericht zur Konzentration in der Weltbergbauproduktion. Hannover, 2005..
- [BGR 2005b] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe für Metall- und Nichtmetallrohstoffe. 2005.
- [BGR 2006] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffforschung: Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien. Heft XXXIV: Bundesrepublik Deutschland. Rohstoffsituation 2005. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 2006.
- [BGR 2006b] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffforschung: Tätigkeitsbericht 2005/2006. Hannover, 2006.
- [BGR 2007] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Kurzbericht zur Konzentration in der Weltbergbauproduktion – Fortschreibung Februar 2007. Hannover, 2007.

- 
- [Blendinger 2004] Blendinger, W.: „Ölschiefer“.  
[http://www.energiekrise.de/news/forum/html-docs/oelschiefer/blendinger\\_nco.html](http://www.energiekrise.de/news/forum/html-docs/oelschiefer/blendinger_nco.html)
- [Bliss 2005] Bliss, J.: „An Introduction to Peak Oil“.  
<http://www.thesharpener.net>, 2005.
- [BMBF 2007] Bundesministerium für Bildung und Forschung: „WING – Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft.“  
<http://www.bmbf.de/de/3780.php>, 30.11.2007.
- [BMU 2007] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: „Netzwerk Ressourceneffizienz“.  
[http://www.bmu.de/wirtschaft\\_und\\_umwelt/ressourceneffizienz/ressourcennetzwerk/doc/38933.php](http://www.bmu.de/wirtschaft_und_umwelt/ressourceneffizienz/ressourcennetzwerk/doc/38933.php), 23.11.2007.
- [BMW 2005a] Bundesministerium für Wirtschaft (Hrsg.): Projektgruppe Rohstoffe – Bericht zur aktuellen rohstoffwirtschaftlichen Situation und zu den möglichen rohstoffpolitischen Handlungsoptionen. Berlin, 2005.
- [BMW 2005b] Bundesministerium für Wirtschaft: „Deutsche Geowissenschaftler untersuchen Rohstoffvorkommen im Pazifik: Manganknollen der Tiefsee könnten wichtige Rohstoffquelle werden.“  
[www.bmw.de](http://www.bmw.de), 15.09.2005.
- [Bockey 2006] Bockey, D.: „Biodiesel und pflanzliche Öle als Kraftstoffe – aus der Nische in den Kraftstoffmarkt“.  
Technikfolgenabschätzung, Theorie und Praxis Nr. 1, 15. Jahrgang, April 2006, S. 10–15.
- [BUND 1997] Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland: „Versessen auf Öko: Picto“. in: Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (Hrsg.): Aktionshandbuch Zukunftsfähigkeit. Bonn, 1997.
- [Bundesregierung 2002] Bundesregierung: „Perspektiven für Deutschland – Unsere Strategie für eine Nachhaltige Entwicklung“. 2002.
- [Bundesregierung 2005] Bundesregierung: Wegweiser Nachhaltigkeit. Nachhaltigkeitsstrategie für Deutschland. Berlin, 2005, S. 92–103.
- [Bundesregierung 2007] Bundesregierung: Elemente einer Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Berlin, 2007.
- [Cambridge Energy Research Associates 2006] Cambridge Energy Research Associates (CERA): „Peak Oil Theory – ‚World Running Out of Oil Soon‘ – Is Faulty; Could Distort Policy & Energy Debate“.  
<http://www.cera.com/aspx/cda/public1/news/pressReleases/pressReleaseDetails.aspx?CID=8444>, 2006.
- [Coghlan 2006] Coghlan B. et al.: „Mortality in the Democratic republic of Kongo: a nationwide survey.“ In: Lancet, Nr. 367, S. 44–51.
- [demea 2006] Deutsche Materialeffizienzagentur „Materialeffizienz: Weniger Kosten durch mehr Effizienz“, Materialeffizienz statt Personalabbau - Erhebliche Gesamtkostenersparnis sozialverträglich möglich?, Veranstaltung am 23.11.2006 in der IHK Braunschweig (2006)

- [Demea 2007] Deutsche Materialeffizienzagentur: „Materialeffizienzpreis“. <http://www.materialeffizienz.de/materialeffizienzpreis/ueberblick>, 23.11.2007.
- [DEPV 2007] Deutscher Energie-Pellet-Verband e. V.: „Pellets Preisentwicklung“. <http://www.depv.de/marktdaten/pelletspreise/>, 12.10.2007.
- [Deutsche Rohstoff AG 2007] Deutsche Rohstoff AG: „Exploration“. <http://www.rohstoff.de/expl.html>, 20.07.2007.
- [DFG/SPP1019 2003] Deutsche Forschungsgemeinschaft: Schwerpunktprogramm 1019: „Überkritische Fluide als Lösungs- und Reaktionsmittel“. 2003.
- [DRAG/Superzyklus 2007] Deutsche Rohstoff AG: „Superzyklus“. <http://www.rohstoff.de/>, 18.07.2007.
- [Economie 2000] Economie, „OECD-Leitsätze für multinationale Unternehmen“. [http://economie.fgov.be/organization\\_market/oced\\_guidelines/home\\_de.htm](http://economie.fgov.be/organization_market/oced_guidelines/home_de.htm)
- [EEA 2005/1] European Environment Agency: EEA-Report „Sustainable use and management of natural resources“. Nr. 9/2005.
- [EEA 2005] Europäische Umweltagentur: „Die Umwelt in Europa – Zustand und Ausblick 2005 – Zusammenfassung“. 2005.
- [Ehret 2005] Ehret, R.: „Forschungen zu neuem Trennverfahren, um Kohle und Erze aufzubereiten.“ idw-online, <http://idw-online.de/pages/de/news119043>, 28.06.2005.
- [ELVIES 2007] Effiziente Logistik und Verwertung durch den integrierten Einsatz von Smartlabels im Elektro- und Elektronikschrott: „Gegenstand“. <http://www.elvies.de/>, 17.10.2007.
- [Endres 2000] Endres, A. und Querner, I.: Die Ökonomie natürlicher Ressourcen. Stuttgart: Kohlhammer, 2000.
- [Erdmann 2004] Erdmann, L., Handke, V., Klinski, S., Behrendt, S., Scharp, M.: „Nachhaltige Bestandsbewirtschaftung nicht erneuerbarer knapper Ressourcen“. IZT Werkstattbericht Nr. 68, 2004.
- [EU 2003] Europäische Kommission: „Towards a Thematic Strategy on the Sustainable Use of Natural Resources“. COM, 2003, S. 572.
- [Euractiv, 2007] Euractiv: „EU kürzt Subventionen für Biokraftstoffpflanzen“. <http://www.euractiv.com/de/nachhaltige-entwicklung/eu-kurzt-subventionen-biokraftstoffpflanzen/article-167721>, 30.11.2007.
- [EurActiv 2007] EurActive: „Peak Oil – Ölfördermaximum“. <http://www.euractiv.com/de/energie/peak-oil-olfordermaximum/article-164175>, 9.07.2007.
- [FHG IWS 2007] raunhofer Institut Werkstoff- und Strahltechnik: „Anwendungen von Diamor®-Schichten“. <http://www.iws.fraunhofer.de/>, 15.10.2007.
- [FNR 2006] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.: „Nachwachsende Rohstoffe – Spitzentechnologie ohne Ende“. 2006.

- 
- [Focus-online 2007] Focus: „Russen ‚hissen‘ Flagge“. [http://www.focus.de/wissen/wissenschaft/klima/nordpol\\_aid\\_68659.html](http://www.focus.de/wissen/wissenschaft/klima/nordpol_aid_68659.html), 02.08.2007.
- [Fraunhofer ILT 2007] Fraunhofer-Institut für Lasertechnik: „Schnelle Identifikation von Leichtmetall-Legierungen zur automatischen Sortierung - SILAS“. <http://www.ilt.fraunhofer.de/ger/101262.html>, 18.10.2007.
- [Froelich 2007] Froelich D., Maris E., Haoues N., Cheineau L., Renard H., Agraaham F. und Lassartesses R.: „State of the art of plastic sorting and recycling: Feedback to vehicle design“. Minerals Engineering 20, 2007, S. 902–912.
- [Frondele 2005] Frondele, M. et al.: „Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen“. Endbericht, Forschungsprojekt Nr. 09/05 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. 2005.
- [Gärtner 2007] Gärtner, M.: „Aus Schlamm wird Treibstoff“. VDI-Nachrichten Nr. 49, 07.12.2007, S. 3.
- [Gemming 2007] Gemming S., Seifert G. u. a.: „Catalysts on the edge“. Nature Nanotechnology, Vol. 2, Januar 2007, S. 21–22.
- [Gensch 2004] Gensch, C.-O., Griebhammer, R.: „PROSA – PKW-Flotte“. Öko-Institut e. V, 2004.
- [Global Green Solutions 2007] Global Green Solutions: „Vertigro“. <http://www.globalgreensolutionsinc.com/s/Vertigro.asp>, 22.10.2007.
- [Global Reporting Initiative 2006] Global Reporting Initiative: Sustainability Reporting Guidelines. Amsterdam, 2006.
- [Gräbner 2007] Gräbner, M.: „Minen im Müllberg“. heise online, <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/26/26219/1.html>, 19.07.2007.
- [Harvard Law School 2007] International Human Rights Clinic Human Rights Program, Harvard Law School 2007: All That Glitters: Gold Mining In Guyana. The Failure of Government Oversight and the Human Rights of Amerindian Communities. Cambridge. Massachusetts, 2007.
- [Hawken 2000] Hawken, P., Lovins, A., Lovins, H.: „Ökokapitalismus“. München: Riemann Verlag, 2000.
- [Heilmann 2007] Heilmann, D. und Hennes, M.: „BHP baggert Rio Tinto an. Handelsblatt“. (online-Ausgabe), [http://www.handelsblatt.com/news/\\_pv/\\_p/200038/\\_t/ft/\\_b/1349208/default.aspx/index.html](http://www.handelsblatt.com/news/_pv/_p/200038/_t/ft/_b/1349208/default.aspx/index.html), 08.11.2007,
- [Hogan 2004] Hogan, L.: „Research and development in exploration and mining : implications for Australia’s gold industry“. ABARE eReport; 04.3, 2004.
- [HTW 2006] Pfeifer, W.: „Bionik – Lernen von der Natur für bessere Konstruktionen“. HTW-Online, Ausgabe 32, <http://www.htw-saarland.de/organisation/htwonline/2006/32/content/bionik>, 12.10.2007.
- [Hufenbach 2007] Hufenbach, W., Adam, F., Werner, J.: „Mit Leichtigkeit zu mehr Effizienz“. VDI-Expertenforum, 16.02.2007.

- [IEA 2007] International Energy Agency 2007: World Energy Outlook. Rome 2007
- [IMF 2007] International Monetary Fund: „World Economic Outlook 2007“. <http://www.imf.org>, 2007, S. 36.
- [INGEDE 2007] Internationale Forschungsgemeinschaft Deinking-Technik: „Infrarot-Augen erkennen störende Flexodrucke und Karton“. <http://www.ingede.de/ingindx/presse/pm0701d.html>, 18.10.2007.
- [International Energy Agency 1007/2] International Energy Agency (IEA), “Key World Energy Statistics 2006”, <http://www.iea.org> (2007/2)
- [International Energy Agency 2007] International Energy Agency: „World Energy Outlook 2006“. <http://www.worldenergyoutlook.org>, 2007.
- [IRCCM 2007] International Research Consortium on Continental Margins: „Greenhouse Gas Mitigation Project“. <http://www.irccm.de/greenhouse/project.html>, 22.10.2007.
- [JODI 2005] Joint Oil data Initiative – JODI. <http://www.jodidata.org/FileZ/ODTmain.htm>, 2005.
- [Jordi 2005] Jordi, B.: „Aufbereitung der Schlacke entlastet die Umwelt“. GSA Informationsbulletin 1/2005.
- [JVSE 2007] JVSEngineering: „Was ist überkritisches CO<sub>2</sub>?“. [http://jvse.de/CO2\\_de.html](http://jvse.de/CO2_de.html), 08.10.2007.
- [Kehse 2006] Kehse, U.: „Kupfer aus biologischem Abbau“. Financial Times Deutschland (online-Ausgabe), 09.10.2007.
- [Killmann 2006] Killmann, D., Pretz, T.: „Status der sensorgestützten Sortierung im Recycling“. Lehrstuhl für Aufbereitung und Recycling fester Abfallstoffe (I.A.R.), RWTH Aachen, 2006.
- [Kollmann 2006] Kollman, H.: „Leichtbau im Automobilbau: Audi Space Frame und Tailored Blanks“. Institut für Systemtechnik, Umwelttechnik, Universität Siegen, <http://www.uni-siegen.de/fb11/lehre/mb/beispiel/audi.html?lang=de>, 15.10.2007.
- [Kristof 2007] Kristof, K.: „Hot Spots und zentrale Ansatzpunkte zur Steigerung der Ressourceneffizienz“. Projektergebnisse: „Steigerung der Ressourcenproduktivität als Kernstrategie einer nachhaltigen Entwicklung“. Projekt im Auftrag des BMBF. 2007.
- [Levenstein 2007] Levenstein, S.: „Clean Magnesium Energy Cycle Hints at Fossil Fuel Freedom“. Inventorspot. [http://inventorspot.com/articles/japan\\_magnesium\\_energy\\_cycle\\_5887](http://inventorspot.com/articles/japan_magnesium_energy_cycle_5887), 16.10.2007.
- [Linsmeier 2007] Linsmeier, K.-D., Fischetti, M.: „Alt und neu im Faserbrot“. Spektrum der Wissenschaft, Ausgabe März 2007, S. 47.
- [Linton 2004] Linton, J., Yeomans, J.: „Materials recycling and industrial ecology“. Nature Materials 3, 2004, S. 199–201.
- [LME 2007] London Metal Exchange: „Official Prices, US-\$ per tonne for 05 October 2007“. <http://www.lme.co.uk>, 08.10.2007.
- [Lunding 2006] Lunding, A.: Chinesische Firmen auf dem Vormarsch. Investitionen chinesischer Firmen im Ausland. DB Research, 2006.

- 
- [McKinsey 2003] McKinsey & Company: „Industrial Biotechnology“. 2003.
- [Metals Economics Group 2007] Metals Economics Group: World Exploration Trends. Halifax, Nova Scotia, Kanada, 2007.
- [Mitsubishi 2006] Mitsubishi Corporation: „CO<sub>2</sub>-Free Engine Powers Up“. Mitsubishi Monitor, August/September 2006.
- [MMSD 2002] Minerals, Mining and Sustainable Development Project: Breaking New Ground. Report of the Minerals, Mining and Sustainable Development Project. Earthscan: London, 2002.
- [Mortished 2004] Mortished, C.: „How Shell blew a hole in a 100-year reputation“. Times Online, [http://business.timesonline.co.uk/tol/business/industry\\_sectors/natural\\_resources/article993257.ece](http://business.timesonline.co.uk/tol/business/industry_sectors/natural_resources/article993257.ece), 2004.
- [Narayan 2007] Narayan, A. L.: „Japanese team revives solar lasers in quest for clean fuels“. <http://optics.org/cws/article/research/31407>, 16.10.2007.
- [National Academy of Sciences 2002]: National Adademy of Sciences: Evolutionary and Revolutionary Technologies for Mining. Washington D.C, National Academy Press, 2002..
- [Odum 1983] Odum, E. P.: „Grundlagen der Ökologie“. Stuttgart/New York, 1983.
- [OECD 2000] OECD: Die OECD-Leitsätze für multinationale Unternehmen. Paris, 2000.
- [Oertel/Grunwald 2006] Oertel, D., Grunwald, A.: „Potenziale und Anwendungsperspektiven der Bionik“. TAB Vorstudie, 2006.
- [Plasticker 2006] Plasticker: „PRF: Handbuch zu aktuellen technischen Trends im PET-Recycling“. <http://plasticker.de/>, 17.10.2007.
- [Plastverarbeiter 2006] Plastverarbeiter: „PET-Recycling übertrifft Erwartungen“. <http://www.plastverarbeiter.de/>, 17.10.2007.
- [Pöl-Tec 2007] Pöl-Tec: „Rapsanbau als Nutzpflanze in Deutschland“. [http://www.poel-tec.com/kraftstoff/rapsanbau\\_deutschland.php](http://www.poel-tec.com/kraftstoff/rapsanbau_deutschland.php), 19.09.2007.
- [Price 2006] Price, R., Barthel, F., Blaise, J.-R., McMurray, J.: Forty years of uranium resources, production and demand in perspective. NEA News 2006, Nr. 24.1, 2006.
- [Puurunen 2006] Puurunen, K.: „Opportunities for utilising nanotechnology in reaching near-zero emissions in the paper industry.“ Journal of Cleaner Production, 2007, S. 1287–1294.
- [Quaschnig 2002] Quaschnig, V.: „Energieaufwand zur Herstellung regenerativer Anlagen“. <http://www.volker-quaschnig.de/datserv/kev/index.html>, 15.10.2007
- [Rat der Europäischen Union 2006] Rat der Europäischen Union: EU-Strategie für Nachhaltige Entwicklung. Brüssel. 2006.
- [Rat für Nachhaltige Entwicklung 2007] Rat für Nachhaltige Entwicklung: „Vereinte Nationen setzen sich für Ressourcen-Rat ein“. [http://www.nachhaltigkeitsrat.de/aktuell/news/2007/28-11\\_05/](http://www.nachhaltigkeitsrat.de/aktuell/news/2007/28-11_05/), 2007.

- [Reinhold 2007] B. Reinhold, R. Blittersdorf: Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit von Schichtsystemen durch Einbau nanoskaliger Partikel in Passivierungsschichten – Galvanotechnik. 4/2007.
- [Reuters-CRB Index 2007] Reuters: Reuters-CRB Index. <http://www.crbtrader.com>, 16.07.2007.
- [RFID-Atlas 2006] RFID-Atlas: „RFID-Anwenderbeispiel Scholz Recycling GmbH“. <http://www.rfidatlas.de/>, 17.10.2007.
- [Richter-Maierhofer 2005] Richter-Maierhofer, E.: „Trendbericht Biotechnologie – Die Zukunft ist weiß: Chemikalien aus dem Bioreaktor“. Innovationsreport. 2005.
- [Robelius 2007] Robelius F.: „Giant Oil Fields – The Highway to Oil“. <http://publications.uu.se/abstract.xsql?dbid=7625>, 2007.
- [Rührmair 2007] Rührmair, C.: „Tümpelschleim als Weltenretter“. DIE ZEIT, Nr. 15, 04.04.2007.
- [SAM Group 2007] SAM Group: Sustainability Yearbook 2007. 2007.
- [SCARnet 2005] [http://ec.europa.eu/research/agriculture/scar/index\\_en.cfm?p=3\\_coord](http://ec.europa.eu/research/agriculture/scar/index_en.cfm?p=3_coord).  
[http://ec.europa.eu/research/agriculture/scar/pdf/cwg/non-food\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/agriculture/scar/pdf/cwg/non-food_en.pdf).  
10.12.2007
- [Scharf 2004] Scharf, A.: „Funkende Etiketten“. Design Report, Heft 11/2004, <http://www.design-report.de/>, 2004.
- [Science for Environment Policy 2007] Science for Environment Policy: „Cars and Design-for-Recycling“. DG Environment News Alert Service, [http://ec.europa.eu/environment/integration/research/research\\_alert\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/integration/research/research_alert_en.htm), 2007.
- [SPG Media 2006] SPG Media: Directional Drilling promises Benefits for Industry. 06.06.2006.
- [SRU 2007] Sachverständigenrat für Umweltfragen: „Klimaschutz durch Biomasse“. Sondergutachten, Juli 2007.
- [Statistisches Bundesamt 2006] „Nachhaltige Entwicklung in Deutschland – Indikatorenbericht 2006“. 2006.
- [ta-akademie 2002] ta-akademie: „Moderne Entsorgungstechniken machen Mülltrennung überflüssig“. [http://www.innovations-report.de/html/berichte/umwelt\\_naturschutz/bericht-11593.html](http://www.innovations-report.de/html/berichte/umwelt_naturschutz/bericht-11593.html), 17.10.2007.
- [The Age Company 2007] The Age Company: „Villagers sue BHP Billiton for \$5bn“. [www.theage.com.au](http://www.theage.com.au)., 20.01.2007.
- [thecopperlink 2007] thecopperlink: „Metallkurse: Deutsche Metallpreise“. [http://www.thecopperlink.com/services/metal-prices/prices/se\\_me-pr\\_pr\\_index.php.de](http://www.thecopperlink.com/services/metal-prices/prices/se_me-pr_pr_index.php.de), 8.10.2007.
- [Thomas 2006] Thomas, S., Barthel, C., Bunse, M., Irrek, W.: „Optionen und Potenziale für Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen“. Kurzfassung des Endberichts. Wuppertal, Wuppertal Institut im Auftrag der E.ON AG, 2006.



- 
- [Tilman 2006] Tilman, D., Hill, J., Lehman, C.: „Carbon-Negative Biofuels from Low-Input High-Diversity Grassland Biomass“. *Science* 314 (5805), 2006, S. 1598.
- [Trendletter 2006] Trendletter: „Rohstoffe: So schafft Knappheit neue Chancen für das Geschäft“. *Trendletter* 08, 2006.
- [Trinh 2006] Trinh, T., Voss, S. und Dyck, S.: *Chinas Rohstoffhunger. Auswirkungen auf Afrika und Lateinamerika*. DB Research 359, Frankfurt/Main, 2006..
- [UBA 2007] Umweltbundesamt: Ökodesign. <http://www.umweltbundesamt.de/produkte/oekodesign/index.htm>, 05.10.2007.
- [Uhde 2007] Uhde High Pressure Technologies GmbH: „Färben mit überkritischen Fluiden“. <http://www.uhde-hpt.com/index.php?id=51&L=de>, 12.10.2007.
- [Umweltbundesamt 2007] Umweltbundesamt: „Rohstoffversorgung in Deutschland“. <http://www.env-it.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2279>, 2007.
- [Umweltdialog 2007] Umweltdialog: „Air New Zealand testet Biotreibstoff“. [http://www.umweltdialog.de/umweltdialog/mobilitaet/2007-10-11\\_Air\\_New\\_Zealand\\_testet\\_Biotreibstoff.php](http://www.umweltdialog.de/umweltdialog/mobilitaet/2007-10-11_Air_New_Zealand_testet_Biotreibstoff.php), 22.11.2007.
- [UN Security Council 2001] UN Security Council: 1st Final Report of the Panel of Experts on the illegal Exploitation of Natural Resources and other Forms of Wealth of the Democratic Republic of the Congo. 2001.
- [UN Security Council 2002] UN Security Council: 2ndFinal Report of the Panel of Experts on the illegal Exploitation of Natural Resources and other Forms of Wealth of the Democratic Republic of the Congo. 2002.
- [UNIDO 2006] UNIDO: Global Impacts of Mercury Supply and demand in Small-scale Gold Mining. [www.globalmercuryproject.org](http://www.globalmercuryproject.org), 2006
- [van der Voet 2004] van der Voet, E., van Oers, L., Moll, S., Schütz, H., Bringezu, S., de Bruyn, S., Sevenster, M., Warringa, G.: „Policy Review on Decoupling: Development of indicators to assess decoupling of economic development and environmental pressure in the EU-25 and AC-3 countries.“. CML report 166, Leiden: Institute of Environmental Sciences (CML), Leiden University, 2004.
- [VDI 1993] Neumann, D.: „Technologieanalyse Bionik. Analysen + Bewertungen zukünftiger Technologien“. VDI Technologiezentrum, 1993.
- [VDI-Expertenforum 2007] VDI-Expertenforum: „Erfolg durch innovative Materialien“. *demea Pressemitteilung*, 2007.
- [von Weizsäcker 1995 ] von Weizsäcker E. U., Lovins, A. B., Lovins, L. H.: „Faktor vier. Doppelter Wohlstand – halbiertes Naturverbrauch“. Droemer Knauer Verlag, 1995.
- [Wagner 2005] Wagner, M., Huy, D.: „Schafft der Strukturwandel in der Nachfrage eine neue Dimension für die Weltrohstoffmärkte?“. *BGR-Commodity Top News* 24, 2005.

- [Wagner 2007] Wagner, M., Franken, G., Martin, N., Melcher, F., Vasters, J.: Zertifizierte Handelsketten im Bereich mineralischer Rohstoffe. Hannover, [http://www.bgr.bund.de/cln\\_006/nn\\_326194/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Projekte/Rohstoffwirtschaft\\_Bergwirtschaft/RW\\_Zertifizierte\\_Handelsketten.html](http://www.bgr.bund.de/cln_006/nn_326194/DE/Themen/Min_rohstoffe/Projekte/Rohstoffwirtschaft_Bergwirtschaft/RW_Zertifizierte_Handelsketten.html), 2007.
- [Welt-Online 2006] Welt-Online: „Kupferdiebstahl boomt: drei Mal mehr Taten“. [http://www.welt.de/print-welt/article154829/Kupferdiebstahl\\_boomt\\_drei\\_Mal\\_mehr\\_Taten.html](http://www.welt.de/print-welt/article154829/Kupferdiebstahl_boomt_drei_Mal_mehr_Taten.html), 9.10.2007.
- [Wilkhahn 2007] Wilkhahn: Produkte/Stühle/Picto. <http://www.wilkhahn.de>, 15.10.2007.
- [Wiwo 2007] WirtschaftsWoche: „Algen als Spritfabrik“, WirtschaftsWoche, NR. 042, 15.10.2007, S. 146.
- [WWF 2000]: World Wide Fund for Nature: „Giftflut rottet Fischotter in Ungarn aus“. <http://www.learn-line.nrw.de/angebote/agenda21/archiv/00/pr/WWF2G.HTM>, 16.02.2000.

#### 4.4 Verzeichnis von Studiengängen in Deutschland

Im Folgenden sind Studienmöglichkeiten zur Thematik „Rohstoffe“ dargestellt. 13 der genannten Hochschulen bieten für ihre Bachelorstudiengänge keine weiterführenden Masterstudiengänge an. Zwar werden an einigen wenigen Hochschulen entsprechende Masterprogramme in Erwägung gezogen, doch gibt es dort bisher keine Weiterqualifizierungsmöglichkeiten für Bachelorabsolventen<sup>16</sup>. Nicht vorhandene, weiterführende Studienprogramme nach dem Bachelor sind zum Teil darauf zurückzuführen, dass abgewartet wird, wie hoch die Nachfrage nach dem neu geschaffenen Studiengang bei den Studenten ist.

Hochschule	Studiengang	Abschluss
FH Aachen	Bauingenieurwesen	Bachelor
RWTH Aachen	Angewandte Geowissenschaften	Bachelor/Master
RWTH Aachen	Georessourcenmanagement	Bachelor/Master
RWTH Aachen	Rohstoffingenieurwesen	Bachelor/Master
RWTH Aachen	Bergbau (wird eingestellt)	Diplom
RWTH Aachen	Metallurgie und Werkstofftechnik (wird eingestellt)	Diplom
RWTH Aachen	Werkstoffingenieurwesen	Bachelor/Master
RWTH Aachen	Wirtschaftsingenieurwesen, Werkstoff- und Prozesstechnik	Bachelor
RWTH Aachen	Wirtschaftsingenieurwesen – Schwerpunkt Rohstoff- und Werkstofftechnik	Diplom

<sup>16</sup> Die Bachelor-/ Masterstudiengänge sind im Zuge des Bologna-Prozesses neu an den Hochschulen eingeführt worden.

<b>Hochschule</b>	<b>Studiengang</b>	<b>Abschluss</b>
FH Aalen	Oberflächentechnik und Werkstoffkunde	Bachelor/Diplom
TU Berlin	Werkstoffwissenschaften	Bachelor, ab WS09/10 auch als Master
Uni Bayreuth	Umwelt- und Bioingenieurwissenschaft – Schwerpunkt Werkstoff- und Verfahrenstechnik	Diplom
TFH Georg Agricola Bochum	Rohstoffe und Geotechnik	Diplom
TFH Georg Agricola Bochum	Geoingenieurwesen Bergbau	Bachelor/Master
TFH Georg Agricola Bochum	Steine und Erden	Bachelor
TFH Georg Agricola Bochum	Geotechnik und Angewandte Geologie	Bachelor
Ruhr-Universität Bochum	Geowissenschaften	Bachelor/Master
Ruhr-Universität Bochum	Umwelttechnik und Ressourcenmanagement	Bachelor
Uni Bonn	Geowissenschaften	Bachelor
FH Braunschweig/ Wolfenbüttel	Recycling	Diplom
Uni Bremen	Geowissenschaften	Bachelor/Master
TU Clausthal	Energie und Rohstoff	Bachelor
TU Clausthal	Materialwissenschaft und Werkstofftechnik	Bachelor
TU Clausthal	Energie- und Rohstoffversorgungstechnik	Master
TU Clausthal	Materialwissenschaft	Master
TU Clausthal	Werkstoffwissenschaften	Diplom
BTU Cottbus	Umwelt- und Ressourcenmanagement	Bachelor/Master
TU Darmstadt	angewandte Geowissenschaften	Diplom
TU Dresden	Abfallwirtschaft und Altlasten	Bachelor/Master oder Diplom
TU Dresden	Werkstoffwissenschaft	Diplom
Uni Erlangen- Nürnberg	Werkstoffwissenschaften	Diplom
Albert-Ludwigs- Universität Freiburg im Breisgau	Geowissenschaften	Bachelor
Georg-August- Universität Göttingen	Geowissenschaften	Bachelor/Master
Georg-August- Universität Göttingen	Ressourcenanalyse und -management	Master
Uni Frankfurt am Main	Geowissenschaften	Bachelor/Master
TU Bergakademie Freiberg	Geotechnik und Bergbau	Diplom
TU Bergakademie Freiberg	Verfahrenstechnik – Studienrichtung Aufbereitung	Bachelor/Master
TU Bergakademie Freiberg	Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie	Diplom

Hochschule	Studiengang	Abschluss
Martin-Luther Universität Halle- Wittenberg	Angewandte Geowissenschaften	Bachelor/Master
Uni Hannover	Geowissenschaften	Bachelor/Master
FH Hof	Systemwerkstoffe	Bachelor
FH Hof	Werkstoff- und Oberflächentechnik (entsprechend dem Studiengang Systemwerkstoffe)	Diplom
TU Ilmenau	Werkstoffwissenschaft	Diplom
FH Jena	Werkstofftechnik	Bachelor/ Master
Uni Jena	Werkstoffwissenschaft – Schwerpunkt Materialwissenschaft	Diplom
TU Karlsruhe	Angewandte Geowissenschaften	Bachelor
Uni Köln	Geowissenschaften	Bachelor (Master- studiengang in der Planung)
Uni Münster	Geowissenschaften	Bachelor/Master
TU/Uni München	Geowissenschaften	Bachelor/Master
FH Nordhausen	Umwelt- und Recyclingtechnik	Bachelor
Hochschule für Wirtschaft & Umwelt Nürtingen-Geislingen	Energie- und Recycling- Management	Bachelor
FH Osnabrück	Kunststoff- und Werkstofftechnik	Bachelor
Uni Potsdam	Geowissenschaften	Bachelor/Master
Uni Saarbrücken	Werkstoffwissenschaften	Diplom
Universität Stuttgart	Werkstoffwissenschaft	Diplom
Eberhard-Karls- Universität Tübingen	Geowissenschaften	Bachelor/Master
Uni Weimar	Werkstoffwissenschaft	Diplom

**Tabelle 12: Studienmöglichkeiten zur Thematik „Rohstoffe“. Quelle: [www.hochschulkompass.de](http://www.hochschulkompass.de).**

# Zukünftige Technologien Consulting

ist eine Beratungseinheit der VDI-Technologiezentrum GmbH in Düsseldorf.

Zukünftige Technologien Consulting (ZTC) berät Entscheider aus

- Politik / politischer Administration / Regionen  
EU - Bund - Länder - etc.
- Industrieunternehmen  
Großunternehmen - KMU - junge Unternehmen - etc.
- Verbänden / Vereinen / Organisationen  
Industrieverbände - Forschungseinrichtungen - etc.
- Finanzdienstleister  
Banken - Venture Capital Gesellschaften - etc.
- Versicherungen  
Rückversicherer - etc.

in technologischen und gesellschaftlichen Zukunftsfragen.

ZTC deckt durch ein Team verschiedenster Fachdisziplinen ein breites Themen- und Methodenspektrum ab. Systematisch und mit Unterstützung eigener Softwareinstrumente werden kundenspezifisch strategische Themen identifiziert, Ideen entwickelt sowie praxisnahe Lösungen umgesetzt.

Beispiele für Beratungsdienstleistungen sind:

- Innovations- und Technologiemonitoring
- Technologiefrüherkennung
- Newsmonitoring
- Szenarien und Prospektionen
- Studien und Innovationsanalysen
- Prozessberatungen, Prozessmoderationen
- Innovations- und Technologiemanagement
- Themengenerierung

Weitere Informationen erhalten Sie unter [www.zt-consulting.de](http://www.zt-consulting.de)

VDI

Technologiezentrum

Zukünftige Technologien Consulting (ZTC)  
VDI Technologiezentrum GmbH  
Graf-Recke-Straße 84  
40239 Düsseldorf  
Telefon: +49 (0) 211 62 14-5 72  
Telefax: +49 (0) 211 62 14-1 39  
Email: [ztc@vdi.de](mailto:ztc@vdi.de)

[www.zt-consulting.de](http://www.zt-consulting.de)