

**Schlussbericht - Kurzfassung**

2. Februar 2009

# Rohstoffe für Zukunftstechnologien

## **Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage**

Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie  
Referat III A 5 - Mineralische Rohstoffe  
I D 4 - 02 08 15 - 28/07



Bearbeitung

Fraunhofer Institut für  
System- und Innovationsforschung ISI  
Breslauer Straße 48  
76139 Karlsruhe

Institut für Zukunftsstudien  
und Technologiebewertung IZT gGmbH  
Schopenhauerstraße 26  
14129 Berlin

Dr. Gerhard Angerer  
Dr. Frank Marscheider-Weidemann  
Arne Lüllmann

Lorenz Erdmann  
Dr. Michael Scharp  
Volker Handke  
Max Marwede

Projektassistenz und Lektorat

Claudia Hertweck-Maurer, Imke Gries, Monika Silbereis, Sabine Wurst  
Fraunhofer ISI

Das Vorhaben wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi gefördert und vom Referat III A 5, Mineralische Rohstoffe und Geowissenschaften - geologische CO<sub>2</sub>-Speicherung - Fachaufsicht BGR, fachlich betreut. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Die Langfassung des Berichts ist 2009 im © Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, mit der ISBN 978-3-8167-7957-5 als Buch erschienen.

## Inhaltsverzeichnis

Problemstellung und Zielsetzung.....	1
Methodik und Vorgehensweise.....	5
Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....	9

## Abkürzungen

ATO	Antimony tin oxide (Antimon-Zinn-Oxid)
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BtL	Biomass to liquid
CCS	Carbon capture and storage
CtL	Coal to liquid (Kohleverflüssigung)
GtL	Gas to liquid
IC	Integrated circuit (Integrierter Schaltkreis)
Ir	Iridium
IR	Infrarot
ITO	Indium tin oxide (Indium-Zinn-Oxid)
LED	Light emitting diode (Leuchtdiode)
Nd	Neodym
Os	Osmium
Pd	Palladium
Pt	Platin
RFID	Radio frequency identification
Rh	Rhodium
Ru	Ruthenium
Sc	Scandium
SOFC	Solid oxide fuel cell (Festoxidbrennstoffzelle)
Ti	Titan
USGS	United States Geological Survey
WLED	White light emitting diode (weiße Leuchtdioden)
XtL	Sammelbegriff für GtL, CtL, Und BtL Verfahren
Y	Yttrium

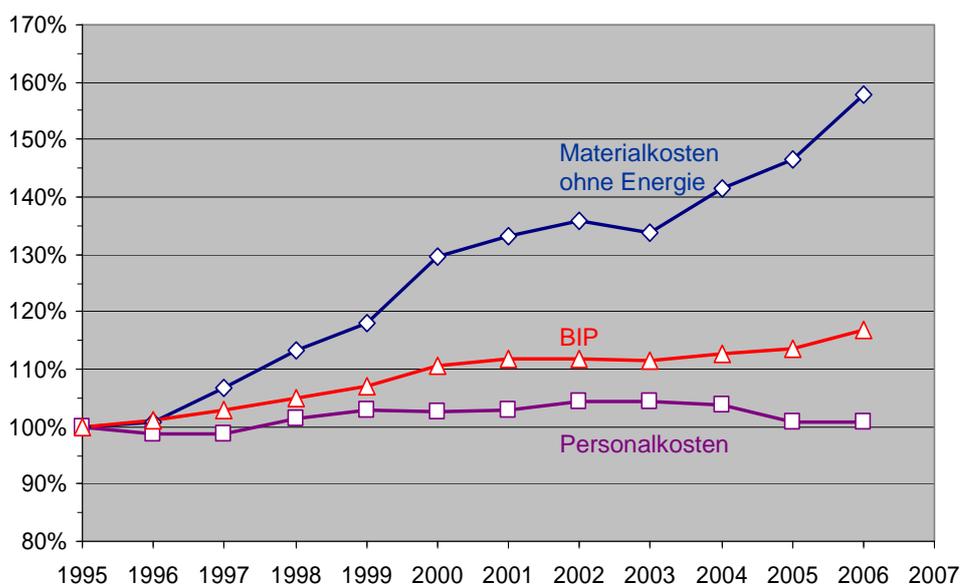


## Problemstellung und Zielsetzung

Die Industriestaaten gewinnen als Hochlohnländer im globalen Markt durch technische Innovationen Wettbewerbsvorteile. Der durch diese Tatsache ausgelöste Forschungs- und Entwicklungswettlauf erhöht die Innovationsgeschwindigkeit laufend und nachhaltig. Zugleich ist die deutsche Wirtschaft nicht nur bei Energierohstoffen, sondern auch bei Metallen beinahe vollkommen von Importen abhängig. Der Erfolg Deutschlands im Export seiner Produkte der Hoch- und Spitzentechnologie, und damit der Wohlstand der Gesellschaft, sind deshalb auf eine störungsfreie Versorgung mit Rohstoffen zu angemessenen Preisen angewiesen.

Die Lage auf den Rohstoffmärkten war in den zurückliegenden Jahren hoch turbulent. Neue Marktteilnehmer aus den Schwellenländern, allen voran China, haben für die Marktteilnehmer unerwartet starke Impulse auf die Rohstoffnachfrage ausgelöst. Die Nachfrageeffekte technischer Innovationen wurden nicht rechtzeitig erkannt und führten zu Fehleinschätzungen auf den Rohstoffmärkten. Dies ließ die Preise sprunghaft steigen. Als Folge sind die Materialkosten im deutschen Verarbeitenden Gewerbe stark gestiegen, wie Abbildung 1 zeigt. Ein Ende der Turbulenzen scheint nicht in Sicht. Mit der globalen Krise des Bankensystems sind die Rohstoffpreise stark gefallen und haben kurzfristig zu einer Entspannung auf der Preisfront geführt.

Abbildung 1: Preisbereinigte Kostenentwicklung im Verarbeitenden Gewerbe Deutschlands



Veränderungen der Rohstoffpreise treffen mit den Materialkosten den mit Abstand größten Kostenblock in der Produktion. Tabelle 1 gibt die vom Statistischen Bundesamt ermittelten Anteile am Bruttoproduktionswert des Verarbeitenden Gewerbes für das Jahr 2006 wieder.

Tabelle 1: Kostenstruktur im Verarbeitenden Gewerbe Deutschlands 2006

Kostenart	Anteil in %
Materialkosten	43,0
Energiekosten	1,8
Personalkosten, Lohnarbeiten und handwerkliche Dienstleistungen	22,7
Übrige Kosten (Einsatz von Handelsware, Steuern, Abschreibungen etc.)	32,5
Bruttoproduktionswert ohne Umsatzsteuer	100,0

Aber es sind nicht nur die Produktionskosten und Produktpreise, welche durch die Rohstoffe getrieben werden, der Rohstoffabbau, ihre Verhüttung und Weiterverarbeitung zu Werkstoffen und Vorprodukten ist auch mit Umweltlasten verbunden. Der Abbau seltener Rohstoffe, wie beispielsweise Indium, lässt ihre Ressourcen merklich schwinden und konfligiert mit dem Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung.

Vor diesem Hintergrund ist der sparsame Umgang mit Ressourcen sowohl unter Nachhaltigkeits- als auch unter Kosten- und Wettbewerbsgesichtspunkten eine Zukunftsaufgabe, deren Bedeutung dem Klimaschutz entspricht. Dieser Einsicht ist es zu verdanken, dass seit einigen Jahren ressourcen- und materialeffizientes Wirtschaften mehr und mehr Aufmerksamkeit in Politik, Wirtschaft und Wissenschaft gewinnt. Angespornt durch die Energieforschung und -entwicklung, die sich seit der ersten Ölkrise 1973 ohne Unterbrechung um die Verbesserung der Energieeffizienz bemüht, und dabei nicht für möglich gehaltene Erfolge erzielt haben, werden auch bei der Materialeffizienz epochale Fortschritte erwartet.

Materialeffizientes Wirtschaften ist auf Informationen über die außerordentlich vielfältigen Verwendungen der Rohstoffe und Werkstoffe in den Wirtschaftssektoren, den dort eingesetzten Technologien und ihren hervorgebrachten Produkten angewiesen. Das vorliegende Projekt will zum Aufbau dieses Informationspools beitragen. Seine Fragestellung ist, welche Impulse von der späteren Nutzung der heute oft noch im Entwicklungs- oder Pilotstadium befindlichen Zukunftstechnologien auf die Rohstoffnachfrage ausgehen und auf welche Rohstoffe diese Innovationen möglicherweise besonders angewiesen sind.

Zukunftstechnologien sind industriell verwertbare technische Fähigkeiten, die revolutionäre Innovationsschübe weit über die Grenzen einzelner Wirtschaftssektoren hinaus

auslösen und langfristig tiefgreifend die Wirtschaftsstrukturen, das Sozialleben und die Umwelt verändern. Innovationsschübe können Einzeltechniken betreffen, wie beispielsweise Brennstoffzellen, organische Leuchtdioden oder RFID-Labels. Es können aber auch systemische Innovationsschübe sein, die bekannte Einzeltechniken zu neuen Anwendungen verbinden. Beispiele sind das Hybridauto oder die thermochemische Produktion von synthetischen Kraftstoffen aus Biomasse. Es ist unschwer erkennbar und wurde schon eingangs erwähnt, dass der Beherrschung und Vermarktung von Zukunftstechnologien für die Wirtschaft und deren Wettbewerbsstellung in der Welt besondere Bedeutung zukommt.

Zukunftstechnologien lassen sich nicht auf 5, 10 oder 20 Innovationen eingrenzen. Vielmehr ist in allen Sektoren eine grundlegende Erneuerung der Volkswirtschaft im Gange, die von dem Ziel der industrialisierten Hochlohnländer getrieben wird, im globalen Wettbewerb durch technologische Exzellenz zu bestehen. Es war deshalb nötig, die Zahl der analysierten Technologien und der einbezogenen Rohstoffe auf ein bearbeitbares Maß zu beschränken. Die Auswahl der Rohstoffe orientiert sich an der Einschätzung ihrer Bedeutung für die Technologieentwicklung. Weil Energierohstoffe seit der ersten Ölkrise 1973 Gegenstand von Analysen sind, beschränkt sich das vorliegende Projekt auf anorganische, nicht energetisch genutzte mineralische Rohstoffe. Weil Deutschland bei den Metallen fast vollständig von Importen abhängig ist, wurden ausschließlich metallische und halbmimetallische Rohstoffe einbezogen.

Die Technologieauswahl bevorzugt Innovationen, von denen merkliche Impulse auf die Rohstoffnachfrage vermutet wurden. Durch die Begrenzung des Rohstoff und Technologieportfolios im Projekt liefern die Ergebnisse ein exemplarisches Bild der Gesamtsituation. Insofern versteht sich das Projekt als Einstieg in die spannende und relevante Fragestellung nach der Entwicklung des zukünftigen Rohstoffbedarfs.

Gelingt es den Marktteilnehmern, potenzielle Nachfrageschübe vorausschauend zu erkennen, kann dies für den Ausgleich von Angebot und Nachfrage genutzt werden und zur Beruhigung der Rohstoffmärkte beitragen. Die Projektergebnisse stellen solche Informationen zur Verfügung.



## Methodik und Vorgehensweise

Potenzielle Versorgungsrisiken gehen von vulnerablen Rohstoffen aus. Vulnerabel sind Rohstoffe, wenn sie hohe Bedeutung für die Volkswirtschaft haben, ihre Vorkommen auf wenige Länder konzentriert sind und diese in einer politisch instabilen Region liegen. Weil es in erster Linie solche Rohstoffe sind, welche die Entwicklung und industrielle Nutzung von Zukunftstechnologien hemmen könnten, stehen sie im Fokus der Aufmerksamkeit. Weitere Auswahlkriterien waren ihre vermutete funktionelle und mengenmäßige Bedeutung für die Entwicklung und spätere Nutzung von Zukunftstechnologien. Das Rohstoffportfolio des Projekts ist in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Das Rohstoffportfolio

Commodities	Spezialitäten
1. Antimon	9. Platinmetalle - Pt, Pd, Ru, Rh, Os, Ir
2. Chrom	10. Silber
3. Kobalt	11. Seltene Erden - Sc, Y, Nd
4. Kupfer	12. Selen
5. Niob	13. Indium
6. Tantal	14. Germanium
7. Titan	15. Gallium
8. Zinn	

Aus einem Portfolio von knapp hundert als rohstoffrelevant eingeschätzten Zukunftstechnologien wurden die in Tabelle 3 aufgelisteten 32 für eine vertiefende Analyse ausgewählt. Bei der Auswahl wurde auf eine ausreichende Berücksichtigung aller Hoch- und Spitzentechnologiesektoren der Wirtschaft geachtet. Auch die Verfügbarkeit von Informationen über die Technologien und ihr benötigtes Rohstoffinventar hat die Auswahl beeinflusst. Nicht rohstoffrelevante Innovationen, beispielsweise Tissue Engineering zur Züchtung von Hautlappen, Herzklappen, Nieren und anderen Organersatzteilen, sind mangels Bedarf an mineralischen Rohstoffen nicht enthalten, obwohl es sich dabei ohne Zweifel um eine Zukunftstechnologie handelt. Das gleiche gilt für innovative Browsertechnologien des Wissensmanagements.

Als Foresightmethode wurde ein Bottom-up Ansatz gewählt. Das heißt, aus einer technisch-wirtschaftlichen Innovationsanalyse wurden die spezifischen Eigenschaften der Technologie, ihr Fortschritt gegenüber dem Stand der Technik, die spezifischen Funktionen, welche die verwendeten Roh- und Werkstoffe zur Verfügung stellen, das mögliche Anwendungsspektrum und die potenziellen Märkte erschlossen. Aus dem gewonnenen Verständnis von Technologie und Markt wurden unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen, darunter die Weltwirtschaftsentwicklung, Projektionen der künf-

tigen Technologienutzung und des daraus resultierenden Rohstoffbedarfs hergeleitet. Zeithorizont des Foresights ist das Jahr 2030, Basisjahr ist 2006.

Tabelle 3: Das Portfolio analysierter Zukunftstechnologien

<b><i>Fahrzeugbau, Luft- und Raumfahrt, Verkehrstechnik</i></b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Stahlleichtbau mit Tailored Blanks</li> <li>2. Elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge</li> <li>3. Brennstoffzellen Elektrofahrzeuge</li> <li>4. Superkondensatoren für Kraftfahrzeuge</li> <li>5. Scandium-Legierungen für den Airframe Leichtbau</li> </ol>
<b><i>Informations- und Kommuni- kationstechnik, optische Technologien, Mikrotechniken</i></b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>6. Bleifreie Lote</li> <li>7. RFID – Radio Frequency Identification</li> <li>8. Indium-Zinn-Oxid (ITO) in der Displaytechnik</li> <li>9. Infrarot-Detektoren in Nachtsichtgeräten</li> <li>10. Weiße LED</li> <li>11. Glasfaserkabel</li> <li>12. Mikroelektronische Kondensatoren</li> <li>13. Hochleistungs-Mikrochips</li> </ol>
<b><i>Energie-, Elektro- und Antriebstechnik</i></b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>14. Ultraeffiziente industrielle Elektromotoren</li> <li>15. Thermoelektrische Generatoren</li> <li>16. Farbstoffsolarzellen</li> <li>17. Dünnschicht-Photovoltaik</li> <li>18. Solarthermische Kraftwerke</li> <li>19. Stationäre Brennstoffzellen – SOFC</li> <li>20. CCS – Carbon Capture and Storage</li> <li>21. Lithium-Ionen-Hochleistungs-Elektrizitätsspeicher</li> <li>22. Redox-Flow Elektrizitätsspeicher</li> <li>23. Vakuumisolation</li> </ol>
<b><i>Chemie-, Prozess-, Ferti- gungs- und Umwelttechnik, Maschinenbau</i></b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>24. Synthetische Kraftstoffe</li> <li>25. Meerwasserentsalzung</li> <li>26. Festkörper-Laser für die industrielle Fertigung</li> <li>27. Nanosilber</li> </ol>
<b><i>Medizintechnik</i></b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>28. Orthopädische Implantate</li> <li>29. Medizinische Tomographie</li> </ol>
<b><i>Werkstofftechnik</i></b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>30. Superlegierungen</li> <li>31. Hochtemperatursupraleiter in der Elektrizitätswirtschaft</li> <li>32. Hochleistungs-Permanentmagnete</li> </ol>

Die Bearbeiter sind der Ansicht, dass mit der gewählten Bottom-up Methode valide Ergebnisse erzielt werden. Das Konkurrenzverfahren, das sich nicht um ein technisch-wirtschaftliches Verständnis bemüht, sondern Zukunftsbilder ökonometrisch mit statistischen Methoden herleitet, deren Daten beispielsweise aus schriftlichen Expertenumfragen stammen, ist für die vorliegende Fragestellung weniger geeignet. Dies hat mehrere Gründe. Zum einen ist es kaum machbar, hoch komplexe technische Zusammen-

hänge in überschaubare Fragen zu gießen. Zum andern stehen für die hoch spezialisierten Technologien oft zu wenig Expertenantworten zur Verfügung, um daraus statisch zuverlässige Einschätzungen herzuleiten.

Die Bearbeiter stießen insbesondere bei der Gewinnung technologiespezifischer Rohstoffinformationen auf erhebliche Schwierigkeiten. Dies deshalb, weil die Fragestellung des Rohstoffbedarfs von technischen Innovationen als Analysegegenstand bisher keine Beachtung gefunden hat. Auch hat die Vernetzung des Know-hows der Bergbau-sektoren mit dem des Verarbeitenden Gewerbes keine Tradition. So sind die benötigten Informationen auf die Angebots- und Nachfrageseite breit gestreut. Trotz dieser Schwierigkeiten ist es gelungen, für die meisten analysierten Technologien quantitative Aussagen über ihren künftigen Rohstoffbedarf zu erarbeiten.

Die Schätzmethode für den künftigen Rohstoffbedarf wurde in (RWI, ISI, BGR 2007)<sup>1</sup> beschrieben. Es handelt sich um einen Faktoransatz, der die Einflüsse des technischen Wandels und der Wirtschaftsentwicklung separiert und es dadurch ermöglicht, die Wirkungen der beiden Treiber analytisch getrennt zu schätzen.

$$(1) \quad B = b \cdot A$$

$B$  ..... Rohstoffbedarf einer bestimmten Anwendung in t/a

$b$  ..... spezifischer Rohstoffbedarf der Anwendung (t/Einheit)

$A$  ..... Aktivitätsrate (Produktionsmenge) der Anwendung (Einheiten/a)

Mit der Einführung des spezifischen Rohstoffbedarfs wird der Rohstoffbedarf in eine dem Produktionsniveau der Anwendung proportionale Bedarfskomponente und einen zweiten Faktor zerlegt, der vom technologischen und strukturellen Wandel bestimmt wird. Letzterer bildet also alle Veränderungen des Bedarfs ab, die sich bei gleich bleibendem Produktionsniveau einstellen würden.

Die Veränderung der Aktivitätsrate (Produktion) wird durch die mittlere jährliche Wachstumsrate beschrieben:

$$(2) \quad A_{2030} = (1 + r)^{24} \cdot A_{2006}$$

$r$  ..... mittlere jährliche Wachstumsrate der Aktivität (Produktion) zwischen dem Basisjahr 2006 und dem Zeithorizont 2030 in 0,01-%/a

---

<sup>1</sup> Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI), Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. Bericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Berlin und Bonn 2007.

Daraus ergibt sich die relative Veränderung des Rohstoffbedarfs in den 24 Jahren zwischen 2006 und 2030 zu

$$(3) \quad \frac{B_{2030}}{B_{2006}} = \frac{b_{2030}}{b_{2006}} \cdot (1+r)^{24},$$

wobei der Faktor  $\frac{b_{2030}}{b_{2006}}$  die ermittelte relative Rohstoffbedarfsänderung durch den technischen Wandel und der Faktor  $(1+r)^{24}$  den Einfluss der veränderten Wirtschaftsleistung zwischen dem Basisjahr 2006 und dem Zieljahr der Projektion 2030 beschreibt.

Zukunftsprojektionen zeigen *mögliche* Entwicklungen in die Zukunft auf. Sie stützen sich auf bestimmte und explizit zu nennende Annahmen und treten ein, wenn die tatsächliche Entwicklung diesen Annahmen folgt. Die Szenariotechnik gestattet es, von unterschiedlichen Annahmen der Zukunftsentwicklung auszugehen, um so die tatsächlich eintretende Entwicklung in einen Fächer von Projektionen einzufangen. Zukunftsprojektionen dürfen nicht als Vorhersagen der tatsächlichen künftigen Entwicklung verstanden werden. Niemand kann die Zukunft im Jahr 2030 prognostizieren. Soweit die Szenariotechnik bei der Abschätzung des künftigen Rohstoffbedarfs eine Wertespanne liefert, wurde bei der Aggregation für die schlussfolgernden Aussagen mit dem aus heutiger Sicht wahrscheinlichsten Wert gerechnet.

Worin liegt der Wert von Projektionen? Sie lassen erkennen, welche Einflüsse die künftige Entwicklung treiben und zeigen den Marktteilnehmern, welche Treiber sie beobachten müssen. Marktteilnehmer sind zum einen die Rohstoffkonzerne, welche Informationen über die Nachfragemärkte für ihre strategische Kapazitätsplanung benötigen. Zum anderen die Rohstoffe verarbeitenden Industrien, die frühzeitig auf Nachfragekonkurrenzen zu anderen Sektoren, potenzielle Rohstoffknappheiten und sich abzeichnende Substitutionserfordernisse hingewiesen werden.

Für die Beschaffung von Informationen wurde die gesamte Palette von Möglichkeiten genutzt. Dies schließt Recherchen in Fachdatenbanken und die Auswertung von Fachliteratur, Internetrecherchen ein, die aufgrund ihrer hohen Aktualität und schnellen Zugänglichkeit zunehmend an Bedeutung gewinnen, Auswertung von Zukunftsmagazinen, wie Technology Review, Pictures of the Future und Fraunhofer-Magazin, die Auswertung von Marktstudien renommierter Analysten wie Frost & Sullivan und Roskill, die Auswertung von Zukunftsstudien sowie Interviews und Anfragen, mit dem spezifisches Know-how von Fachleuten in Industrie und Wissenschaft eingebunden wurde.

## Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie geht der Frage nach, welche Impulse die künftige industrielle Nutzung von Zukunftstechnologien auf die Rohstoffnachfrage auslöst und auf welche Rohstoffe solche Innovationen besonders angewiesen sind. Die Analyse von 32 Zukunftstechnologien und 22 Rohstoffen lässt profunde Rückschlüsse auf das Wechselspiel zwischen technischem Wandel und dem Rohstoffbedarf zu. Die seit Beginn dieses Jahrzehnts verstärkter zu beobachtenden Turbulenzen auf den Rohstoffmärkten haben ihre Ursache nicht, wie oft irrtümlich angenommen wird, in der Erschöpfung von Rohstoffvorkommen. Die statische Ressourcenreichweite von Chrom beträgt 600 Jahre, von Titan 280 Jahre, von Kobalt 220 Jahre, der Platinmetalle 190 Jahre, und trotzdem sind die Preise dieser Metalle hoch volatil. Die Marktturbulenzen entstanden aus einem Ungleichgewicht von Angebot und Nachfrage. Die Fehleinschätzung der Märkte geht zum einen auf die stürmische Entwicklung der chinesischen Wirtschaft und dem davon ausgelösten Boom der Rohstoffnachfrage zurück, der für viele Marktteilnehmer unerwartet kam. Zum anderen resultiert die Fehleinschätzung aus nicht rechtzeitig antizipierten technischen Entwicklungen. Ein Beispiel ist der Umstieg der Elektro- und Elektronikindustrie auf bleifreie Lote, die einen höheren Zinngehalt aufweisen. Dies hat die Zinnnachfrage und die Zinnpreise stark anziehen lassen.

### *Der Treiber technischer Wandel*

Die Analyse der von der Nutzung neuer Technologien ausgehenden Impulse auf die Rohstoffnachfrage lässt deutlich die gestaltende Kraft des technischen Wandels erkennen. Dies zeigt Tabelle 4. Sie gibt rohstoffspezifisch das Verhältnis des Rohstoffbedarfs für die analysierten Zukunftstechnologien zur heutigen gesamten Weltproduktion des jeweiligen Rohstoffs wider. Die Zahlen für 2006 zeigen, welcher Anteil der jeweiligen Weltrohstoffproduktion durch die analysierten Technologien erfasst wird. Die Zahlen für 2030 zeigen, welcher Anteil der heutigen Weltproduktion des jeweiligen Rohstoffs für diese Technologien 2030 benötigt werden wird. Sie sind ein Indikator für den Ausbaubedarf der Minenproduktion. Der Indikator erreicht bei Gallium den Faktor 6 und bei Neodym 3,8. Das heißt, der von absehbaren technischen Innovationen ausgehende Bedarf nach diesen beiden Rohstoffen wird 2030 6- bzw. 3,8-mal so hoch sein, wie deren gesamte heutige Weltproduktionsmenge. In diesen Zahlen ist die Rohstoffnachfrage aus Verwendungssegmenten außerhalb der analysierten Zukunftstechnologien nicht enthalten. Bedarfstreiber bei Gallium sind die Dünnschicht-Photovoltaik und schnelle integrierte Schaltungen. Bedarfstreiber bei Neodym sind Hochleistungs-Permanentmagnete. Der Indikator erreicht bei Indium den Faktor 3,3, bei Germanium 2,4, bei Scandium 2,3, bei Platin 1,6 und bei Tantal 1. Für Silber und Zinn beträgt er

immerhin noch jeweils 0,8, bei Kobalt 0,4 und bei Palladium und Titan jeweils 0,3 und bei Kupfer gut 0,2. Aufgrund der hier erkennbaren Dominanz des technischen Wandels auf die Rohstoffnachfrage sind dies zugleich jene Rohstoffe des Projektportfolios, die für die künftige Technologieentwicklung und ihre Nutzung in marktfähigen Produkten besonders wichtig sind.

Tabelle 4: Globaler Rohstoffbedarf für die analysierten Zukunftstechnologien im Jahr 2006 und 2030 im Verhältnis zur gesamten heutigen Weltproduktionsmenge des jeweiligen Rohstoffs

Rohstoff	2006	2030	Zukunftstechnologien (Auswahl)
Gallium	0,28	6,09	Dünnschicht-Photovoltaik, IC, WLED
Neodym	0,55	3,82	Permanentmagnete, Lasertechnik
Indium	0,40	3,29	Displays, Dünnschicht-Photovoltaik
Germanium	0,31	2,44	Glasfaserkabel, IR optische Technologien
Scandium	gering	2,28	SOFC Brennstoffzellen, Al-Legierungselement
Platin	gering	1,56	Brennstoffzellen, Katalyse
Tantal	0,39	1,01	Mikrokondensatoren, Medizintechnik
Silber	0,26	0,78	RFID, Bleifreie Weichlote
Zinn	0,62	0,77	Bleifreie Weichlote, transparente Elektroden
Kobalt	0,19	0,40	Lithium-Ionen-Akku, XtL
Palladium	0,10	0,34	Katalyse, Meerwasserentsalzung
Titan	0,08	0,29	Meerwasserentsalzung, Implantate
Kupfer	0,09	0,24	Effiziente Elektromotoren, RFID
Selen	gering	0,11	Dünnschicht-Photovoltaik, Legierungselement
Niob	0,01	0,03	Mikrokondensatoren, Ferrolegierung
Ruthenium	0	0,03	Farbstoffsolarzellen, Ti-Legierungselement
Yttrium	gering	0,01	Hochtemperatursupraleitung, Lasertechnik
Antimon	gering	gering	ATO, Mikrokondensatoren
Chrom	gering	gering	Meerwasserentsalzung, marine Techniken

Dagegen stehen technische Innovationen, die nur marginale Auswirkungen auf die künftige Rohstoffnachfrage entfalten. So ist beispielsweise die Herstellung von orthopädischen Implantaten ein stark wachsender Markt in einer alternden Gesellschaft. Davon gehen jedoch keine nennenswerten Nachfrageimpulse nach Rohstoffen aus. Auch die Zukunftstechnologie Farbstoffsolarzelle wirkt sich kaum auf die Rohstoffnachfrage aus. Zu wissen, von welchen Innovationen und aus welchen Marktsegmenten die Nachfrage bestimmter Rohstoffe getriggert wird, sind strategische Informationen für die

Rohstoffkonzerne. Sie bilden die Grundlage einer vorausschauenden Anpassung der Produktionskapazitäten an die Nachfrage des Markts.

### *Der Treiber Weltwirtschaft*

Vor allem China hat das Wachstum der Weltwirtschaft von einem moderaten Durchschnitt von 3,8 % pro Jahr in den zurückliegenden zwanzig Jahren auf 5 % pro Jahr seit 2004 hochschnellen lassen. Wenn es gelingen soll, Angebot und Nachfrage im Gleichgewicht zu halten, dann muss als zweiter Faktor neben dem technischen Wandel auch die Entwicklung der Weltwirtschaft im Auge behalten und antizipiert werden. Das zurzeit herrschende Wohlstandsgefälle zwischen Regionen der Welt ist nicht zukunftsfähig. Afrika, beispielsweise, trägt mit einer Milliarde Menschen kaum 1,6 % zum globalen Inlandsprodukt bei. Es ist keine konfliktfreie Zukunft vorstellbar, in der die entwickelten Regionen ihren Wohlstand stetig mehren, während die armen Regionen auf ihrem Niveau verharren. Das wirtschaftliche Aufholen der weniger entwickelten Regionen ist Voraussetzung für eine friedliche Zukunft und liegt im Interesse aller Nationen der Welt. Der Ausgleich des Wohlstandsgefälles in einer angemessenen Zeitspanne wird zwangsläufig das Weltwirtschaftswachstum über das langfristige Mittel der Vergangenheit steigen lassen. Aber selbst, wenn nur eine künftige jährliche Wachstumsrate von 3,8 % zugrunde gelegt wird, erreicht die Weltwirtschaftsleistung im Jahre 2030 das 2,4-fache von 2006. Von diesem Wachstum werden ohne Zweifel starke Impulse auf den zukünftigen Bedarf nach Rohstoffen ausgehen.

Welches der dominierende Treiber der Nachfrage ist, lässt sich nicht generell beantworten, sondern hängt vom spezifischen Rohstoff ab. Commodities, das sind in großen Mengen hergestellte Massenrohstoffe mit breitem Verwendungsspektrum wie Eisen, Stahl, Kupfer und Chrom, scheinen eher vom Weltwirtschaftswachstum getrieben zu werden. Für Spezialitäten, wie Gallium, Neodym, Indium, Germanium und Scandium, dürfte eher die technologische Entwicklung bedarfsbestimmend sein. Bei den Platinmetallen, Tantal, Silber, Titan und Kobalt wirken beide Treiber dominant.

### *Das Spiel von Nachfrage und Angebot*

Ist angesichts der absehbaren Nachfragesteigerung überhaupt eine sichere Rohstoffversorgung vorstellbar? Grundsätzlich schon. Je nach Komplexität der Technologie vergehen 5, 10 und mehr Jahre, bis eine neue Technik aus dem Forschungs- und Entwicklungsstadium in die breite Anwendung gelangt. Toyota hat als Pionier in der Hybridtechnologie des Fahrzeugbaus einen Entwicklungsvorsprung von mindestens 5 Jahren. Dies, obwohl die Herausforderung hier "nur" darin besteht, bekannte Komponenten, nämlich Verbrennungsmotor und Elektromotor, zu einem System zu integrieren. Die Entwicklungsanstrengungen der Industrie, Brennstoffzellen praktisch nutzbar zu

machen, lassen sich bis in die sechziger Jahre zurückverfolgen. Der Beherrschung der Energiegewinnung aus der Kernfusion und die Bereitstellung eines funktionierenden Fusionskraftwerks dürfte nahezu ein Jahrhundert benötigen. Die Zeitspanne für die Umsetzung von Bergbauprojekten, in der Branche als "Lead Time" bezeichnet, beträgt fünf bis zehn Jahre. Den Rohstoffkonzernen steht also ausreichend Anpassungszeit zur Verfügung, dem technischen Wandel zu folgen. Technische Entwicklungen rechtzeitig zu erkennen und ihre Richtung und Stärke sicher einzuschätzen, ist allerdings nicht trivial. Hier kann ein regelmäßiger Informationsaustausch zwischen den Rohstoffkonzernen und den ihre Rohstoffe verarbeitenden Industrien helfen, realistische Zukunftsbilder zu erarbeiten.

Zu den Besonderheiten der Gewinnung metallischer Rohstoffe gehört häufig ihr vergesellschaftetes Vorkommen in Erzen. Steigt der Bedarf nach einem Metall stark an, so ändert sich das gesamte Wertschöpfungs- und Preisgefüge von Haupt-, Kuppel- und Nebenprodukten. Vergesellschaftet kommen beispielsweise die für die Technologieentwicklung wichtigen Metalle der Seltenen Erden vor, darunter Scandium und Neodym. Indium, ein extrem knapper Rohstoff, wird als Koppelprodukt von Zink gewonnen. Die Schließung der japanischen Zinkhütte Toyoha im Jahre 2006 verringerte das Indiumangebot deutlich, mit entsprechenden Preisreaktionen.

Auf den Rohstoffmärkten agieren nicht nur die Marktteilnehmer der Realwirtschaft, die Märkte sind auch Ziel von Spekulationsgeschäften. Welche Rolle letztere bei der Preisbildung spielen, ist offen. Hier besteht wie bei den Energierohstoffen Analyse- und möglicherweise auch Regulierungsbedarf. Dominante, Preis treibende Spekulationsgeschäfte würden einen gesellschaftspolitisch unerwünschten Wohlstandstransfer herbeiführen, weil die Konsumenten mehr für Rohstoffe aufwenden müssen, als ihrem realen Gegenwert entspricht.

#### *Die Vulnerabilität des Rohstoffe verarbeitenden Gewerbes*

Die Rohstoffversorgung muss als vulnerables System verstanden werden. Sie ist global hoch vernetzt und dadurch vielfältigen Einflüssen ausgesetzt, die von einzelstaatlichen Politiken nur beschränkt gesteuert werden können. Dabei dürften Marktstörungen weniger in einem Stopp der Rohstoffzufuhr zu sehen sein, sondern eher in Lieferverzögerungen, in Konzentrationsbewegungen globaler Konzerne, die Marktmacht erzeugen und den Wettbewerb aushebeln, in der Instabilität von Förderländern, die schlagartig die Minenproduktion lahmlegt, weil der gesellschaftliche Konsens hoch fragil ist (Coltan Krise, südafrikanisches Chrom). Marktstörungen entstehen auch, wenn unvorhergesehene Prosperität in Schwellen- und Entwicklungsländern die Nachfrage puscht

(China, Indien, Brasilien) oder revolutionäre Technologieschübe Bedarfsspitzen oder -einbrüche verursachen.

Die Empfindlichkeit der Rohstoffe verbrauchenden Wirtschaftssektoren ist dort besonders groß, wo die Möglichkeit fehlt, knappe und teure Rohstoffe zu substituieren. Nicht substituierbar ist beispielsweise Chrom in rostfreien Stählen, Kobalt in verschleißfesten Legierungen, Scandium in schlagfesten Aluminium-Scandium-Legierungen, Silber in gedruckten RFID-Labels, Indium in transparenten Indium-Zinn-Oxid-Elektroden für Displays, Neodym in starken Permanentmagneten und Germanium in Linsen der Infraroptik. Zwischen den Wirtschaftssektoren bestehen zugleich Nachfragekonkurrenzen um Rohstoffe. So wird Tantal für die Herstellung miniaturisierter Kondensatoren in elektronischen Schaltungen, als Ferrolegierung für die Stahlveredelung und als hoch biokompatibles Metall für Stifte, Drähte und Schrauben in der Chirurgie benötigt. Platin ist in der Katalyse der Chemietechnik, in Abgaskatalysatoren für Kraftfahrzeuge, in Brennstoffzellen und in vielen anderen Anwendungen unverzichtbar. Silber wird in nanoskaliger Form als Biozid genutzt, ist Bestandteil von Weichloten und wird für hochwertige Verspiegelungen eingesetzt, beispielsweise für hocheffiziente solarthermische Rinnenkollektoren. Kobalt bedient zum einen die vielfältigen und stark wachsenden Anwendungen der Lithium-Ionen-Technik, wird als Katalysator in der Fischer-Tropsch-Synthese genutzt, beispielsweise bei der Kraftstoffsynthese, und ist essenzieller Bestandteil hoch verschleißfester Bauteile in Fahrzeugbau, Maschinenbau und Medizintechnik.

Die starke Vernetzung und Verästelung der Rohstoffnutzungen in den Wirtschaftssektoren wurde bisher nicht ansatzweise systematisch untersucht. Zu den offenen Fragen zählen unter anderem

- ▶ die vollständige Identifikation essenzieller Rohstoffe, also Verwendungen, in denen bestimmte Rohstoffe nicht substituierbar sind,
- ▶ das Potenzial systemischer Innovationen, die Verwendungen von nicht substituierbaren Rohstoffen ersetzen. Beispielsweise faserverstärkte Kunststoffe anstelle von rostfreien Stählen, die essenziell auf Chrom angewiesen sind,
- ▶ bestehende Substitutionspotenziale bei nicht essenziellen Rohstoffnutzungen und Kosten ihrer Erschließung,
- ▶ vorhandene Effizienzpotenziale beim Materialeinsatz, beispielsweise durch Miniaturisierung und die Nachahmung bionischer Konstruktionsprinzipien,
- ▶ die Möglichkeiten der Nutzung nachwachsender Rohstoffe, sowie
- ▶ ungenutzte Recyclingpotenziale und Kosten ihrer Erschließung.

Erst solche Informationen machen eine Einschätzung der Vulnerabilität der Wirtschaftssektoren und die vorsorgliche Entwicklung von Ausweichstrategien möglich. Von besonderem Interesse einer nationalen Analyse sind dabei die Schlüsselsektoren der deutschen Wirtschaft, das sind der Fahrzeugbau, der Maschinenbau, die Chemietechnik und die Medizintechnik.

#### *Leistungsfähige Recyclingtechniken für High-tech Materialverbünde*

Materialverbünde gewinnen mehr und mehr an Bedeutung. Sei es um die Leistungsfähigkeit von Bauteilen zu steigern (Milchverbundkarton), Gewicht einzusparen (Tailored Blanks), sie zu miniaturisieren (integrierte Schaltkreise), spezifische Stoffeigenschaften einzustellen (Hybridpolymere, ORMOCER®) oder aus anderen Gründen. Die Trennung hoch komplexer Materialverbünde, wie sie beispielsweise in integrierten Schaltkreisen realisiert sind, und die Rückgewinnung der enthaltenen Wertstoffe stellt höchste Anforderungen an die Recyclingtechnik, die gegenwärtig aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen oft noch nicht erreicht werden. Hier gilt es, leistungsfähige Recyclingtechniken bereit zu stellen, die kosteneffizient Sekundärrohstoffe in der Qualität von Primärrohstoffen gewinnen. Sekundärrohstoffe sind bei den Metallen die einzige nennenswerte heimische Rohstoffquelle Deutschlands.

#### *Der Bau transnationaler Institutionen*

Für die Bearbeiter dieser Untersuchung stellte die Beschaffung von Informationen und valider quantitativer Daten über die Rohstoffverwendungen eine besondere Herausforderung dar. Die Informationen über Rohstoffe *und* ihre Verwendungen sind breit verstreut und den Marktteilnehmern nur mit erheblichem Aufwand zugänglich. Hier könnte eine transnationale Institution die Märkte beobachten und den Bergbaukonzernen *und* den Rohstoffe verarbeitenden Industrien verdichtete Informationen zur Verfügung stellen. Eine solche Institution sollte, stärker als im United States Geographical Survey (USGS), welche die derzeit besten öffentlich zugänglichen Rohstoffdaten und -analysen bereitstellt, neben der Bergbaukompetenz auch Know-how über die Rohstoffverwendungen, ihre Industrien und Technologien unter einem Dach vereinen. Dies wäre zugleich eine Institution, die Round-Table-Gespräche zwischen Bergbaukonzernen und den Rohstoffe verarbeitenden Industrien organisieren und moderieren könnte. Informationsaustausch zwischen den Wirtschaftssektoren ist geeignet, eine bessere Abstimmung von Rohstoffangebot und -nachfrage herbeizuführen und die Rohstoffmärkte zu beruhigen.

*Der Nutzen technisch fundierter Marktanalysen*

Aufgabe der vorliegenden Studie war es, den künftigen Rohstoffbedarf, der von der Nutzung technischer Innovationen ausgeht, anhand ausgewählter Zukunftstechnologien exemplarisch zu beleuchten. Dabei war es nötig, die Zahl der einbezogenen Rohstoffe und Technologien auf ein bearbeitbares Maß zu begrenzen. Es war nicht Aufgabe der Studie, den zukünftigen Gesamtbedarf an bestimmten Rohstoffen aus allen Verwendungen zu ermitteln. Letztlich bestimmt der Gesamtbedarf über den notwendigen künftigen Ausbau der Produktionskapazitäten durch die Rohstoffkonzerne. Rohstoffspezifische, technisch fundierte Gesamtübersichten, die mit den Stakeholdern konsistente Szenarien entwerfen, verbleiben eine Aufgabe für die Zukunft.

*Die Wegweisung fundamentaler Marktdaten*

Niemand kann die künftige Entwicklung der Rohstoffmärkte prognostizieren. Die eingehende Analyse ihrer Treiber und die Herausarbeitung der fundamentalen Marktdaten erlauben es jedoch, mögliche zukünftige Entwicklungen einzugrenzen und sich vorsorglich auf sie einzustellen. Die in der vorliegenden Untersuchung erarbeiteten fundamentalen Marktdaten zeigen deutlich in die Richtung einer insgesamt steigenden Rohstoffnachfrage. Der im Zuge der globalen Finanzkrise eingetretene Preisrückgang bei den Rohstoffen sollte die Anstrengungen, die Rohstoffabhängigkeit zu reduzieren, nicht in Frage stellen.

Den Unternehmen wird empfohlen, die technologische und weltwirtschaftliche Entwicklung ständig zu beobachten und rechtzeitig vorsorgende Maßnahmen der Rohstoffsicherung zu ergreifen. Die vorliegende Studie möchte zur Methodik und Vorgehensweise der Marktbeobachtung Anregungen liefern.