

TEXTE

22/2011

Rohstoffkonflikte nachhaltig vermeiden

Rohstoffe zwischen Angebot und Nachfrage
(Teilbericht 2)

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 205 74 251
UBA-FB 001478/2

Rohstoffkonflikte nachhaltig vermeiden

Rohstoffe zwischen Angebot und Nachfrage (Teilbericht 2)

von

Nikolaus Supersberger
Michael Ritthoff
Raimund Bleischwitz
Wuppertal Institut, Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter <http://www.uba.de/uba-info-medien/4099.html> verfügbar. Hier finden Sie auch weitere Teilberichte des Forschungsprojektes.

Die in der Studie geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Durchführung der Studie:	Adelphi Caspar-Theyss-Strasse 14a 14193 Berlin	Wuppertal Institut Döppersberg 19 42103 Wuppertal
Abschlussdatum:	September 2010	
Herausgeber:	Umweltbundesamt Postfach 14 06 06813 Dessau-Roßlau Tel.: 0340/2103-0 Telefax: 0340/2103 2285 E-Mail: info@umweltbundesamt.de Internet: http://www.umweltbundesamt.de http://fuer-mensch-und-umwelt.de/	
Redaktion:	Fachgebiet I 1.2 Internationaler Umweltschutz, Internationale Nachhaltigkeitsstrategien, Deutsche Anlaufstelle Europäische Umweltagentur Hans-Joachim Hermann	

Dessau-Roßlau, April 2011

Inhalt

1 Einleitung	003
2 Energetische Rohstoffe	004
2.1 Reservoirsituation und mögliches Fördermaximum von Erdöl	004
2.2 Reservoirsituation und mögliches Fördermaximum von Erdgas	006
2.3 Verfügbarkeit von Erdöl und Erdgas: politische und ökonomische Faktoren	006
2.4 Regionale Muster von Knappheit: spezifizierbare Knappheiten und deren Auswirkungen auf Deutschland	008
2.4.1 Erdöl	008
2.4.2 Erdgas	011
2.4.3 Kohle	013
2.4.4 Kernbrennstoffe	013
3 Fazit energetischer Rohstoffe	017
4 Nicht-energetische Rohstoffe	019
4.1 Die Rohstoffbasis metallischer Rohstoffe	019
4.1.1 Eisen und Stahl	020
4.1.2 Chrom	023
4.1.3 Nickel	024
4.1.4 Kobalt	025
4.1.5 Aluminium	026
4.1.6 Magnesium	027
4.1.7 Kupfer	029
4.1.8 Platin und Platinmetalle (Ru, Os, Rh, Ir, Pd, Pt)	030
4.1.9 Industriemineralien	031
4.1.10 Borsalze	031
4.1.11 Phosphat	032
4.1.12 Zirkoniumoxid und Zirkonium	034
5 Fazit für nicht-energetische Rohstoffe	035
6 Literaturverzeichnis	042

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Menge an Erdöl, das nach Reference Scenario bis 2030 produziert werden müsste, um die Nachfrage zu decken, und das aus Ölfeldern stammt, die bisher noch nicht entdeckt sind	005
Abbildung 2: Verteilung von Erdölverbrauch und Erdölreserven im Jahr 2000	09
Abbildung 3: Uranproduzenten und Verbraucher 2007, geschätzte Werte	016
Abbildung 4: Entwicklung der globalen Produktionsmengen von Stahl und Eisen	021
Abbildung 5: Entwicklung des Eisengehalts in Eisenerzen in Deutschland	022
Abbildung 6: Index der Produktion von Stahl, Nickel und Chrom	023
Abbildung 7: Preisentwicklung bei Nickel	024
Abbildung 8: Entwicklung der globalen Produktionsmengen von Aluminium	027
Abbildung 9: Entwicklung der globalen Produktionsmengen von Magnesium	028
Abbildung 10: Entwicklung der globalen Produktionsmengen von Kupfer	029
Abbildung 11: Preisentwicklung bei Kupfer	030
Abbildung 12: Entwicklung der globalen Produktionsmengen von Bor	031
Abbildung 13: Entwicklung der globalen Produktionsmengen von Phosphat	032
Abbildung 14: Entwicklung der globalen Produktionsmengen von Zirkonium	034
Tabelle 1: Zusammenfassende Bewertung der analysierten Aspekte von energetischen und nicht-energetischen Rohstoffen	036

Abkürzungsverzeichnis

BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
EU	Europäische Union
UN	United Nations
USA	United States of America

1 Einleitung

Sowohl im Bereich energetischer als auch nicht-energetischer Rohstoffe stieg die Nachfrage in den vergangenen Jahrzehnten kontinuierlich an. Gerade in den letzten Jahren kam daher die Diskussion auf, ob nicht in absehbarer Zeit strukturelle Versorgungs- bzw. Verfügbarkeitsengpässe entstehen könnten. Dies wird sehr kontrovers diskutiert, wobei die Positionen vor allem im Bereich Erdöl sehr stark schwanken. Im folgenden Kapitel wird eine Analyse hinsichtlich der Versorgungssituation energetischer wie nicht-energetischer Rohstoffe vorgenommen. Diskutiert werden Erdöl, Erdgas, Kohle sowie Kernbrennstoffe einerseits und Eisen und Stahl, Chrom, Nickel, Kobalt, Aluminium, Magnesium, Kupfer, Platin und Platinmetalle, Industriemineralien, Borsalze, Phosphat sowie Zirkonium und Zirkoniumdioxid andererseits.

Von Bedeutung ist hier die Diskussion regionaler Verfügbarkeitsmuster, um möglicher Versorgungsrisiken und damit zusammenhängende Rohstoffkonflikte regional eingrenzen und hinsichtlich ihres Konfliktpotenzials abschätzen zu können.

2 Energetische Rohstoffe

2.1 Reservensituation und mögliches Fördermaximum von Erdöl

Der Ölverbrauch stieg in den vergangenen Jahren beständig an. Im Jahr 2007 erreichte er daher einen Höchstwert mit 85,2 Millionen Barrel pro Tag (mbpd). Die Produktion von Rohöl lag indessen nur bei knapp 82 mbpd. Der Rest wurde über Biomasse, Teersande und Kohle bereitgestellt (Biokraftstoffe, verflüssigte Kohle), außerdem sind hierin auch sogenannte processing gains enthalten, also Beimischungen und Reaktanden im Raffinerieprozess, z. B. Wasserstoff (BP 2008).

Die Größe der angenommenen gesamt verfügbaren Mengen von Erdöl variiert stark. Dies hat Folgen für die Annahme des sogenannten Peak Oil, also dem Punkt der maximal möglichen Ölproduktion.

Der United States Geological Survey (kurz USGS) geht von einer sehr großen Rohstoffbasis aus: insgesamt lagern nach dessen Aussagen „weit über 2000 Gb“ (Gb=Gigabarrel) in der Erdkruste. Ein wichtiger Faktor ist laut USGS die Nordpolarregion, unter deren Eis sie 134 Gb an Öl vermutet (Daten aus Bukold 2009). Die Internationale Energieagentur (IEA) ist in der Vergangenheit bei ihren Aussagen über Rohstoffmengen dem USGS gefolgt. Die Daten des USGS sind gemeinsam mit einigen wenigen anderen als oberer Wert zu betrachten.

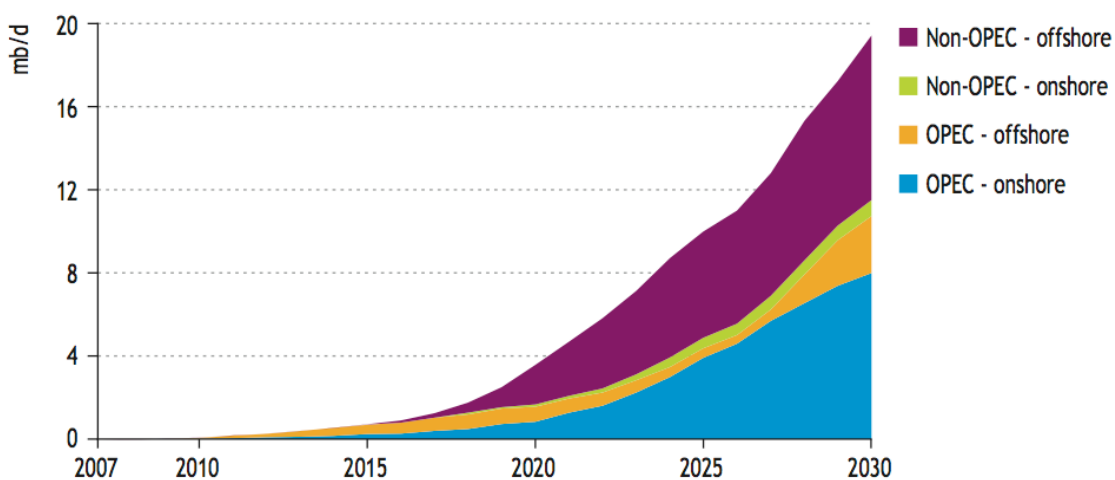
BP nennt für das Jahr 2007 Gesamtreserven in Höhe von 1390 Gb (BP 2008). Die deutsche Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) gibt in ihren jährlichen Kurzstudien eine Einschätzung zur Verfügbarkeit von Rohstoffen. Demnach sind noch 246 Mrd. t Rohöl förderbar (entspricht bei einer Umrechnung von 7,3 Barrel Öl pro Tonne etwa 1800 Gb). Eine pessimistische Haltung bezüglich der Menge an noch förderbaren Ölvorkommen vertreten die Association for the Study of Peak Oil & Gas (kurz ASPO) sowie die Energy Watch Group (EWG). ASPO geht von einer noch förderbaren Ölmenge in Höhe von 1320 Gb aus. Die OPEC nennt als gesamt förderbare Menge an konventionellem Erdöl 1200 Gb. Hierin sind nur konventionelle Öle enthalten, keine Kondensate, Schwer- und Schwerstöle sowie Teersande. Eine unmittelbare Vergleichbarkeit mit anderen Quellen ist daher nicht gegeben (OPEC 2008).¹

¹ Die Größe der Reserven ist abhängig vom Rohstoffpreis und Technologie, ist also zeitlich variabel. Die BGR und andere Experten weisen immer wieder darauf hin, dass die Reserven bzw. die statische Reichweite keine unmittelbaren Rückschlüsse auf die (absolute) Verfügbarkeit von Rohstoffen zulassen. Beim konventionellen Erdöl können Reserven, Ressourcen und Geopotential so abgeschätzt werden, dass mit Hilfe einer extrapolierten logistischen Förderkurve das „estimated ultimate recovery“ (EUR) quantifiziert werden kann. Trotzdem verbleiben Unsicherheiten; vgl. Wellmer (2008). Zudem sind die Definitionen der US-amerikanischen „Reserve Base“ und der deutschen „Reserven“ nicht identisch und daher nicht unmittelbar miteinander vergleichbar.

Das Peak Oil sieht ASPO bereits im Jahr 2008 erreicht (ASPO 2008). EWG stimmt in seinen Aussagen mit diesem frühen Zeitpunkt überein und nennt 2006 als Datum des fossilen Peak Oil (EWG 2008). Die BGR spricht von einem Peak Oil in den kommenden zehn bis zwanzig Jahren. Andere Autoren und Institutionen sehen Peak Oil nach 2030, meist ohne Angabe einer Zieldekade, wodurch ein Peak-Ereignis insgesamt relativiert wird. Das Eintreten von Peak Oil außerhalb der OPEC-„Region“ wird von vielen Autoren um das Jahr 2005 gesehen (Bukold 2009). Ein globaler Förderhöhepunkt wird vom USGS nicht thematisiert. Auch BP thematisiert ein Peak Oil nicht quantitativ.

Die IEA äußert sich in ihrem World Energy Outlook 2008 besorgt über den weiteren Ausbau der Ölproduktion (IEA 2008). Sie räumt ein, dass die Produktion der heute in Betrieb befindlichen Ölfelder um über fünf Prozent pro Jahr zurückgeht. Das bedeutet, dass hohe Investitionen anfallen, nur um die derzeitige Produktionsmenge zu halten. Zusätzlich steigt der Ölbedarf weiter an. Die Projektion der IEA sieht eine Ölproduktion im Jahr 2030 in Höhe von 104 mbpd als notwendig für die Befriedigung der Nachfrage an. 2007 wurden 82 mbpd produziert. Um die zusätzlichen 22 mbpd auf die Märkte zu bringen, müssten insgesamt 64 mbpd an neuer Produktion hinzukommen, da die Produktion ja im selben Zeitraum um 42 mbpd sinkt. Außerdem müsste der Anteil nicht-konventioneller Ölsorten stark erhöht werden – Teersande und Schwerstöle z. B. – die bereits heute starke Umweltverschmutzungen hervorrufen. Ein weiterer kritischer Punkt ist, dass etwa ein Fünftel des 2030 produzierten Öls aus Quellen kommen müsste, die heute noch gar nicht entdeckt sind (vgl. Abbildung 1). Vergleicht man dies mit den (geringen) Neuentdeckungen der vergangenen Jahre, kommen starke Zweifel, ob eine solche Produktionsleistung überhaupt erbracht werden kann.

Abbildung 1: Menge an Erdöl, das nach Reference Scenario bis 2030 produziert werden müsste, um die Nachfrage zu decken, und das aus Ölfeldern stammt, die bisher noch nicht entdeckt sind



Quelle: IEA 2008.

Gesamtinvestitionen in Höhe von 5 Billionen US\$ zwischen 2007 und 2030 allein in den Upstream-Bereich wären laut IEA notwendig, um das entsprechende Produktionsprofil zu erreichen. Die zusätzlichen Investitionen in die sogenannte Downstream-Infrastruktur (Pipelines, Raffinerien etc.) sind hierbei noch unberücksichtigt. Daher sind Zweifel an einer reibungslos ausreichenden Ölversorgung in den kommenden Jahrzehnten angebracht.

In der Ölindustrie liegen derzeit verschiedene Hemmnisse einer weiteren Steigerung der Produktion vor: die Investitionskosten sind in den vergangenen vier bis sechs Jahren um 90 Prozent angestiegen, der Grund ist der Mangel an Fachpersonal und Ausrüstung.

2.2 Reservesituation und mögliches Fördermaximum von Erdgas

Das Verbrauchswachstum im Erdgasbereich ist deutlich höher als bei Erdöl. Im Jahr 2007 wurden 2,92 Billionen Kubikmeter (bm3) produziert, was einer Steigerung des Verbrauchs im Vergleich zum Vorjahr um 3,1 Prozent entspricht (BP 2008). Der starke Verbrauchsanstieg ist auf den verstärkten Einsatz von Erdgas im Stromsektor aufgrund der günstigeren Klimabilanz im Vergleich zu Kohle zurückzuführen.

BP gibt die global förderbare Menge an Erdgas mit 177 Billionen m3 an (BP 2008), in den Staaten der OPEC lagern davon ca. 40 Prozent. Russland ist der dominierende Reservenbesitzer mit 30 Prozent der globalen Reserven, gefolgt von Iran und Oman mit jeweils etwa 15 Prozent. Bezüglich der Reservengrößen herrscht wenig Diskrepanz unter verschiedenen Institutionen.

Ein Peak Gas wird nur wenig thematisiert. Bei einer Fortschreibung der historischen hohen Verbrauchsdynamik (stark steigender Erdgasbedarf) würde ein Produktionsmaximum etwa 20 Jahre nach Peak Oil erreicht (EWG 2007).

2.3 Verfügbarkeit von Erdöl und Erdgas: politische und ökonomische Faktoren

Neben der strukturellen geologischen Verfügbarkeit von Erdöl und Erdgas (Vorhandensein sowie Produzierbarkeit aus verschiedenen Gesteinstypen) nehmen zumindest kurz- bis mittelfristig auch politische Faktoren Einfluss auf die Verfügbarkeit von Erdöl.

Abhängig vom erwarteten Ölpreis verändern sich die unternehmensinternen Kalkulationen von Investitionen in neue Förderkapazitäten. In Zeiten niedriger Ölpreise nimmt die Investitionsbereitschaft ab, was mittelfristig zu investitionsbedingten Verfügbarkeitsengpässen führen kann. Entsprechend steigen dann die Preise, wenn die Nachfrage unerwartet ansteigt und die notwendigen Produktionskapazitäten fehlen, um diese Nachfrage entsprechend bedienen zu können. In ihrem aktuellen World Energy Outlook warnt die IEA vor einer solchen Situation in den kommenden wenigen Jahren (s. oben). Der vorübergehende Einbruch des Ölpreises im Zuge der Finanzkrise (Höchststand Mitte 2008 bei ca. 145 US\$/b) hat zur Zurückstellung zahlreicher Förderprojekte geführt.

Des Weiteren spielen politische Faktoren eine Rolle. Einerseits versucht die OPEC auf den Ölpreis Einfluss zu nehmen und steigert bzw. senkt die Produktion (teilweise entsprechend der erwarteten Nachfrage, was jedoch nur sehr grob möglich ist). Dadurch sollen temporäre Knappheiten bzw. Überangebote erzeugt werden (Vgl. Supersberger/Fischedick (2009)).² Andererseits werden die Verhängung von Embargos und freiwillige Liefereinschränkungen als politische Druckmittel benutzt. Gezielte Lieferbegrenzungen waren z. B. die Unterbrechungen der Erdgasversorgung der Ukraine durch Russland an der Jahreswende 2005/2006 und 2008/2009. Aufgrund von Unstimmigkeiten bei der Preisgestaltung des abzunehmenden Erdgases entschloss sich Russland, der Ukraine vorübergehend kein Erdgas mehr zu liefern. Die konkreten Gründe für den Lieferstopp sind so zwar auf konkrete wirtschaftliche Auseinandersetzungen zurückzuführen. Jedoch wurde das Verhalten Russlands sehr stark politisch interpretiert: 2005/2006 wurde der Lieferstopp mit dem Regierungswechsel in der Ukraine in Verbindung gebracht (Regierungsübernahme durch ein pro-westliches Parteienbündnis).

Zwischenstaatliches Verhalten ist immer in einen Gesamtzusammenhang zu stellen. Im Projekt wird im Rahmen der Fallstudie Nabucco-Pipeline hierauf näher eingegangen.

Das Verhalten einzelner zentraler Akteure beeinflusst die Gewährleistung von Energiesicherheit sehr stark. Der Begriff Energiesicherheit ist jedoch weiter gefasst und enthält die Gesamtheit geologischer, ökonomischer und politischer Einflussfaktoren auf die Verfügbarkeit von Energie. Sinkende Energiesicherheit wird inzwischen vielfach als Problem nationaler Sicherheit wahrgenommen und direkt in Verbindung mit der Entstehung von Konflikten unterschiedlicher Qualitäten gebracht.³ Potentiell wirken die folgenden Faktoren mindernd auf Energiesicherheit:

- sinkendes Gesamtangebot von Energieträgern bei gleichzeitig strukturell steigender Nachfrage;
- Reduzierung der Anzahl an Lieferanten, wodurch ein Oligopolmarkt entsteht;
- generell starke Asymmetrie von Abhängigkeiten zwischen Anbietern und Nachfragern;
- geringe Substituierbarkeit von knappen essentiellen Energieträgern (oder nicht-energetischen Rohstoffen).

² Allerdings sollte die Bedeutung der OPEC in dieser Hinsicht nicht überschätzt werden.

³ Der Begriff Energiesicherheit sowie dessen Implikationen im Bereich fossiler Energieträger bezüglich der Versorgung der Bundesrepublik Deutschland wurde ausführlich im Rahmen des Projekts Sicherheitspolitische Bedeutung erneuerbarer Energien im Auftrag des BMU analysiert (adelphi Consult, Wuppertal Institut 2007).

2.4 Regionale Muster von Knappheit: spezifizierbare Knappheiten und deren Auswirkungen auf Deutschland

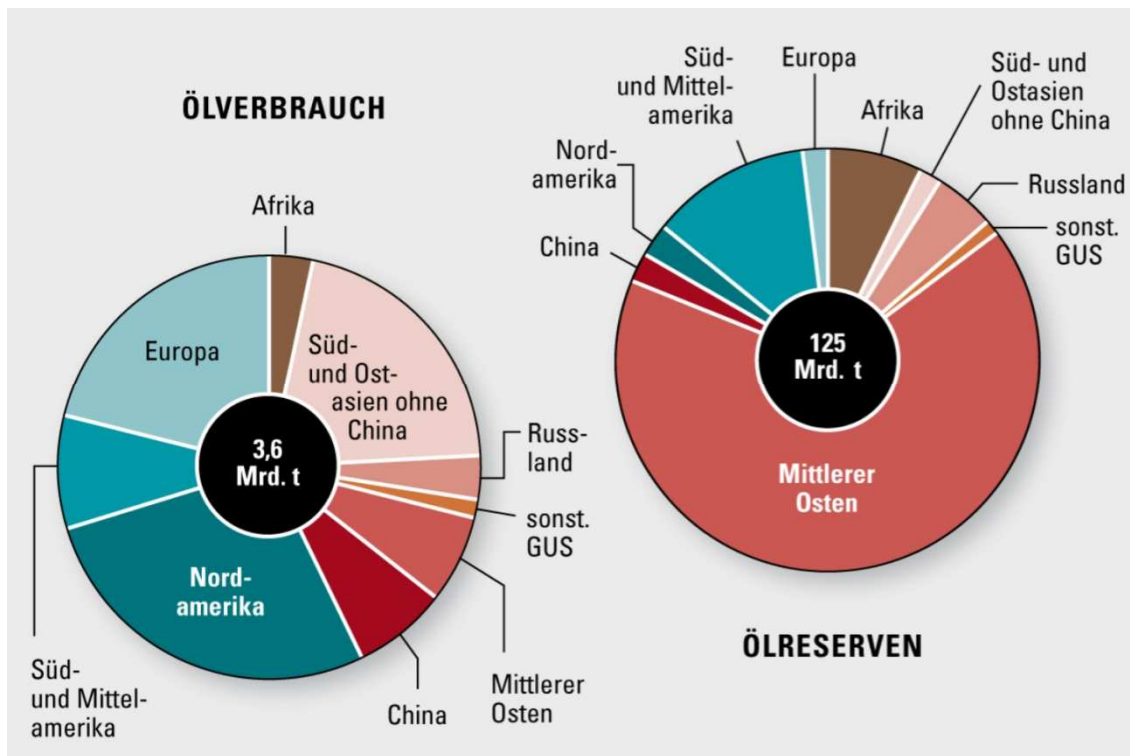
2.4.1 Erdöl

Auf den Rohölmärkten ist ein starker Trend zu beobachten, der mit einer Scherenbewegung vergleichbar ist: einerseits nimmt die Zahl an Ländern zu, die auf den internationalen Energiemärkten als Nachfrager auftreten. Seit Beginn der 1990er Jahre sind hier z. B. China und neuerdings auch Indonesien und Großbritannien zu nennen, die sich von Energieexporteuren zu -importeuren gewandelt haben. Im Falle von Indonesien ist dies besonders relevant, da Indonesien bis Mitte 2008 noch ein OPEC-Mitglied war, inzwischen aber aus der Organisation der ölexportierenden Länder ausgetreten ist. Des Weiteren wurden Länder auf den globalen Energiemärkten aktiv, die bis dahin keine Rolle gespielt hatten, z. B. Indien sowie weitere Entwicklungsländer. Waren in früheren Jahrzehnten die Schwerpunkte hohen Ölverbrauchs hauptsächlich auf Nordamerika und Westeuropa einzugrenzen, hat eine zunehmende „Dezentralisierung“ der Orte hohen Ölverbrauchs stattgefunden. Neben den genannten Regionen können inzwischen auch China, Indien sowie teilweise Südamerika als solche Schwerpunkte angesehen werden.⁴

Andererseits nimmt die Zahl der Staaten, die auf den internationalen Märkten Erdöl zur Verfügung stellen, stetig ab. Das verfügbare Angebot schränkt sich damit auf einen kleiner werdenden Kreis von Ländern ein, deren Bedeutung als zentrale Akteure zwangsläufig steigt. Die Mehrzahl dieser Länder lässt sich geographisch in der sogenannten Strategischen Ellipse verorten, einer imaginären Fläche, die Teile Russlands sowie den Persischen Golf und den Kaspischen Raum einschließt.

Es ist also eine fortschreitende Trennung zwischen Orten hohen Ölangebots und hoher Ölnachfrage zu beobachten. Die folgende Abb.2 stellt die vorhandenen Reserven sowie den Erdölverbrauch in regionaler Differenzierung graphisch dar.

⁴ Dies gilt für die aggregierten absoluten Verbräuche, nicht für die Pro-Kopf-Verbräuche an Erdöl.

Abbildung 2: Verteilung von Erdölverbrauch und Erdölreserven im Jahr 2000

Quelle: ASPO 2004, ESSO 2004.

Eine weitere Verschiebung deutet sich hinsichtlich der Ländergruppen an. Während in der Vergangenheit die Industrieländer den größten Anteil am Ölverbrauch hatten und Entwicklungsländer einen deutlich geringeren, wird sich dieses Verhältnis künftig mit dem Wachstum der Schwellenländer umkehren.⁵ Es ist zu beachten, dass die Gruppe der Entwicklungsländer deutlich mehr Staaten beinhaltet als die Gruppe der Industrieländer.

Fortschreibungen historischer Entwicklungen in die Zukunft, wie sie sich z. B. in den Reference Scenarios der IEA finden, deuten auf einen stark steigenden Energieverbrauch hin. Unter diesen Annahmen würde der Erdölverbrauch bis 2030 um ca. 40 bis 50 Prozent steigen (im Vergleich zu 2005), der Erdgasverbrauch im selben Zeitraum um über die Hälfte. Die Kernenergie würde nur mit weitreichenden Fördermaßnahmen ihren Anteil am Weltenergieverbrauch halten, erneuerbare Energien würden ihren Anteil nur wenig vergrößern.

Der fortgesetzte Anstieg des Ölverbrauchs führt zu einer beschleunigten Einengung der Lieferantenstrukturen. Dies ist unabhängig vom Erreichen eines globalen Peak Oil und geht allein darauf zurück, dass die meisten Nicht-OPEC-Förderländer ihr Produktionsmaximum bereits überschritten haben. Ein globales Peak Oil führt hingegen zu einer weiteren Verschärfung der Versorgungslage.

⁵ Vgl. z.B. v. Hauff (2009) und Zhang (2009) mit Beiträgen über Indien und China.

Ungeklärt ist bisher, wie sich der Ausbau der Kraftstoffproduktion aus Biomasse auf diese Problemlage auswirken kann. So ist denkbar, dass auf den Kraftstoffmärkten wieder mehr Anbieter auftreten, es also zu einer Diversifizierung unter den Anbietern kommt. Denkbar ist hingegen auch, dass Biokraftstoffe eher inländisch gehandelt und daher keinen nennenswerten Effekt auf die globalen Energiemärkte haben werden. Insgesamt wird der Anbau von Biokraftstoffen der ersten Generation zunehmend kritisch eingeschätzt,⁶ da sich daraus u.a. Nutzungskonflikte mit dem Anbau von Nahrungsmitteln ergeben.

Das in der Bundesrepublik Deutschland verbrauchte Erdöl (in Form von Kraftstoffen und Grundstoff der chemischen und pharmazeutischen Industrie, in geringem Maß auch als Heizöl) stammt zu großen Teilen aus der oben beschriebenen Strategischen Ellipse: Russland stellt ein Drittel zur Verfügung; geringere Anteile stammen aus dem südlichen Teil dieser Ellipse: Saudi-Arabien und Syrien liefern jeweils weniger als zehn Prozent. Nennenswerte Anteile stammen aus Libyen (ca. zehn Prozent) sowie aus Norwegen (ca. 20 Prozent) und Großbritannien (ca. 10 Prozent). Damit ist die Lieferantenstruktur relativ divers, Russland dominiert jedoch den Importmix. Norwegen und Großbritannien werden in den kommenden Jahren aufgrund ihrer sinkenden Ölproduktion immer geringere Mengen zur Verfügung stellen können. Für Deutschland ergibt sich daher die Frage, welche alternativen Lieferanten zukünftig in Frage kommen.

Es sei hier auf eine sprachliche Schwierigkeit innerhalb dieser Versorgungsargumentation hingewiesen: Zwar wird von Ländern als Nachfrager gesprochen, doch hat ein Staat als solcher in einem liberalisierten Markt wenig Einfluss auf Versorgungsregimes. Auf den internationalen Ölmärkten konkurrieren Ölkäufer, die ihre Produkte anschließend in Deutschland absetzen, mit anderen Käufern, die ihre Produkte ebenfalls in Deutschland, möglicherweise aber auch außerhalb Deutschlands in den Handel bringen. Insofern kann kaum von einer Konkurrenz Deutschlands mit anderen Ländern gesprochen werden. Vielmehr hängt die Versorgungssituation innerhalb Deutschlands davon ab, wie hoch hier die Gewinnmargen von Unternehmen sind im Vergleich zu den Gewinnmargen in anderen Ländern. In dieser Hinsicht ist auch ein Peak Oil zu betrachten: strukturell geringeres Angebot führt dazu, dass eine „Auslese“ der Käufer entlang der Marktpreise stattfinden wird. Solange deutsche Käufer mehr für Ölprodukte bezahlen können als Käufer z. B. in Entwicklungsländern, wird ein Peak Oil in Deutschland nur durch hohe Preise wahrgenommen werden und nicht durch ein zu geringes Angebot. Hohe Ölpreise führen daher national und international zu sozialen Konflikten. National betrifft dies vorrangig Entwicklungsländer, in denen das Angebot an Ölprodukten knapp und die Marktpreise kaum bezahlbar sind. Aber auch in Industrieländern wird der Zugang von wenig kaufkräftigen Bevölkerungsgruppen erschwert. International entstehen soziale Konflikte durch ein sich steigerndes Gefälle von Wohlstand, d.h. durch erschwerten Zugang armer und aufstiegswilliger Bevölkerungsgruppen zu als

⁶ Vgl. z.B. den Bericht des UNEP International Panel for Sustainable Resource Management (2009), Zugang: <http://www.unep.fr/scp/rpanel/Biofuels.htm>

erstrebenswert angesehenen Mobilitätsleistungen in Bereichen wie individueller motorisierter Personenverkehr und Kleingewerbe.

2.4.2 Erdgas

Die Erdgasversorgung unterscheidet sich grundsätzlich von der Erdölversorgung. Dies ist der bisher noch hohen Leitungsgebundenheit des Erdgases zuzuschreiben: Erdgas wird über lange Strecken per Pipeline von den Produktions- zu den Verbrauchsorten geliefert. Dies erfordert eine langfristige Bindung von Anbieter und Nachfrager. Eine weitere Konsequenz der Leitungsgebundenheit ist die regionale Isoliertheit von Erdgasmärkten: bisher existieren die drei großen Gasmärkte Nordamerika, Europa und Asien. Da Flüssiggas zunehmend an Bedeutung gewinnt, verändert sich dieses Bild isolierter Märkte jedoch. Denn Flüssiggas kann per Tanker global geliefert werden. Dies ist vor allem für solche Gasregionen von Bedeutung, die in der Vergangenheit zu weit von potentiellen Märkten entfernt lagen und nun an einem globalen Gasmarkt teilnehmen können.

Die Langfristigkeit von Erdgas-Lieferstrukturen (Pipelines mit langen Abschreibe- und Betriebslaufzeiten) schafft einerseits eine gewisse Sicherheit des Bezugs, gerade auch für Deutschland, das seit Jahrzehnten sein Erdgas aus Russland bezieht. Andererseits schließen solche Strukturen nicht-beteiligte Dritte langfristig von der Versorgung aus. Insofern haben Erdgas-Pipelines (die von der Quelle bis zum Endverbraucher die Lieferkette geschlossen halten) große strategische Bedeutung. Auch was die Integration von Transitländern betrifft, stellen Pipelines komplexe Strukturen dar. Transitländer erhalten entsprechende Gebühren für die Durchleitung, sie sind außerdem aus Sicht von Gasproduzenten (die in die Pipeline einspeisen) und Endverbrauchern ein Unsicherheitsfaktor dahingehend, dass die Unterbrechung der Versorgung als politisches Druckmittel gerade von den Transiteuren genutzt werden kann. Aus diesem Blickwinkel ist die Entscheidung des deutsch-russischen Konsortiums, das den Bau der sog. Ostsee-Pipeline durch die Ostsee unter Umgehung möglicher Transitländer wie Polen vorsieht, nachvollziehbar. (Fußnote: Aus Sicht der Transitländer selbst und dem EU-Prinzip der Kooperation im Binnenmarkt für Energie stellt sich dies anders dar.)

Die Einbindung von Flüssiggas in eine Versorgung ist für die Diversifizierung von Lieferantenstrukturen ein wichtiges Mittel. Denn verflüssigtes Erdgas kann global verschifft werden. Im Gegensatz dazu werden Pipelines ab einer bestimmten Länge (abhängig von zahlreichen Faktoren, auf die hier nicht eingegangen werden kann) unwirtschaftlich. Der Anteil von Flüssiggas am grenzüberschreitend gehandelten Erdgas steigt stark an, momentan liegt er bei ca. 20 bis 25 Prozent. Ein global handelbares Gut Flüssiggas bedeutet jedoch auch, dass die Konkurrenz im globalen Rahmen stattfindet.

Allerdings ist Flüssiggas (LNG, liquified natural gas) noch deutlich teurer als Pipeline-Gas. Daher wird es als Versorgungsoption nur in langfristig hochpreisigen Märkten in signifikanten Anteilen zu finden sein – was vermehrt zu beobachten ist – sowie als strategische Option für die genannte Diversifizierung. Letzterer Aspekt ist relevant in

der politischen Diskussion und nur eingeschränkt ein Entscheidungskalkül von Wirtschaftsunternehmen.

Deutschland bezieht bisher kein Flüssiggas. Inländisch werden noch ca. 15 Prozent des nachgefragten Erdgases produziert. Der Rest stammt aus Russland (knapp die Hälfte der Importe), aus Norwegen und den Niederlanden sowie zu kleinen Teilen aus Dänemark, von woher es ausschließlich per Pipeline importiert wird. Es werden verschiedene Ansätze diskutiert, wie die Erdgasversorgung aufrechterhalten werden kann. Diese Diskussion steht stark im EU-Kontext, da große Pipelinerouten auch andere EU-Mitglieder versorgen können. Auf das Nabucco-Projekt wird in der Fallstudie detailliert eingegangen.

Bezüglich der Steigerung der Energieeffizienz bzw. der – klimapolitisch geforderten – Senkung des Energieverbrauchs gibt es einen Zielkonflikt, der bisher nicht hinreichend wissenschaftlich untersucht worden ist: Die Reduzierung der absoluten Nachfrage durch eine Steigerung von Energieeffizienz oder durch eine dauerhaft geringere Wirtschaftsleistung ohne Effizienzsteigerung hemmt die Diversifizierung von Bezugsquellen bei der Erdgasversorgung. Dies liegt darin begründet, dass bei einer geringeren absolut nachgefragten Menge insgesamt weniger Lieferanten zum Zuge kommen, und zwar aus zwei Gründen bzw. entlang zweier Dynamiken:

- In einem freien Markt von Produzenten, die unterschiedliche Gestehungs- und Produktionskosten haben, liefern nur die jeweils günstigsten Produzenten bis maximal zum Grenzanbieter. Das träfe im Fall eines großen Anteils von LNG im Energiesystem zu.
- Da bisher jedoch der Großteil des Erdgases per Pipeline auf Basis langfristiger Verträge geliefert wird, wird die Pipeline-Option die bevorzugte bleiben. Je weniger Erdgas nachgefragt wird, umso geringer wird dann die Nachfrage nach dem teureren LNG sein.

Im konkreten Fall der europäischen Erdgasversorgung bedeutet dies, dass bei starken Effizienzanstrengungen die Erdgasnachfrage nicht so stark steigt, dass LNG eine unabdingbare (und teure) Versorgungsoption werden muss. Dadurch bleiben die Pipeline-Lieferanten die einzigen Anbieter und damit bliebe die Bezugsdiversität Europas gering. Auch wenn diese Argumentationslinie bisher nicht quantitativ untersucht wurde, ist von einem Zielkonflikt zwischen Energieeffizienz und langfristiger Versorgungssicherheit wegen dieser kapitalintensiven Investitionen auszugehen.

Diese Dynamiken zwischen Pipelinegas und LNG verlieren an Bedeutung, wenn per Pipeline transportierbares (also relativ nah beim Verbraucher produzierbares) Erdgas knapp wird und auf LNG zwingend zurückgegriffen werden muss.

2.4.3 Kohle

Die Situation bei Kohle ist geprägt von einer großen Zahl an Produzenten und damit deutlich verschieden vom Öl- und Gasbereich. Während Länder wie China und Südafrika die Kohleproduktion steigern, sinkt sie im Fall der Steinkohle in Deutschland aufgrund der hohen Kosten und rückläufiger Subventionen. Zugleich ist Deutschland der größte Produzent und Verbraucher von Braunkohle weltweit. Kohle wird bisher nur geringe bis gar keine strategische Relevanz beigemessen. Die geringe strategische Relevanz von Kohle wird teilweise als Argument für eine verstärkte Kohlenutzung angeführt.

Kohle ist jedoch von Bedeutung bei der Entstehung von klimawandelbedingten Konflikten, da die Emissionen aus der Kohleverbrennung einen großen Anteil am Klimawandel haben.

Da die Steinkohleproduktion in Deutschland sinkt, steigt die Importabhängigkeit entsprechend an. Relevante Exporteure sind Kanada, Australien und Russland. Die langen Transportwege tragen zur schlechten Emissionsbilanz von Kohleverbrennung in Deutschland noch zusätzlich bei. Zu erwähnen ist auch, dass bei Importen von energieintensiv erzeugten Halbwaren und Produkten aus Ländern, deren Energieversorgung wesentlich auf Kohleverbrennung in Kraftwerken mit vergleichsweise geringem Wirkungsgrad basiert, die weltweiten CO₂-Emissionen relativ gesehen ansteigen. Yunfeng und Laike (2009) haben auf Basis von Input-Output-Tabellen beispielsweise ermittelt, dass der Handel zwischen China und den USA 1997 – 2007 die CO₂-Bilanz der USA zu Lasten der chinesischen und weltweiten Emissionen verbessert hat.

Für weitere Analysen zur Bedeutung von Kohle wird auf den Projektbericht „Sicherheitspolitische Bedeutung erneuerbarer Energien“ im Auftrag des BMU verwiesen. Dort finden sich auch Angaben zur Importsituation Deutschlands (Adelphi Consult, Wuppertal Institut 2007).

2.4.4 Kernbrennstoffe

Etwa 80 Prozent der global verfügbaren Uranreserven in Höhe von 4,5 bis 5,5 Millionen Tonnen (je nach Kostenkategorie bis 80 US\$ Produktionskosten pro kg Uran bzw. bis 130 US\$ pro kg Uran) finden sich in vier Ländern: Australien, Kanada, Kasachstan und Südafrika. Weitere wichtige Länder sind Namibia, Russland und Niger (BGR 2005). Über die Gesamtgröße der Vorräte bestehen jedoch große Unsicherheiten. So wurden vormals als sehr groß bewertete Lagerstätten auf Länderbasis teils drastisch hin zu geringeren Mengen korrigiert. Als Beispiel sei die USA genannt, die bis in die 1970er Jahre hinein als sehr großer Reservenhalter bewertet wurde, wo Anfang der 1980er Jahre jedoch die Vorratsgröße um fast zwei Drittel reduziert werden musste: was vormals als geschätzte zusätzliche Reserven (Reserven, deren Existenz als relativ

sicher angenommen wird) – estimated additional reserves – gelistet worden war, verschwand völlig aus den Statistiken.

Der Jahresverbrauch an Kernbrennstoffen liegt seit ca. zehn Jahren bei über 60.000 Tonnen. Im Jahr 2006 wurden 66.500 Tonnen Uran in Kernkraftwerken eingesetzt, im Uranerzbergbau in diesem Jahr aber nur 39.600 Tonnen gewonnen (NEA 2007). Der Rest stammte zu großen Teilen aus der Abreicherung von waffenfähigem Uran (highly enriched Uranium, HEU). Diese große Diskrepanz zwischen zeitnah bergbaulich gewonnenem und in Kraftwerken eingesetztem Uran ist ein allgemeiner Trend seit den 1990er Jahren (BGR 2005, EWG 2006).

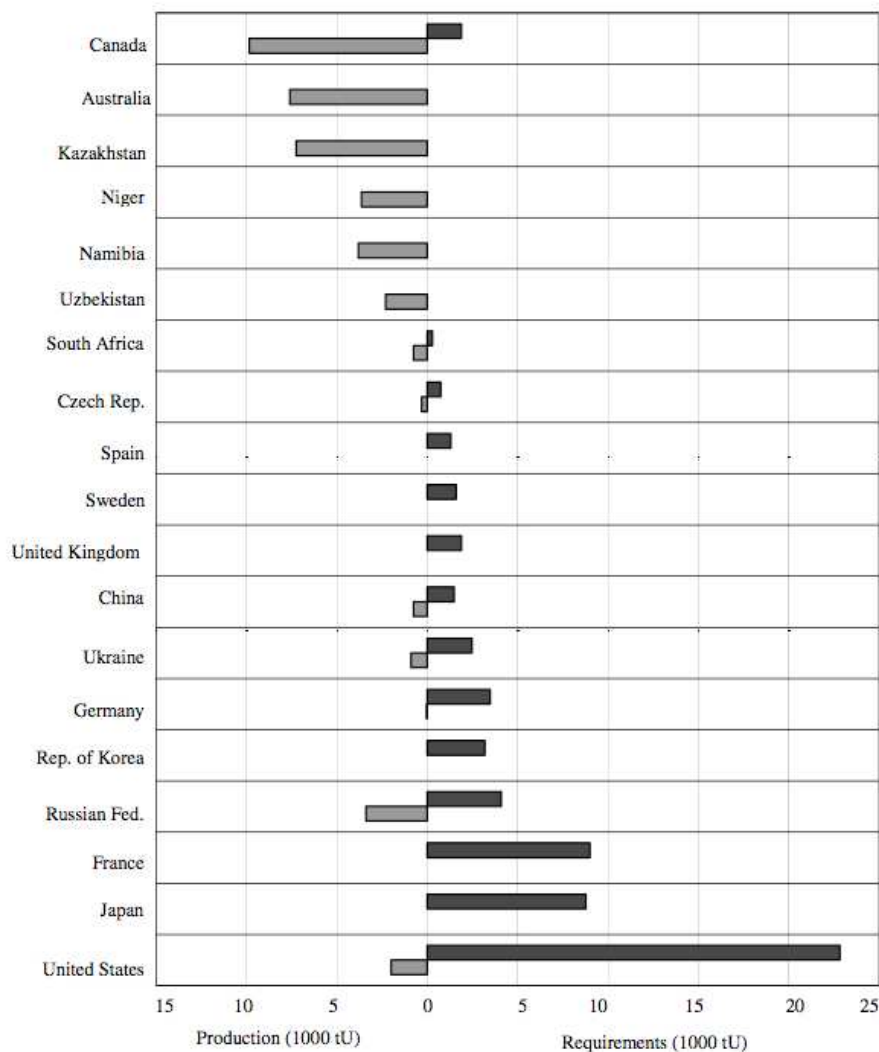
Die aktuelle Produktion stützt sich hauptsächlich auf die Beiträge von Kanada, Australien, Kasachstan, Niger, Russland und Namibia (vgl. Abbildung 3). Aus Daten der Nuclear Energy Agency geht hervor, dass die Produktion in verschiedenen Ländern jedoch sehr starken Schwankungen unterworfen ist. So sank die Produktion in Australien zwischen 2004 und 2006 um ca. 20 Prozent aufgrund von Verarbeitungsschwierigkeiten in der Olympic-Dam-Mine, aufgrund starker Regenfälle in der Ranger-Mine und technischer Schwierigkeiten in der Beverley-Mine. Dies sind die einzigen Minen in Australien, die immerhin deutlich knapp zwanzig Prozent der Welturanproduktion liefern. In Kanada sank im selben Zeitraum die Produktion um 15 Prozent wegen der Verarbeitung von Erz mit sehr niedrigen Urangehalten. In Kasachstan und den USA konnte die Produktion hingegen deutlich gesteigert werden.

Bis zur Mitte der kommenden Dekade wird die Verfügbarkeit von HEU aus Kernwaffen stark sinken. Entsprechend müssen Minenprojekte vorangetrieben werden. Diese Tendenz stellt sich ambivalent dar. Für einen starken Ausbau der Produktion sprechen die Beispiele Russland und Kasachstan. So hat Russland ambitionierte Pläne für den Ausbau der Uranproduktion. Zur derzeitigen Produktion (enthält Erzabbau und Abreicherung) sollen in den kommenden Jahren noch 5.000 bis 6.000 Jahrestonnen hinzukommen. Das größte derzeit in Angriff genommene Uran-Bergbauprojekt in Kanada ist Cigar Lake, das insgesamt 8.100 Tonnen pro Jahr produzieren soll (über 10 Prozent des derzeitigen Jahresverbrauchs). Allerdings wurde die Inbetriebnahme mehrmals verschoben aufgrund von Wassereintrüben in die Mine. Derzeit wird der Produktionsbeginn für 2012/13 angegeben (Wall Street Online 2008). Die Verschiebung solch großer Vorhaben erhöht den Druck auf die Weiternutzung von abreicherbarem Kernwaffenuran. Die NEA (Nuclear Energy Agency) hält zur Versorgung der kommenden Jahre fest: „Actual production has declined in recent years, and in order for production to meet future demand mine expansions and openings must proceed as planned and production will have to be maintained at full capability. This is unlikely, as illustrated by mine development setbacks and production difficulties experienced in recent years. Therefore, to ensure demand is met, secondary sources will continue to be necessary...“ (NEA, S. 11). Die NEA kommt sodann zum Schluss: „Because of long lead-times ... (typically in the order of ten years or more) there exists the potential for the development of uranium shortfalls and continued upward pressure on uranium prices.“ (NEA 2007, S. 12). Damit kündigt die NEA indirekt einen Versorgungsengpass an, weil die Verfügbarkeit aus diesen Sekundärquellen stark abnehmen wird.

Der Vergleich zwischen den größten Verbrauchern und Produzenten von Kernbrennstoffen offenbart ein großes Ungleichgewicht. Die oben genannten

Reservenbesitzer sind auch gleichzeitig – zusammen mit Russland, Niger, Namibia und Usbekistan – die größten Uranproduzenten. Im Gegensatz zu den Erdöl- und Erdgasvorkommen liegt ein großer Teil allerdings in Ländern, die als gefestigte Demokratien mit einem hohen Grad an gewährleisteten Menschenrechten ausgestattet sind (Abbildung 3). Die NEA bewertet diese globale Verteilung in folgender Weise (als Erläuterung zur unten aufgeführten Abbildung 3): „13 countries are endowed with about 93% of the identified global resource base in this cost category (the remaining 7% are distributed among another 30 countries). The widespread distribution of uranium resources is an important geographic aspect of nuclear energy in the light of security of energy supply.“ (NEA 2007, S. 17). Die NEA impliziert damit, dass die rein geographische Verteilung mit einer Erhöhung der Energiesicherheit einherginge. Dem wird hier stark widersprochen und im Gegensatz die Haltung vertreten, dass die Bewertung der Rohstoffverteilung nach rein geographischen Aspekten sinnlos ist, vielmehr wird die Verteilung von Rohstoffen auf die Anzahl von Ländern sowie deren staatliche Verfasstheit und den Substituierbarkeitsgrade der Ressource als maßgeblich für Aspekte wie Energiesicherheit angesehen. Dahingehend muss festgehalten werden, dass die Uran-Vorkommen zwar global verteilt sind, sich allerdings auf einige wenige Länder konzentrieren und die staatliche Verfasstheit eines Teils dieser Länder ein erhebliches Konfliktpotential enthält.

Die größten Verbraucher hingegen sind die USA, Japan, Frankreich und Deutschland (sowie Russland). Dieses strukturelle Ungleichgewicht wird in Abbildung 3 verdeutlicht.

Abbildung 3: Uranproduzenten und Verbraucher 2007, geschätzte Werte

Quelle: NEA 2007.

Es ist durchaus wahrscheinlich, dass sich bereits in den kommenden zehn bis fünfzehn Jahren Knappheiten entwickeln, und zwar aus folgenden Gründen:

- die Erschließung großer Minenprojekte stockt
- die Verfügbarkeit von Waffenuran sinkt, da die sog. Atommächte ihr Arsenal zur Sicherung des Weltfriedens nicht vollständig zum Wohle der zivilen Energieversorgung abbauen können
- möglicherweise sinkt die Zahl der relevanten Uranproduzenten weiterhin, wodurch sich eine weitere Konzentration auf Länder wie Russland, Kasachstan, Namibia und Nigeria vollzieht.

Darüber hinaus lassen die ungesicherte Datenlage sowie zahlreiche Beispiele (USA wurde schon genannt) befürchten, dass die weltweiten Vorräte nicht so groß sind, wie bisher angenommen. Daher könnten Produktionsgrenzen struktureller Art entstehen.

3 Fazit energetischer Rohstoffe

Bei den hier analysierten Energieträgern – Erdöl, Erdgas, Kernbrennstoffe – ist die Diversität der wichtigsten Reservenbesitzer und Produzenten gering. Während jedoch im Fall von Uran ein Teil dieser Länder als politisch stabil und gefestigt bezeichnet werden kann, ist dies bei den relevanten Erdöl- und Erdgasproduzenten (mit Ausnahme von USA und Kanada) nicht der Fall.

Erdöl- und Erdgasreserven liegen konzentriert in der sogenannten Strategischen Ellipse, Kernbrennstoffe sind hingegen global auf alle Kontinente in signifikanten Anteilen verteilt.

Sowohl bei Erdöl als auch bei Erdgas entwickelt sich die Versorgungssituation hin zu einer Verschärfung der Akteurskonkurrenz. Vor allem mit Blick auf 2020 sind in den kommenden Jahren große Veränderungen zu erwarten: durch ein globales Peak Oil, die Zunahme der Produktion unkonventioneller Ölarten wie Teersande in Kanada, den stark steigenden Bedarf in Entwicklungsländern und in einigen Produzentenländern selbst sowie durch auch im Erdgasbereich stark steigende Importabhängigkeiten ist auf allen geographischen, politischen und gesellschaftlichen Ebenen eine Zunahme von unterschiedlichen Konflikten zu erwarten. Deren Gründe sind in Umweltzerstörungen (lokale Konflikte zwischen produzierenden Unternehmen und der ansässigen Bevölkerung), dem Klimawandel sowie dem Wachsen von Wohlstandsgefällen innerhalb von Ländern sowie im Ländervergleich zu finden.

Weniger Anbieter und mehr Nachfrager in einer Welt begrenzter Ressourcen – sowohl was die Anzahl der Akteure als auch was die Nachfragemenge betrifft – sowie die Ankündigung eines nahenden Peak Oil (und später auch Peak Gas) schaffen den Bedarf nach einer grundsätzlichen Neudefinition von Verbrauchsregimes. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass nicht nur die historischen Verbrauchsfortschreibungen der IEA jegliche angebotsseitigen Engpässe außer Acht lassen und damit ein verzerrtes Bild der Versorgungslage zeichnen. Im Rückblick zeigt sich vielmehr, dass die Annahmen der IEA zur Neuentdeckung von Ölreserven – die zur Argumentation der Verbrauchsprognosen herangezogen wurden – völlig überhöht waren. (Fußnote: Die IEA steht damit vor dem Problem, ein Verbrauchswachstum zu prognostizieren, das sie anschließend aufgrund der fehlenden Ressourcenbasis wieder relativieren muss. Hieraus ergibt sich für die IEA die Rolle eines Mahners. Dieser Trend zur mahnenden Stimme ist neu, bisher galt die IEA eher als optimistischer Vertreter von immer weiter steigendem Energieverbrauch.) Auch die Energieszenarien (also alternative Entwicklungspfade verglichen mit einer Fortschreibung historischer Trends) der IEA, die eine alternative Entwicklung darstellen, zeigen höhere Erdölverbräuche an, als mit einem frühen Peak Oil in Einklang zu bringen wäre.

Bei Kernbrennstoffen ist ebenfalls eine Reduzierung der Anbieterzahl zu erkennen. Bei einer Renaissance der Kernenergie ist damit zu rechnen, dass die absolut nachgefragte Menge an Uran deutlich steigen wird. Das Problem ist, dass

produktionsseitig große Unwägbarkeiten herrschen, sodass zuverlässige Langfristaussagen schwierig sind.

Auf der Seite der Verbraucher ergibt sich bei der Kernenergie ebenfalls ein anderes Bild als bei Erdöl und Erdgas: innerhalb der etwa 30 Staaten, die bisher Atomkraftwerke betreiben, wird sich möglicherweise eine Verschiebung dahingehend ergeben, dass bisher relevante Verbraucherstaaten wie Deutschland zumindest langfristig wegfallen, jedoch einige neue Verbraucher hinzukommen. Diese würden sich vor allem aus dem arabischen Raum rekrutieren. Diese Tendenz würde bedeuten, dass mehr politisch instabile Staaten den Brennstoffzyklus nutzen. Als besonders kritisch und für die Versorgung konfliktträchtig ist der Zeitraum bis ca. 2015 zu betrachten, wenn aus der Abreicherung von Kernwaffen-Uran nur noch sehr geringe Mengen zur Verfügung gestellt werden können und dies durch eine stark steigende Minenaktivität ausgeglichen werden muss. Dadurch steigt die Umweltzerstörung in Abbaugebieten mit negativen Auswirkungen für die dortige Bevölkerung. Die Nutzung der Atomenergie in politisch instabilen Staaten steigert das Proliferationsrisiko und damit die Konfliktgefahr. Dieser Entwicklung könnte nur durch ein starkes Kontrollregime entgegengewirkt werden. Einem solchen Regime widersetzen sich jedoch bislang verschiedene Staaten, was bereits zu großen politischen Konflikten geführt hat und für die Zukunft weitere Risiken und Konflikte erwarten lässt.

4 Nicht-energetische Rohstoffe

Nicht energetische Ressourcen werden in einer großen Vielzahl genutzt. Im Vergleich zu den energetischen Rohstoffen sind sie mengenmäßig die dominierenden Rohstoffe. Nicht energetische Rohstoffe unterscheiden sich jedoch in einem noch weit größeren Maße voneinander als die energetischen.

Zahlreiche Rohstoffe kommen in großen Mengen vor und sind kaum Gegenstand möglicher überregionaler Konflikte. Zwar gibt es immer wieder auch Diskussionen um eine Verknappung von Baumineralien wie Sand, Kies oder Schotter, in aller Regel ist die Verfügbarkeit dieser Stoffe jedoch nicht eingeschränkt oder die tradierten Bauweisen basieren auf den regional verfügbaren Stoffe. Vereinzelt kann Verfügbarkeit bestimmter Rohstoffqualitäten eingeschränkt sein, grundsätzlich dürfen aber die insbesondere im Baubereich eingesetzten Rohstoffe wie Sand, Kies, Schotter, Lehm oder Kalkstein als langfristig verfügbar und allenfalls regional eingeschätzt werden.

Betrachtet werden wichtige Rohstoffe für die Industrie und die mit ihnen verbundenen Stoffsysteme. Kriterien für die Auswahl waren insbesondere die eingesetzten Primärrohstoffmengen, die Relevanz, für die deutsche Wirtschaft aber auch die Relevanz für Zukunfts- und Umwelttechnologien. Rohstoffe, die leicht substituierbar sind, werden aufgrund des begrenzten Projektumfangs nicht betrachtet, auch wenn hier die Möglichkeit besteht, dass es sich bei den Substituten ebenfalls kritische Rohstoffe handelt.⁷

4.1 Die Rohstoffbasis metallischer Rohstoffe

Konflikte um metallische Rohstoffe können sehr unterschiedlich gelagert sein. Auf der einen Seite gibt es metallische Rohstoffe deren Verfügbarkeit global oder regional begrenzt ist, die jedoch für wichtige Technologien und Anwendungen erforderlich sind. Zu diesen so genannten Technologiemetallen gehören die Edel- und Sondermetalle aber auch wichtige Legierungselemente insbesondere von Metall oder für Superlegierungen⁸. Auf der anderen Seite gibt es metallische Rohstoffe, die weit verbreitet sind, für die aber für eine wirtschaftliche Produktion definierte, hochwertige Rohstoffqualitäten benötigt werden. Das trifft z. B. auf die Rohstoffe von wichtigen Massenwerkstoffen insbesondere auf Eisenerz und Bauxit zu. Daneben gibt es Rohstoffe, die nur als Nebenprodukt oder zusammen mit einer größeren Zahl anderer Rohstoffe wirtschaftlich gefördert werden können. Das trifft etwa für die

⁷ Vgl. auch die Broschüre der Schweizerischen Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW 2010) sowie die Arbeiten im Rahmen von MaRess AP 2.

⁸ Als Superlegierungen werden metallische Werkstoffe mit komplexer Zusammensetzung für Hochtemperaturanwendungen bezeichnet.

Seltenerdenmetalle⁹ zu aber auch auf eine Reihe anderer nicht lagerstättenbildender Rohstoffe.¹⁰ Bisweilen treffen auch zeitgleich mehrere der beschriebenen Aspekte zu.

Bis Mitte des Jahres 2008 kam es bedingt durch das starke Wirtschaftswachstum in den Schwellenländern, insbesondere China, aber auch der insgesamt guten wirtschaftlichen Lage zu einer starken Nachfragesteigerung nach metallischen Rohstoffen. Verbunden war dies mit teilweise extrem hohen Rohstoffpreisen und massiven Bemühungen einzelner Länder zu einer langfristigen Rohstoffsicherung. Auch Bezug nehmend auf diese Situation wurde die Studie „Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen“ (RWI et al. 2006, update BGR 2010) durchgeführt. Diese Studie kam zu einer insgesamt relativ unkritischen Einschätzung hinsichtlich der Rohstoffsituation für Deutschland. In der vorliegenden Studie soll jedoch ein anderer Schwerpunkt gelegt und die Verfügbarkeit von metallischen Rohstoffen im Hinblick auf potentielle Rohstoffkonflikte betrachtet werden.

Infolge der Finanzkrise hat die Nachfrage nach metallischen Rohstoffen nachgelassen. Die Preise sind diesem Trend gefolgt und notieren durchgängig unterhalb der vorherigen Höchststände, allerdings mit derzeit ansteigender Tendenz.

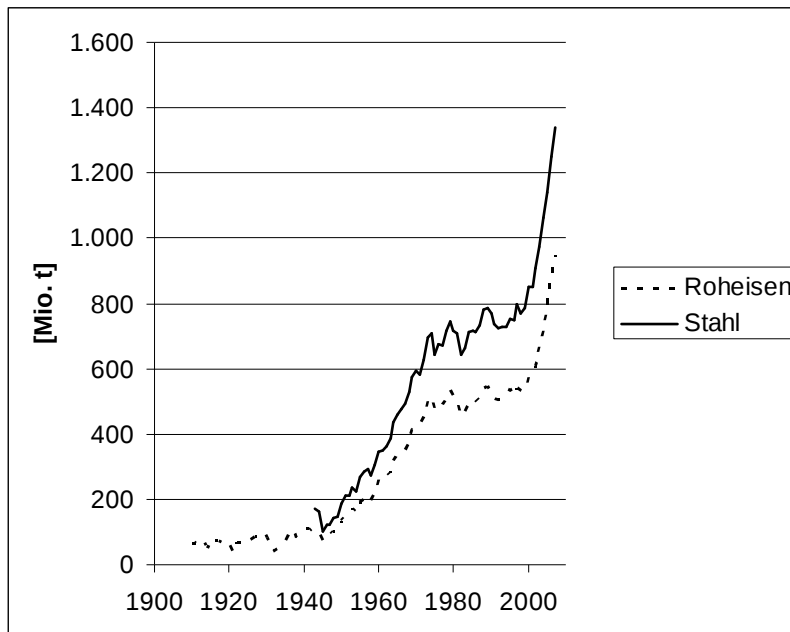
4.1.1 Eisen und Stahl

Eisen und Stahl sind die dominierenden metallischen Werkstoffe. Weltweit führen sie die Produktionsmengen mit weitem Abstand vor anderen metallischen Werkstoffen an (vgl. Abbildung 4) und haben zwischenzeitlich rund 1.400 Mio. t Jahresproduktion erreicht.

Dementsprechend aufmerksam wird von der Öffentlichkeit die Entwicklung im Eisen- und Stahlbereich beobachtet. Alleine die Größe des Sektors – verbunden mit jeweils entsprechend großen Auswirkungen und Problemen – drängt diesen Bereich in den Blickpunkt der Öffentlichkeit. Bis zum gegenwärtigen Einbruch der Nachfrage kam es dort in den letzten Jahren zu massiven Preissteigerungen bei Eisenerzen, den Legierungselementen, Schrott und Koks. Ursache der Preissteigerungen waren eine extrem hohe Nachfrage, insbesondere verursacht durch den Aufbau der Infrastruktur in China, eine ausgeprägte Oligopolbildung bei den Eisenerzlieferanten (Jorgenson 2008) oder aber auch begrenzte Verarbeitungskapazitäten (Koks).

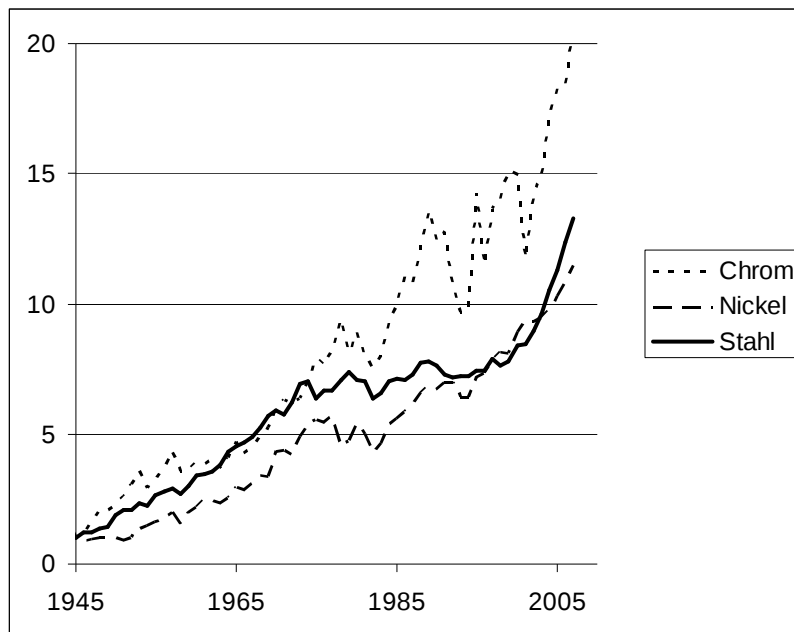
⁹ Seltenerdenmetalle sind Elemente der 3. Gruppe des Periodensystems. Vgl. dazu den Teilbericht im Vorhaben.

¹⁰ Die allgemeine Definition einer Lagerstätte „Lagerstätten nennt man jene natürlichen Anhäufungen nutzbarer Minerale und Gesteine, die nach Größe und Inhalt für eine wirtschaftliche Gewinnung in Betracht kommen können. Mineral- und Gesteinskörper, die zu klein oder zu arm sind, um jemals abbauwürdig zu sein, nennt man Vorkommen“ wird in aller Regel auf die Hauptbestandteile angewendet. Zudem sagt sie nichts zu dem Fall solcher Stoffe, die keinen Deckungsbeitrag bei der Förderung der Erze leisten. Das trifft z.B. auf Gallium zu. Hier kommt eine Gewinnung nur aufgrund vorheriger Verfahrensschritte in Frage.

Abbildung 4: Entwicklung der globalen Produktionsmengen von Stahl und Eisen

Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage Kelly, Matos 2010

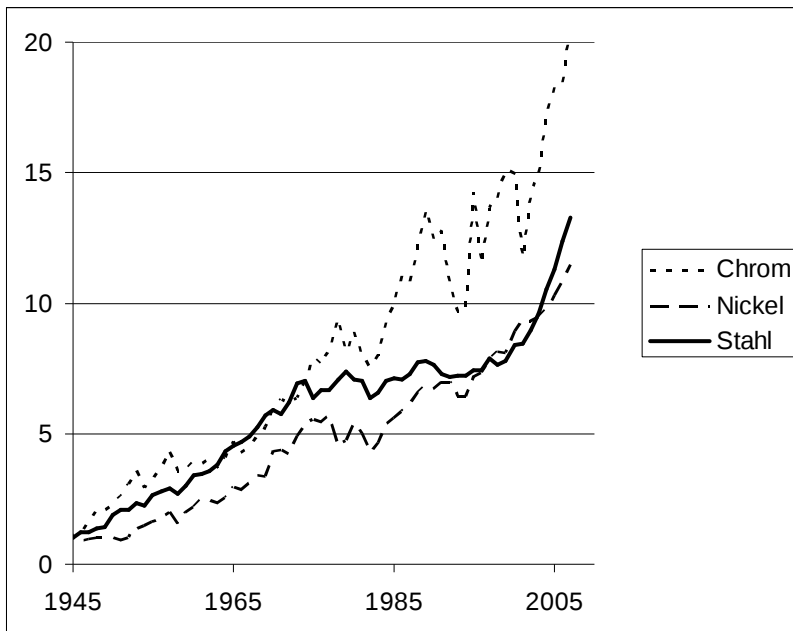
Für die großen Produktionsmengen von Eisen und Stahl wurden im Jahr 2008 insgesamt rund 2.200 Mio. t Eisenerz gefördert. Größte Fördernation mit 770 Mio. t war China vor Brasilien (390 Mio. t) und Australien (330 Mio. t). Die wichtigsten europäischen Eisenerzproduzenten sind die Ukraine mit rund 80 Mio. t und Schweden mit 27 Mio. t. Eisenerz. Damit ist Europa ganz überwiegend auf Erzimporte angewiesen. Wesentliche Ursache hierfür ist jedoch nicht, dass in Europa keine Eisenerze verfügbar sind, sondern, dass die europäischen Eisenerze überwiegend von geringer Qualität sind und daher aus Gründen der Prozesseffizienz auf ihren Einsatz verzichtet wird. Das gilt auch für die immer noch beträchtlichen Mengen deutscher Eisenerze wie sie etwa im Salzgitterbezirk zu finden sind (Pohl 2005). Konkurrenzsituationen entstehen insofern vor allem um hochwertige Erzqualitäten.

Abbildung 5: Entwicklung des Eisengehalts in Eisenerzen in Deutschland

Quelle: eigene Darstellung, Datengrundlage: Wirtschaftsvereinigung Stahl.

Da immer schon Schrott in der Eisen- und Stahlindustrie eingesetzt wurde, ist die Produktionsmenge des überwiegend aus Eisenerz hergestellten Roheisens stets deutlich niedriger als die Stahlproduktionsmenge.

Stahl wird heute überwiegend legiert eingesetzt. Hierbei sind zwei gegenläufige Tendenzen zu beobachten: einerseits die vermehrte Herstellung legierter Stahlsorten und andererseits die Entwicklung von Stahlsorten mit niedrigeren Legierungselementgehalten bis hin zu sogenannten mikrolegierten Stählen. Trotz der letztgenannten Entwicklung steigt der Bedarf nach den wichtigsten Legierungselementen Chrom und Nickel kontinuierlich an. Bei Chrom auch deutlich schneller als die Entwicklung der Stahlnachfrage (vgl. Abbildung 6).

Abbildung 6: Index der Produktion von Stahl, Nickel und Chrom, (1945 = 1)

Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage Kelly, Matos 2010

Die Legierungselemente Chrom und Nickel sind besonders kritisch zu betrachten, da sie vielfach nur in wenigen Lagerstätten vorhanden sind, die zum Teil in politisch gefährdeten Regionen liegen. Hinzu kommt, dass diese Legierungselemente häufig nicht oder nicht einfach substituiert werden können bzw. nur andere kritische Rohstoffe als Substitut in Frage kommen.

4.1.2 Chrom

Die Vorräte bei Chromrohstoffen sind global sehr unterschiedlich verteilt. Insgesamt verfügen nur Südafrika, Kasachstan und Indien über bedeutende Vorräte, wobei rund 95 % der Chromressourcen der Welt in Südafrika und Kasachstan verortet sind (USGS 2009). Mehr als 75 % der gegenwärtigen Weltförderung stammen ebenfalls aus diesen Ländern. Es ist davon auszugehen, dass die Abhängigkeit von den drei großen Föndernationen in Zukunft noch steigen wird. Insgesamt werden die Ressourcen an Chrom auf 12.000 Mio. t geschätzt bei einer Weltproduktion von rund 21,5 Mio. t in 2008. Eine geologische Verknappung droht insofern auch mittelfristig nicht, die hohe Abhängigkeit von wenigen Liefernationen ist jedoch kritisch zumal es im Haupteinsatzgebiet von Chrom – rostfreiem Edelstahl – kein Substitut für Chrom gibt.

4.1.3 Nickel

Sowohl die Förderung als auch die Vorräte von Nickel verteilen sich auf deutlich mehr Länder als beim Chrom. Die Nickelvorräte sind global relativ weit verbreitet, jedoch mit insgesamt nur rund 130 Mio. t deutlich geringer als die Chromvorräte. Hinzu kommt, dass es sowohl in Europa als auch in den USA praktisch keine Vorräte gibt (USGS 2009).

Der Nickelverbrauch wird mit einem Anteil von 60 % des Gesamtverbrauchs vom Edelstahl dominiert. Daneben hat insbesondere die Verwendung in Batterien stark zugenommen, ist jedoch bisher dennoch nur für rund 5 % der Verwendung verantwortlich. Bedeutend ist jedoch die Verwendung in Superlegierungen für Hochtemperaturanwendungen in der Luftfahrt und im Kraftwerksbau.

Die zunehmende Verwendung von Nickel in Stahl, in Superlegierungen sowie in Batterien hat zu einem deutlichen Anstieg der Nachfrage geführt. Verbunden war dieser Anstieg mit teils massiven Preissteigerungen (vgl. Abbildung 7).

Abbildung 7: Preisentwicklung bei Nickel



Quelle: Goldman Sachs 2009.

Der Bedarf an Nickel wird voraussichtlich weiter steigen, da es insbesondere für Superlegierungen, Nickelbasislegierungen aber auch hochlegierte Stahlsorten für den Einsatz in Wärmekraftwerken mit verbessertem Wirkungsgrad (erhöhte Dampftemperatur von heute 570-600 °C auf 700-720 °C) benötigt wird.

4.1.4 Kobalt

Kobalt gehört ebenfalls zu den wichtigen Legierungselementen für Stahl. Traditionell dominierend ist die Nutzung in Superlegierungen, gefolgt von der Verwendung in der chemischen und keramischen Industrie, erst an dritter Stelle kommt der Einsatz in Stahllegierungen (USGS 2008). Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass Superlegierungen häufig auch erhebliche Eisengehalte aufweisen und letztlich in enger Beziehung zu den hochlegierten Stählen stehen. Insofern ist Kobalt für Eisen- und Stahlwerkstoffe insgesamt von erheblicher Bedeutung.

Bei den Anwendungen in der chemischen Industrie hat die Verwendung als Elektroden in Batterien eine wachsende Bedeutung und beginnt die Kobaltverwendung in Superlegierungen zu übertreffen (Shed 2008). Eine Substitution ist meist nur eingeschränkt und mit einer Verschlechterung der Eigenschaften der Erzeugnisse möglich (USGS 2009).

Die Herstellung von Kobalt erfolgt überwiegend als Nebenprodukt, die Gewinnung als Hauptprodukt erlangt insbesondere seit den 1990iger Jahren mit der wichtigen Abbauregion Kongo und mit der Gewinnung in Marokko zunehmend Bedeutung (Shed 2008).

Es wird davon ausgegangen, dass die Nachfrage nach Kobalt weiter steigen wird. Es wird insbesondere von einem verstärkten Einsatz in Superlegierungen z. B. für die zivile Luftfahrt, ausgegangen, daneben wird aber auch der Einsatz von Kobalt als Katalysator die Nachfrage verstärken. Beim Einsatz in Batterien wird von einer gedämpften Entwicklung der Nachfrage ausgegangen da Kobalt hier zunehmend durch preisgünstigere Stoffe substituiert wird. (Shed 2008).

Bei der Herstellung von Hartmetallen ist Kobalt als Matrix oder Bindephase für Wolframcarbid bisher nicht substituierbar. In einigen Anwendungsfeldern gibt es jedoch Substitute für Hartmetalle. Mengenmäßig sind Hartmetalle jedoch für die Kobaltverwendung nachrangig.

Lagerstätten von Kobalt sind relativ weit verbreitet, jedoch verfügen nur wenige Länder über große Vorräte. Einer Jahrsförderung von 71.800 t Kobalt 2008 stehen Reserven von 7,1 Mio. t und Ressourcen von rund 15 Mio. t gegenüber. Damit wäre Kobalt eigentlich ein hinsichtlich der geologischen Verfügbarkeit unkritischer Stoff, die größten Reserven und Ressourcen sind jedoch im Kongo (DRC) vorhanden gefolgt von Australien und Kuba. Verglichen mit den Vorräten in diesen drei Ländern sind die Vorräte in allen anderen Ländern vergleichsweise gering, es gibt daher eine deutliche Abhängigkeit insbesondere von der Förderung im Kongo die 2008 einen Anteil von rund 45 % erreicht hat.¹¹

¹¹ Vgl. entsprechende Teilberichte im Vorhaben.

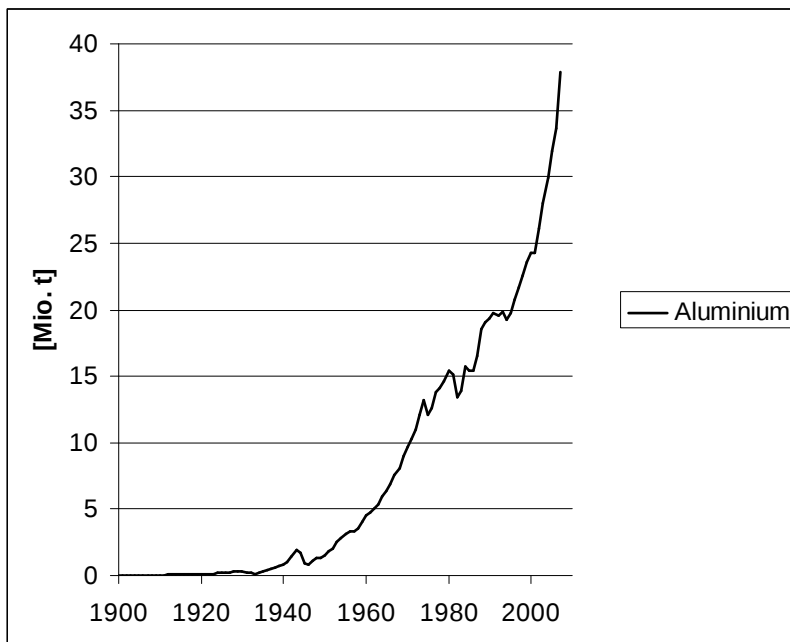
4.1.5 Aluminium

Aluminium ist nach Eisen und Stahl das am häufigsten eingesetzte Metall. Als wichtigster Rohstoff bei der Aluminiumherstellung wird Bauxit eingesetzt. Bauxite kommen als Verwitterungsprodukt feldspathaltiger Gesteine fast ausschließlich in tropischen Regionen vor. Entsprechend ungleich ist die globale Verteilung von Bauxiten. Hauptförderländer für Bauxit sind Australien, China und Brasilien.

Bei den Bauxiten werden unterschiedliche Qualitäten gefördert. Am leichtesten aufschließbar sind gibbsitreiche Bauxite, diasporreiche sind am schlechtesten aufschließbar (Pohl 2005). Aus energetischen Gründen werden gibbsitreiche Bauxite bevorzugt. Grundsätzlich können jedoch auch andere Bauxite eingesetzt werden.

Aufgrund der in den letzten Jahren hohen Nachfrage nach Bauxit wird nicht ausgeschlossen, dass es zu Engpässen und steigenden Preisen bei der Versorgung mit Bauxit kommt (Bray 2009b), hierbei muss jedoch auch berücksichtigt werden, dass die Rohstoffbasis für Aluminium nicht auf Bauxit beschränkt ist. In geringen Mengen wurden auch andere Rohstoffe eingesetzt (Pohl 2005). Die theoretische Rohstoffbasis für Aluminium ist jedoch noch deutlich breiter und umfasst mit den feldspathaltigen Gesteinen und ihren Verwitterungsprodukten auch die Kaoline und Tone und kann daher als auf absehbare Zeit nicht erschöpfbar angesehen werden. Allerdings werden diese Rohstoffe bisher nicht genutzt, die notwendige Technologie wurde daher bisher nicht etabliert. Daneben ist die Nutzung von Sekundäraluminium eine wichtige Strategie um den Bauxitbedarf – vor allem aber den Energiebedarf – der Aluminiumindustrie zu reduzieren. Aufgrund der stark wachsenden Produktionsmengen kann Sekundäraluminium jedoch derzeit nur ca. 40 % der Gesamtproduktion in Europa abdecken, trotz hoher Recyclingquoten für Aluminium zwischen 63 % für Bierdosen und über 90 % für den Baubereich.

Der Anstieg der Aluminiumproduktionsmenge war deutlich stärker als beim Eisen oder Kupfer. Die Aluminiumproduktion konnte sich erst zu Beginn des Zwanzigsten Jahrhunderts entwickeln und ihren Aufschwung erst deutlich nach dem Zweiten Weltkrieg einleiten (USGS 2009). Ursache hierfür ist der aufwendige Produktionsprozess des primär erzeugten Metalls, der bisher ausschließlich elektrolytisch erfolgen kann. Auch 2007 kam es erneut zu einem starken Anstieg der Produktionsmengen, insbesondere durch eine Steigerung der Produktionskapazitäten. Für die Zukunft wird weiterhin von einer weiter steigenden Produktion ausgegangen (Bray 2009). Die derzeitige wirtschaftliche Lage hat jedoch zunächst das bisherige starke Wachstum gestoppt und zu Produktionsrückgängen bei wichtigen Produzenten geführt (vgl. z. B. Alcoa 2009).

Abbildung 8: Entwicklung der globalen Produktionsmengen von Aluminium

Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage Kelly, Matos 2010. Die Daten umfassen die primäre und sekundäre Produktion.

Aluminium wird überwiegend legiert eingesetzt. Legierungselemente bei Aluminium sind bei weiten nicht so kritisch wie bei Stahl, das liegt zum einen an der grundsätzlich guten Verfügbarkeit wichtiger Legierungselemente (etwa Silizium, Magnesium oder Mangan) aber auch an den bei weiten geringeren Produktionsmengen von Aluminium verglichen mit Eisen und Stahl.

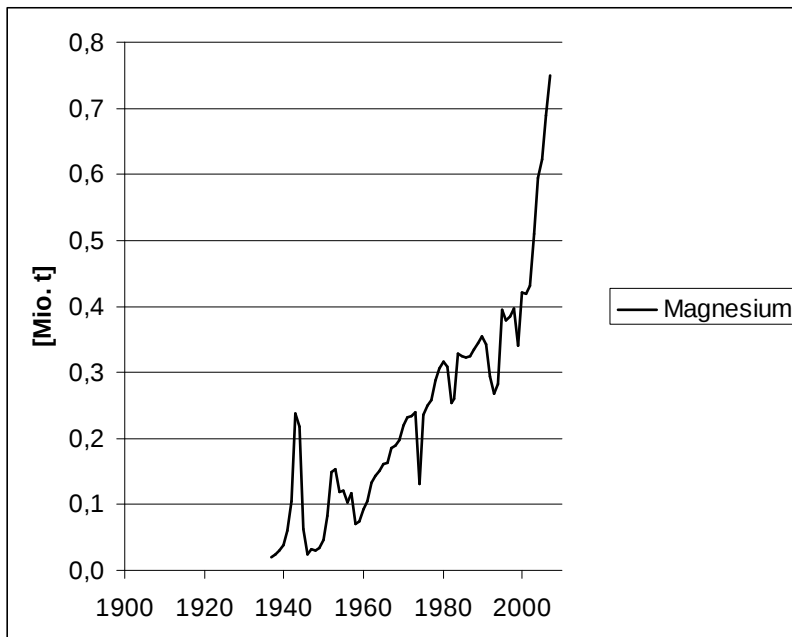
4.1.6 Magnesium

Magnesium ist ein vielfach erwähnter und diskutierter metallischer Leichtbaustoff. Bisher kommt Magnesium jedoch vor allem als Legierungselement für Aluminium und erst dann als eigenständiger Gusswerkstoff zur Anwendung. Daneben wird es auch in der Stahlindustrie zur Entschwefelung von Eisen und Stahl eingesetzt. Den bisweilen vorhergesagten Durchbruch als leichter Werkstoff für eine breite Anwendung hat Magnesium bis heute nicht geschafft. Entsprechend gering sind die Produktionsmengen (vgl. Abbildung 9) mit insgesamt unter 1 Mio. t.

Magnesium ist keineswegs knapp, es kann aus Magnesit gewonnen werden, hier haben insbesondere China, die Türkei und Russland sehr hohe Förderkapazitäten (Kramer 2009). Neben diesem klassischen mineralischen Rohstoff kann Magnesium jedoch auch durch Ausfällung von Magnesiumchlorid aus dem Meerwasser oder auch aus Ablaugen der Kaliindustrie gewonnen werden. Dieses Verfahren wurde bereits im großen Maßstab durchgeführt; so wurden in 2007 rund 41 % der in den USA gewonnenen Magnesiumverbindungen aus Meerwasser gewonnen, global ist die Produktion aus Magnesit jedoch immer noch deutlich dominierend (Kramer 2009).

Derzeit gibt es in Europa keine Produktion von Primärmagnesium, die letzten Produktionskapazitäten sind in 2002 in Norwegen und Frankreich stillgelegt worden (Kramer 2003). Der absolut dominierende Produzent ist China mit einem Anteil von über 80 % (Kramer 2009b). Grundsätzlich besteht hier ein Konfliktpotenzial, das jedoch nicht überbewertet werden sollte, da die Verfahrenstechnik allgemein bekannt und die Rohstoffbasis weit verteilt ist.

Abbildung 9: Entwicklung der globalen Produktionsmengen von Magnesium

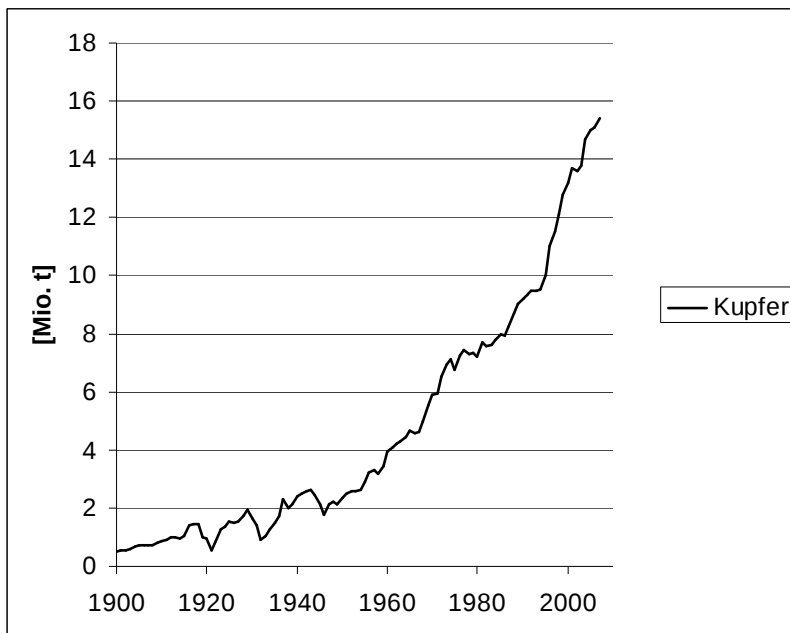


Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage Kelly, Matos 2010. Die Daten umfassen die primäre und sekundäre Produktion.

4.1.7 Kupfer

Die Nachfrage nach und die Produktion von Kupfer hat kontinuierlich zugenommen und in 2007 inzwischen einen Wert von über 15 Mio. t erreicht (USGS 2009).

Abbildung 10: Entwicklung der globalen Produktionsmengen von Kupfer



Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage Kelly, Matos 2010. Die Daten umfassen die primäre und sekundäre Produktion.

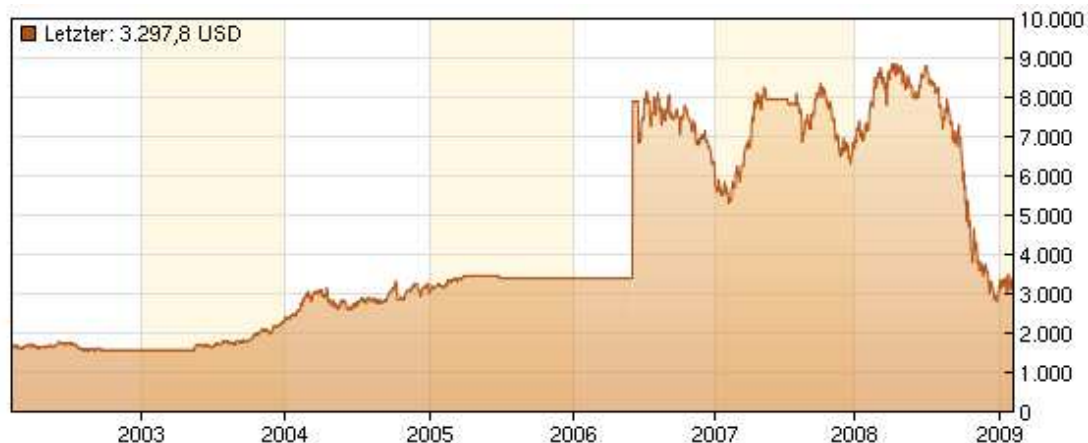
Die Hauptverwendung von Kupfer erfolgt im Bereich der Elektrik und Elektronik. Die zunehmende Durchdringung von Produkten mit Elektronik und der steigende Wohlstand in Schwellenländern führen zu einem kontinuierlich steigenden Bedarf an Kupfer. Daneben kommt Kupfer auch als Strukturwerkstoff und Legierungselement (Messing und Bronze) zu Einsatz.¹²

Die Kupferlagerstätten wie die Förderung sind global sehr unterschiedlich verteilt. Rund ein Drittel der Förderung 2008 (5,6 Mio. t von insgesamt 15,7 Mio. t) und der Reserven sind alleine in Chile verortet, andere wichtige Fördernationen sind die USA, Peru, China, Australien und Russland. In Europa gibt es nur noch in Polen eine bedeutende Förderung mit rund 0,43 Mio. t (USGS 2009).

¹² Vgl. Lucas (2008) mit Ergebnissen zum UFOPLAN-Vorhaben „Kupfereffizienz - unerschlossene Potenziale, neue Perspektiven: Ergebnisse des „Zukunftsdialogs Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung“.

Die gesamten Vorräte an Kupfer werden auf rund 3.000 Mio. t geschätzt, es werden jedoch nur rund 550 Mio. t den Reserven zugerechnet. Weder kurz noch mittelfristig sind beim Kupfer länger andauernde Engpässe zu erwarten, es kann jedoch insbesondere aufgrund beschränkter Förderkapazitäten zu vorübergehenden Engpässen und Preissteigerungen kommen, wie sie in den Jahren 2006-2008 beobachtet werden konnten (vgl. Abbildung 11).

Abbildung 11: Preisentwicklung bei Kupfer



Quelle: Goldman Sachs 2009.

4.1.8 Platin und Platinmetalle (Ru, Os, Rh, Ir, Pd, Pt)

Platinmetalle sind insbesondere als Katalysator in unterschiedlichen Anwendungen von erheblicher technischer Relevanz (Vgl. Saurat/ Bringezu 2009). Im Zusammenhang mit Erneuerbaren Energien werden sie insbesondere in Brennstoffzellen eingesetzt.

Daneben ist Platin auch in einer Reihe anderer Anwendungen bisher kaum zu ersetzen. Dazu gehören etwa Thermolemente und Widerstandsthermometer aber auch Schmelztiegel und andere Hochtemperaturanwendungen. Die Platinproduktion betrug 2008 rund 200 t, hinzu kommen rund 206 t Palladium. Dem stehen Reserven von rund 71.000 t gegenüber, die Ressourcen werden mit 100.000 t abgeschätzt (USGS 2009). Damit sind Vorräte an Platinmetallen für die derzeitige Nutzung hinreichend.

Die verstärkte Nutzung von Brennstoffzellen könnte den Bedarf aus diesem Segment deutlich steigern, gleichzeitig muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Automobilindustrie auch derzeit für mehr als 50 % des derzeitigen Platinmetallverbrauch verantwortlich ist und aufgrund des hohen Exportanteils der Automobilindustrie und des hohen Anteils exportierter Gebrauchtfahrzeuge bereits heute eine hohe Abhängigkeit von Platinimporten besteht..

Die Platinverfügbarkeit dürfte insbesondere im Hinblick auf die hohe Konzentration der Förderung auf wenige Länder (fast 79 % der Förderung im Jahr 2009 stammten aus Südafrika und ca. 11 % aus Russland) sowie der möglicherweise derzeit zu geringe Produktionskapazität problematisch sein. Die Vorräte würden jedoch auch einen deutlichen Ausbau der Brennstoffzellentechnologie ermöglichen.

4.1.9 Industrieminerale

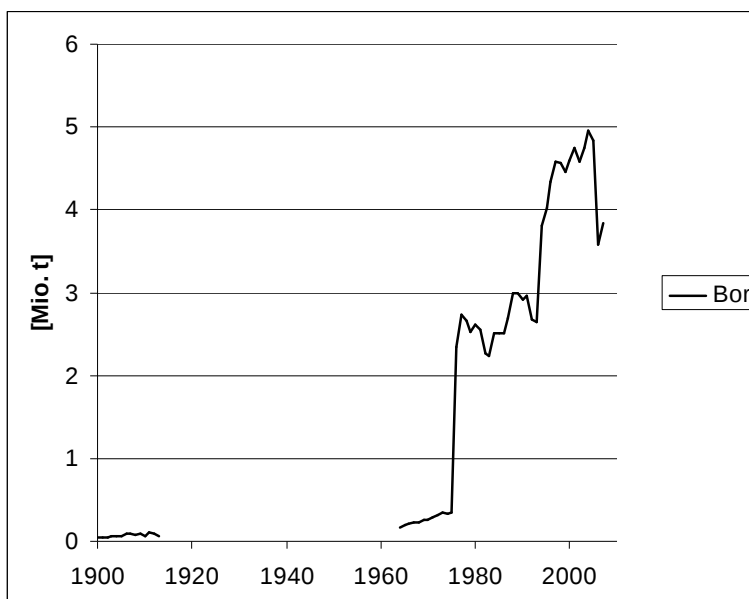
Nicht nur metallische Rohstoffe sondern auch verschiedene Industrieminerale sind von großer Bedeutung für Industrie und Landwirtschaft und können kritische und begrenzende Faktoren technischer und wirtschaftlicher Entwicklungen sein.

Kritisch sind hierbei weniger Massenrohstoffe wie Sand und Kies, Kalkstein, Dolomit, Tonminerale oder Feldspat sondern vergleichsweise seltenere Stoffe. Hierzu gehören z. B. Phosphat, Bor oder Zirkonium.

4.1.10 Borsalze

Borsalze gehören zu den kaum beachteten mineralischen Rohstoffen. Sie sind jedoch interessant, da die Förderung und Vorräte nur auf wenige Ländern verteilt sind und sie in der Glasindustrie kaum und auch als Brandschutzmittel nur schwer substituierbar sind. Die mit Abstand wichtigste Förderung ist die Türkei mit rund 2,25 Mio. t von insgesamt 4,1 Mio. t 2008. Daneben sind insbesondere noch die USA (Fördermenge nicht berichtet), Argentinien, Chile und Russland relevant. Die größten Vorräte finden sich in der Türkei mit 60 Mio. t Reserven (gesamt 170 Mio. t) und 150 Mio. t gesicherter Ressourcen (gesamt 410 Mio. t) (USGS 2009). Damit ist der Bedarf zunächst gedeckt. Die Verwendung von Bor hat jedoch insbesondere in Gläsern deutlich zugenommen (vgl. Abbildung 12), hinzukommt eine zunehmende Verwendung von Borax und Borsäure als Brandschutzmittel für Hölzer und Dämmstoffe. Borsalze können insofern grundsätzlich als kritische Rohstoffe betrachtet werden, da es sich bei den wichtigsten Förderländern jedoch um mit Deutschland und der EU freundschaftlich verbundene Länder handelt, dürfte die Versorgung für Deutschland und die EU wenig kritisch sein.

Abbildung 12: Entwicklung der globalen Produktionsmengen von Bor

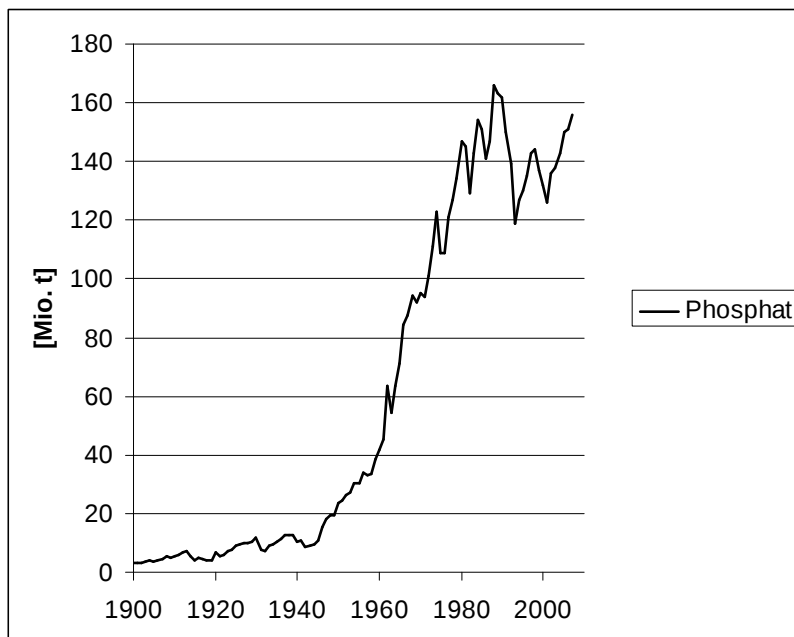


Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage Kelly, Matos 2010

4.1.11 Phosphat

Die genutzte Phosphatmenge hat sich vor allem mit der landwirtschaftlichen Revolution und der Einführung von Kunstdüngern nach dem Zweiten Weltkrieg und verstärkt seit den sechziger Jahren entwickelt. Anders als bei anderen Rohstoffen stagnierte und schwankte die Förderung von Phosphat seit etwa 1980 auf einem hohen Niveau (vgl. Abbildung 13).

Abbildung 13: Entwicklung der globalen Produktionsmengen von Phosphat



Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage Kelly, Matos 2010

Eine Ursache der Stagnation wird in der über längere Zeit stagnierenden landwirtschaftlichen Entwicklung gesehen (Pohl 2005). Der zuletzt zu beobachtende Anstieg der Förderung passt in diesem Zusammenhang gut zu der in den letzten Jahren zu beobachtenden Ausdehnung von Anbauflächen oder allgemeiner der Intensivierung der Landwirtschaft. Hinzuweisen ist auf die Nicht-Substituierbarkeit von Phosphat und damit auf die grundlegende Bedeutung dieses Stoffs für die Nahrungsmittelversorgung sowie auf die gegenwärtig offenen Kreisläufe mit hohen Verlusten (vgl. zur politischen Relevanz: Werland et al. 2010).

Die Vorräte an Phosphat werden in der Öffentlichkeit bisweilen als sehr begrenzt angesehen (vgl. etwa den Eintrag in Wikipedia). Das deckt sich jedoch nicht mit den Angaben der USGS. Bei einer Weltförderung von 167 Mio. t 2008 stehen Reserven von rund 15.000 Mio. t und nachgewiesene Ressourcen von 47.000 Mio. t gegenüber (USGS 2009). Eine kurzfristige Verknappung ist insofern nicht zu erwarten. Aufgrund des über eine längere Zeit stagnierenden Verbrauchs wurden jedoch in den letzten Jahren kaum neue Lagerstätten erschlossen. Hieraus können jedoch u. U. vorübergehende Lieferengpässe entstehen. Problematisch kann hierbei insbesondere sein, dass obwohl die Phosphatvorkommen relativ weit verbreitet sind, große Vorräte gibt es in

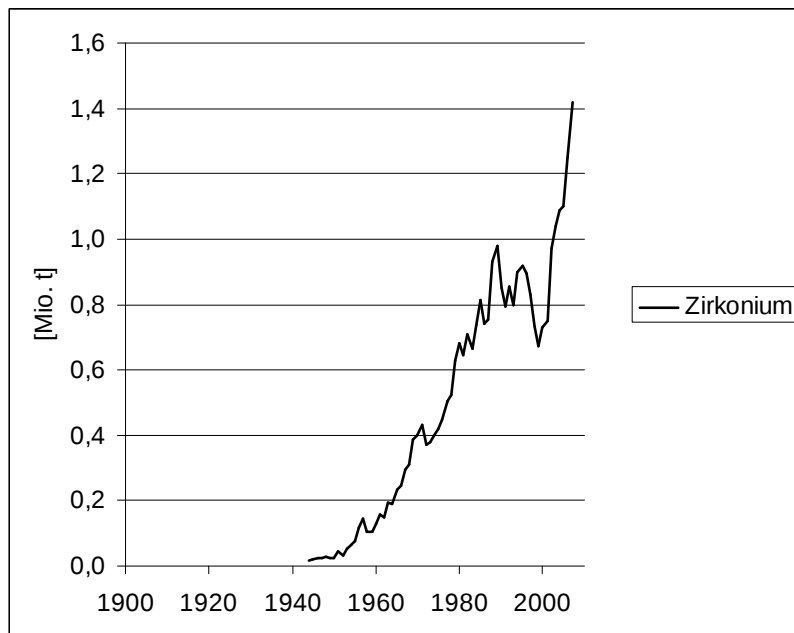
Nordafrika, China, Südafrika, USA Brasilien und Israel, Deutschland und die EU über keine bedeutenden Vorräte verfügen. Daneben kann es zu einer verschärften Konkurrenz um die cadmiumarmen Phosphate kommen, da aufgrund der neugefassten Düngemittelverordnung (DüMV) der Grenzwert für Cd auf 60 mg/kg P_2O_5 begrenzt wurde und zahlreiche Lagerstätten höhere Cd-Gehalte aufweisen. Eine Verringerung des Cd-Gehaltes durch Aufbereitung der Phosphate ist möglich aber aufwändig.

In Länder mit Eisenhüttenindustrie wurden zeitweilig Schlacken (Thomasmehl) aus bestimmten Prozessen der Stahlindustrie als Substitut für Phosphatdünger eingesetzt. Aufgrund seines Chromgehalts wäre der Einsatz von Thomasmehl in der EU heute nicht mehr möglich, aufgrund geänderter Prozesse fällt es in modernen Stahlwerken jedoch auch nicht mehr an.

4.1.12 Zirkoniumoxid und Zirkonium

Zirkonium wird nur in geringen Mengen als Metall eingesetzt. Zirkoniumdioxid (ZrO_2) ist jedoch ein wichtiges keramisches Material für Hochtemperaturanwendungen in der Strukturkeramik und Feuerfestkeramik aber auch als Festkörperelektrolyt für Sauerstoffmesssonden (z. B. λ -Sonden) aber auch Hochtemperaturbrennstoffzellen. Die Verwendung von Zirkonium hat kontinuierlich zugenommen (vgl. Abbildung 14).

Abbildung 14: Entwicklung der globalen Produktionsmengen von Zirkonium



Quelle: Eigene Darstellung, Datengrundlage Kelly, Matos 2010

Die wichtigsten Föndernationen für Zirkonium sind Australien, Südafrika und China. In Europa gibt es keine relevante Produktion. Bezogen auf die Reserven von rund 51 Mio. t und einer Förderung von 1,36 Mio. t in 2008 (USGS 2009) ergibt sich eine statische Reichweite von rund 37 Jahren. Aufgrund der insgesamt geringen Förderung und Reserven wie auch der hohen Nachfragesteigerung ist unklar, ob die Versorgung damit dauerhaft sicherzustellen ist.

Zirkonium und Zirkoniumdioxid ist nicht oder nur im geringen Umfang substituierbar. Die Anwendung als Festkörperelektrolyt beeinflusst in einem hohen Maße die effiziente und umweltfreundliche Führung von Verbrennungsprozessen (Verbrennungsmotoren) und anderen technischen Prozessen (Stahlherstellung, Glasherstellung, Hochtemperaturbrennstoffzellen). Zirkonium ist daher strategisch von nicht unerheblicher Bedeutung. Da die Haupteinsatzmengen von Zirkonium bzw. Zirkoniumverbindungen jedoch in anderen Bereichen liegen (insbesondere Feuerfestkeramik) ist nicht davon auszugehen, dass die Verfügbarkeit von Zirkonium Anlass für Konflikte gibt.

5 Fazit für nicht-energetische Rohstoffe

Bei einer Vielzahl der nicht-energetischen Rohstoffe drohen zwar keine akuten Konflikte. Dennoch lassen sich einige Rohstoffe identifizieren, bei denen Angebotsengpässe und mangelnde Substituierbarkeit in Kombination mit steigender Nachfrage zu zunehmendem Konfliktpotential führen. Besonders kritisch ist dies bei solchen Technologiemetallen einzuschätzen, die für wichtige Zukunftstechnologien benötigt werden; aus der Liste der hier betrachteten Stoffe sind dies Chrom, Nickel, Kobalt, Kupfer, Platin und Zirkon sowie Phosphat aufgrund seiner Bedeutung für die Landwirtschaft und Ernährung. Insofern könnte sich eine Konfliktschneise ergeben, in der die Umweltpolitik in den OECD Ländern zu Konflikten in Entwicklungsländern führt, die sich aus Umweltfolgen und schwachen Governance-Strukturen ergeben (Vgl. Bleischwitz 2010a, 2010b; Bleischwitz/Pfeil 2009.)

Kritisch ist, dass in zahlreichen Fällen die Industrienationen entweder keine eigene Rohstoffbasis haben, oder diese aufgrund schlechter Qualität oder hoher Kosten nicht nutzen und daher vollständig von Importen aus wenigen Ländern abhängig sind.

Auf der einen Seite ist die Nutzung dieser hochwertigen importierten Rohstoffe notwendig um eine hohe Prozesseffizienz zu erreichen und konkurrenzfähig und umweltfreundliche produzieren zu können, auf der anderen Seite entstehen so Abhängigkeiten von wenigen Fördernationen oder Minengesellschaften, die auch ein erhebliches Konfliktpotenzial bergen.

Auffallend ist, dass eine nur geringe Anzahl von Ländern für die Versorgung mit nicht-Energierohstoffen eine überragende Bedeutung haben. Zu diesen Ländern gehören Australien, Südafrika, Brasilien, Chile, Russland, China und Kongo (DRC).

Kritisch ist in diesem Zusammenhang, dass die westlichen Industrienationen insgesamt kaum über die heute genutzten Rohstoffe verfügen und weitgehend auf Importe angewiesen sind. Hieraus entstehen Abhängigkeiten aber auch Unsicherheiten hinsichtlich der Versorgungssicherheit, da auch die Schwellenländer auf dieselben Rohstofflieferanten angewiesen sind.

Aus dieser Konstellation können sich einerseits erhebliche Preisschwankungen, andererseits aber auch langfristig Konflikte ergeben. Abschließend sollte betont werden, dass bei einer Reihe von Rohstoffen die Industrienationen sehr wohl über Vorräte verfügen, diese jedoch aufgrund geringer Qualität oder hoher Kosten oft nicht gefördert werden. Zunehmend relevant werden anthropogene Stofflager.

In Tab. 1 werden die oben analysierten Aspekte zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 1: Zusammenfassende Bewertung der analysierten Aspekte von energetischen und nicht-energetischen Rohstoffen

Rohstoff	Hauptproduzenten, Diversitätsgrad, globale Verteilung. Status Quo.	Substituierbarkeit	Tendenz auf Akteursebene	Erwartete Knappheiten und kritische Punkte	Konfliktrisiko: Kurz-, mittel-, langfristig, historisch
Erdgas	RUS, USA, NOR, IRN, DZA?, LBY, NLD. Bisher regionale Märkte, Anteil LNG zur Globalisierung der Märkte steigt	Unter Klimaschutzaspekten nur durch KE??, EE und EF??. CCS als Langfristoption bisher sehr unsicher.	Produzentenzahl wird geringer, Absinken der Produktion in westlichen Demokratien. Steigende Zahl an Nachfragern. Importabhängigkeiten steigen teils stark an. Strategische Ellipse gewinnt an Bedeutung	Bisher keine Knappheit. Produktionspeak ab 2030 erwartet. Regional/national treten Knappheiten bereits auf (IRN, TUR)	Durch Konzentration am Persischen Golf (instabile Staaten) Konflikte in Zukunft möglich, aber von zahlreichen Faktoren abhängig: Grad der Akteursvernetzung, Einführung von LNG, Festigung von Abhängigkeiten durch neue Pipelines. Bedeutung von RUS für Europa und DEU wächst. Historisch: Nicht-gewaltsame Konflikte zw. RUS und UKR.
Erdöl	OPEC, RUS, USA, NOR. Diversitätsgrad noch relativ hoch, globaler Handel	Niedrig aufgrund der starken Abhängigkeit von Ölprodukten im Verkehrssektor. Steigende Anteile von Agrokraftstoffen.	Starkes Absinken der Produktion in westlichen Demokratien. Steigende Zahl an Nachfragern auf internationalen Märkten: Importabhängigkeiten steigen teils stark an. Strategische Ellipse gewinnt an Bedeutung	Uneinigkeit über Peak-Zeitpunkt. Aber eher früher Zeitpunkt wahrscheinlich. Mangelnde Vorbereitung auf ein solches strukturelles Maximum in allen Ländern. Kritische Punkte: immer mehr Exporteure werden zu Importeuren.	Derzeit Peak-Phase bei konventionellem Öl. Produktion unkonventioneller Ölarten muss stark gesteigert werden, um den Nachfrageanstieg noch nachzuzeichnen. Innergesellschaftliche Konflikte wahrscheinlich (u. a. durch ökologischen Stress). Konflikte durch Investitionen in

Rohstoff	Hauptproduzenten, Diversitätsgrad, globale Verteilung, Status Quo.	Substituierbarkeit	Tendenz auf Akteursebene	Erwartete Knappheiten und kritische Punkte	Konfliktisiko: Kurz-, mittel-, langfristig, historisch
					undemokratische Regimes (z. B. im SDN durch CHN). Historisch: Kriege um Erdöl z. B. in Nigeria (1960-66), Erster Golfkrieg (1980-88); in Teilen durchaus Dritter Golfkrieg (2003). Konflikte: Aceh/Indonesien; Niger-Delta –Entführungen und Angriffe auf Ölförderanlagen seit ca. 2000
Kernenergie	CAN, AUS, KAZ, RUS, NER, NAM Diversitätsgrad noch relativ hoch, globaler Handel. Ein Drittel des Brennstoffs stammt derzeit aus der Anreicherung von HEU	Substituierbarkeit unter Klimaschutzaspekten durch Erdgas, REN und EE. CCS noch sehr unsicher. In der Grundlast durch Kohle ersetzbar	Abgereichertes Uran wird bald nicht mehr zur Verfügung stehen, große Bergbauprojekte stocken. Sinkende Zahl an Anbietern. Aufgrund starker Produktionsschwankungen sind Langfristaussagen schwierig. Strategische Ellipse als Versorgungszentrum weniger wichtig als bei Öl/Gas (nur RUS und KAZ)	Peak-Zeitpunkt bisher nicht so stark thematisiert wie bei Erdöl. Kritischer Punkt Mitte der kommenden Dekade, wenn Kernwaffen-Uran nicht mehr zur Verfügung steht.	Konflikte um Brennstoff eher unwahrscheinlich. Konfliktpotential mehr in der anfälligen Versorgungskette: innergesellschaftliche Konflikte (z. B. durch ökolog. Stress und Gesundheitsbelastungen, starke Ablehnung der KE); Terrorgefahr durch Anschläge auf KE-Infrastrukturen; ungelöstes Endlagerproblem führt zu sinkender Akzeptanz innergesellschaftlich.

Rohstoff	Hauptproduzenten, Diversitätsgrad, globale Verteilung, Status Quo.	Substituierbarkeit	Tendenz auf Akteursebene	Erwartete Knappheiten und kritische Punkte	Konfliktrisiko: Kurz-, mittel-, langfristig, historisch
					Historisch: innergesellschaftliche Konflikte zahlreich, z. B. in DEU (WAA Wackersdorf).
Eisen	Hohe Diversität bei starke Dominanz weniger Länder (China, Brasilien, Australien)	Teilweise substituierbar durch andere Konstruktionswerkstoffe .	Starke Konzentration bei den Rohstofflieferanten, Rohstoffverfügbarkeit ist jedoch langfristig gesichert, erhebliche Preisschwankungen sind möglich.	Die Oligopolbildung führt zu starken Preisschwankungen. Ein Ausweichen auf andere Rohstoffquellen mit niedrigeren Eisengehalten würde die Prozesseffizienz verschlechtern und den Umweltverbrauch erhöhen.	Aufgrund der generell breiten Verfügbarkeit von Eisenerz sind vor allem Wirtschaftskonflikte zu erwarten.
Chrom	Sehr wenige Fördernationen (Südafrika, Kasachstan, Indien)	Als Legierungselement in Stahl bisher nicht substituierbar.	Unverändert starke Konzentration bei den Produzenten.	Starke Preisschwankungen und Preisspekulationen.	
Nickel	Weit verbreitet, aber nur wenige wichtige Fördernationen (insbesondere Russland, Kanada und Australien, daneben auch Indonesien, Neu Kaledonien, Kolumbien, Brasilien, China)	Als Legierungselement in Stahl bisher nicht zu ersetzen. Insbesondere für den Hochtemperaturbereich notwendig.	Konzentration auf wenige Produzenten. Hoher Einfluss von Spekulanten auf die Preise.	Auffallend starke Preisschwankungen durch Spekulationen und starke Nachfrage. Weitere Nachfragesteigerung durch Einsatz in Batterien und als Legierungselement für Stahl ist zu erwarten. Die Effizienz von Wärmekraftwerken	Strategisch wichtiges Metall, das aufgrund ungünstiger globaler Verteilung ein erhebliches Konfliktpotenzial birgt.

Rohstoff	Hauptproduzenten, Diversitätsgrad, globale Verteilung, Status Quo.	Substituierbarkeit	Tendenz auf Akteursebene	Erwartete Knappheiten und kritische Punkte	Konfliktrisiko: Kurz-, mittel-, langfristig, historisch
				hängt zu einem erheblichen Teil vom Einsatz nickelhaltiger Stahlsorten ab.	
Kobalt	Relativ viele Fördernationen, aber eine starke Dominanz vom Kongo. Daneben sind insbesondere Australien und Kuba wichtig.	Eine Substitution ist kaum und nur bei Verschlechterung der Eigenschaften möglich.	Produktion überwiegend als Nebenprodukt, dadurch Mengenbeschränkungen.	Weitere Nachfragesteigerung durch den Einsatz in Stahllegierungen und Superlegierungen sind zu erwarten. Die Effizienz von Turbinen hängt zu einem erheblichen Maße von Kobalt ab.	Aufgrund der Konzentration auf wenige Fördernationen und der hohen Bedeutung vom Kongo als wichtigste Fördernation bei hoher politischer Instabilität weist Kobalt ein beträchtliches Konfliktpotenzial auf.
Aluminium	Bauxit wird nur in relativ wenigen Ländern in großen Mengen gefördert (Australien, Brasilien, China, Guinea, Jamaika, Indien). Europa verfügt über keine relevanten Vorräte.	Eine Substitution von Aluminium ist durch andere Konstruktionswerkstoffe möglich. Grundsätzlich ist auch eine Substitution des Rohstoffs Bauxit durch andere Alumosilikate denkbar.	Aufgrund geologischer Gegebenheit Konzentration der Rohstoffgewinnung auf tropische Regionen. Zunehmende Verlagerung der Aluminiumoxid- und -hydroxiderzeugung in die Förderländer.	Weitere Nachfragesteigerung ist zu erwarten.	Die grundsätzlich sehr großen Vorräte lassen ernsthafte Konflikte unwahrscheinlich erscheinen.
Magnesium	Es gibt eine breite Rohstoffbasis für Magnesium. Da der Gehalt an MgCl in Seewasser genutzt werden kann ist Magnesium praktisch	Eine Substitution ist insbesondere durch Aluminium aber auch durch andere Konstruktionswerkstoffe möglich.	Zwischenzeitlich ist die Produktion von Primärmagnesium in Europa eingestellt worden, insofern besteht derzeit eine Abhängigkeit von	Eine starke Nachfragesteigerung ist zu erwarten.	Konflikte um Magnesium, erscheinen aufgrund der global verfügbaren Rohstoffe sehr unwahrscheinlich, kurzfristige Lieferengpässe

Rohstoff	Hauptproduzenten, Diversitätsgrad, globale Verteilung, Status Quo.	Substituierbarkeit	Tendenz auf Akteursebene	Erwartete Knappheiten und kritische Punkte	Konfliktrisiko: Kurz-, mittel-, langfristig, historisch
	global verfügbar. Dennoch ist derzeit China der absolut dominierende Produzent.		Importen insbesondere aus China.		erscheinen jedoch nicht auszuschließen zu sein.
Kupfer	Geringe Anzahl relevanter Fördernationen, dominierend ist Chile daneben sind auch die USA, Peru, China, Australien und Russland relevant.	Eine Substitution ist teilweise durch Aluminium möglich. Hierbei würden jedoch erhöhte Leitungsverluste auftreten.		Von einer weiteren Nachfragesteigerung ist auszugehen.	Kupfer ist von hoher Bedeutung für Elektrik und Elektronik. Konflikte können um Kupfer können daher nicht ausgeschlossen werden. Die gute Recyclingfähigkeit dürften aber mögliche kurzfristige Lieferengpässe mildern.
Platinmetalle	Sehr geringe Anzahl von Förderländern (Südafrika, Russland)	Eine Substitution von Platinmetallen ist in vielen Anwendungen nicht oder nur bei erheblichen Eigenschaftenverschlechterungen möglich		Eine weitere Nachfragesteigerung ist anzunehmen. Maßgeblich hierfür dürfte insbesondere der Einsatz in Katalysatoren unterschiedlicher Art sein.	Platinmetalle sind von hoher Relevanz für eine Reihe von Technologien, zugleich ist die Produktion deutlich beschränkt. Insofern haben Platinmetalle ein relevantes Konfliktpotenzial
Borsalze	Sehr geringe Anzahl von Fördernationen (Türkei, USA, Argentinien, Chile, Russland)	Eine Substitution von Borsalzen ist für Brandschutzanwendungen möglich. Hierbei wird jedoch u. U. die Umweltverträglichkeit verschlechtert.		Die Verwendung von Borsalzen wird zukünftig wieder zunehmen, insbesondere im Glasbereich.	Borsalze und Borate sind für einige Anwendungen kritisch. Borsalze sind jedoch in allen größeren Wirtschaftsräumen vorhanden. Insbesondere

Rohstoff	Hauptproduzenten, Diversitätsgrad, globale Verteilung, Status Quo.	Substituierbarkeit	Tendenz auf Akteursebene	Erwartete Knappheiten und kritische Punkte	Konfliktrisiko: Kurz-, mittel-, langfristig, historisch
		In Glasprodukten ist eine Substitution kaum möglich.			für die westliche Welt dürfte die Versorgung gesichert sein.
Phosphat	Größere Anzahl von Fördernationen (China, USA, Marokko, Russland sind dominierend)	Eine Substitution von Phosphat in Mineraldüngern ist wegen der Bedeutung von Phosphat für das Leben ausgeschlossen. Der Einsatz von Mineraldünger kann jedoch in weiten Grenzen variieren.		Die Entwicklung bei der Verwendung von Phosphat ist unklar. Relevante Aspekte sind insbesondere die Größe der landwirtschaftlich genutzten Fläche, die Intensität der landwirtschaftlichen Nutzung aber auch der Anteil des ökologischen Anbaus.	Aufgrund verschärfter Grenzwerte kommt zu einer gesteigerten Nachfrage nach Cd-armen Phosphat.
Zirkonium und Zirkoniumdioxid	Die Anzahl der Fördernationen ist sehr begrenzt (wichtig sind Australien, Südafrika, China)	Eine Substitution von Zirkoniumdioxid ist bei den Festkörperelektrolyten bisher nicht möglich. Bei Brennstoffzellen kann auf andere Typen zurückgegriffen werden.		Es wird davon ausgegangen, dass die Verwendung von Zirkoniumprodukten weiter zunehmen wird. Die Verwendung in Brennstoffzellen hat bisher keine relevante Rolle gespielt, das kann sich jedoch mittelfristig ändern.	Die Förderung von Zirkoniumrohstoffen kann den Bedarf derzeit kaum decken. Absehbar wird es auch weiterhin eine kritische Versorgungslage geben.

6 Literaturverzeichnis

- adelphi consult, Wuppertal Institut 2007: Die sicherheitspolitische Bedeutung erneuerbarer Energien. Berlin: Projekt im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Alcoa 2009: 4th Quarter 2008 Analyst Conference, January 12, 2009.
- Angerer, Gerhard et al. 2009: Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Karlsruhe, Berlin: Studie des Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI und des Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung IZT im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie.
- Association for the Study of Peak Oil and Gas (ASPO) 2004: Verschiedene Newsletters des Jahres 2004. Uppsala: The Association for the Study of Peak Oil and Gas.
- Association for the Study of Peak Oil and Gas (ASPO) 2008: Newsletter Nr. 96, Dezember 2008. Uppsala: The Association for the Study of Peak Oil and Gas.
- Bleischwitz, Raimund 2010a: International Economics of Resource Productivity: Relevance, Measurement, Empirical Trends, Resource Policy. In: International Economics and Economic Policy, Special Issue: The International Economics of Resources and Resource Policy, 7:2 – 3, 227 – 244.
- Bleischwitz, Raimund 2010b: Präventive Ressourcensicherheitspolitik: Initiativen und Anforderungen an ein Global Governance System. In: Zeitschrift Sicherheit und Frieden, Schwerpunkt Rohstoffsicherheit, 4 / 2009, 231 – 237.
- Bleischwitz, Raimund und Florian Pfeil (Hrsg.) 2009: Globale Rohstoffpolitik – Herausforderungen für Sicherheit, Entwicklung und Umwelt, Reihe EINE WELT Bd. 23. Baden-Baden: Nomos Verlag.
- Bray, E. Lee 2007: Aluminium (advance release). In: 2007 Minerals Yearbook. Reston: U.S. Geological Survey.
- Bringezu, Stefan und Saurat Mathieu 2009: Platinum Group Metal Flows of Europe, Part II. Exploring the Technological and Institutional Potential for Reducing Environmental Impacts. In: Journal of Industrial Ecology, 13:3, 406-421.
- Bukold, Steffen 2009: Öl im 21. Jahrhundert. Band I. München: Oldenbourg.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) 2008: Kurzstudie zur Verfügbarkeit von Energierohstoffen. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- Edelstein, Daniel L. 2008: Copper. In: 2006 Minerals Yearbook. Reston: U.S. Geological Survey.
- Elsner, Harald, Frank Melcher, Ulrich Schwarz-Schampera und Peter Buchholz 2010: Elektronikmetalle - zukünftig steigender Bedarf bei unzureichender Versorgungslage? Commodity Top News Nr. 33. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).
- Energy Watch Group (EWG) 2007: Die Zukunft der Ölversorgung. Berlin: EWG.
- Esso 2004: Oeldorado. Hamburg: Esso Deutschland.

Frondel, M.; Grösche, P.; Huchtermann, D.; Oberheitmann, A.; Peters, J.; Vance, C.; Angerer, G.; Sartorius, Chr.; Buchholz, P.; Röhling, S.; Wagner, M. 2007: Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. Essen, Karlsruhe, Hannover: Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI), Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).

International Energy Agency (IEA) 2008: World Energy Outlook 2008. Paris: IEA.

Jorgenson, John D. 2008: Iron ore, 2006 Minerals Yearbook. Reston: U.S. Geological Survey.

Kelly, Thomas D. and Matos, Grecia R. 2008: U.S. Geological Survey, Data Series 140, Supersedes Open-File Report 01-006, Version 3.0. Zuletzt eingesehen am 7. Februar 2008 unter <http://minerals.usgs.gov/ds/2005/140/>.

Kelly, Thomas D.; Matos, Grecia R. 2010 U.S. Geological Survey, Data Series 140 - Historical Statistics for Mineral and Material Commodities in the United States. Zuletzt eingesehen am 7. Februar 2008 unter <http://minerals.usgs.gov/ds/2005/140/>.

Kramer, Deborah A. 2003: Magnesium. 2002 Minerals Yearbook. Reston: U.S. Geological Survey.

Kramer, Deborah A. 2009: Magnesium (advanced release), 2007 Minerals Yearbook. Reston: U.S. Geological Survey.

Kramer, Deborah A. 2009: Magnesium Compounds (advanced release). 2007 Minerals Yearbook. Reston: U.S. Geological Survey.

Kuck, Peter H. 2008: Nickel. 2006 Minerals Yearbook. Reston: U.S. Geological Survey.

Loferski, Patricia J. 2009: 2007 Minerals Yearbook - Platinum-Group Metals (advance release). Reston: U.S. Geological Survey.

Lucas, Rainer 2008: Kupfereffizienz - unerschlossene Potenziale, neue Perspektiven: Ergebnisse des „Zukunftsdialogs Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung“. - Wuppertal: Wuppertal Inst. für Klima, Umwelt, Energie.

Michalowsky, Lothar 1994: Neue keramische Werkstoffe. Leipzig, Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.

Nuclear Energy Agency (NEA) 2007: Uranium 2007: Reserves, Production and Demand. Paris: NEA.

Papp, John F. 2008: Chromium. 2006 Minerals Yearbook. Reston: U.S. Geological Survey.

Pohl, Walter L. 2005: Mineralische und Energie-Rohstoffe. Stuttgart: Schweizerbart Verlag.

RWI, ISI und BGR 2006: Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. Essen: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie.

Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW) 2010: Seltene Metalle – Rohstoffe für Zukunftstechnologien, SATW Schrift Nr. 41. Zürich: SATW.

Shedd, K. B 2008: Cobalt. 2006 Minerals Yearbook. Reston: U.S. Geological Survey.

Stephen M. Jasinski 2009: Phosphate rock (advanced release). 2007 Minerals Yearbook. Reston: U.S. Geological Survey.

Supersberger, Nikolaus und Manfred Fishedick 2009: Peak Oil, Energiesicherheit und die Grenzen des Marktes. In: Zeitschrift für Außen- und Sicherheitspolitik 2, 158-170.

U. S. Geological Survey 2008: Mineral Commodity e. g. Cobalt statistics. In Kelly, T. D. and G. R. Matos: Historical statistics for mineral and material commodities in the United States: Reston: U. S. Geological Surveys Data Series 140. Zuletzt eingesehen am 12. März 2009 unter <http://pubs.usgs.gov/ds/2005/140/>.

U. S. Geological Survey 2009: Mineral commodity summaries 2009. Washington, D.C.: United States Government Printing Office.

Von Hauff, Michael 2009: Wirtschaftliche Entwicklung und Energiebedarf in Indien. In: Bleischwitz, Raimund und Florian Pfeil (Hrsg.): Globale Rohstoffpolitik. Herausforderungen für Sicherheit, Entwicklung, Umwelt. Baden-Baden: Nomos.

Wall Street Online 2008: Die Cigar-Lake-Mine von Cameco erlitt erneut einen Wassereinbruch. 14.08.2008. Zuletzt eingesehen am 12. März 2008 unter http://aktien.wallstreet-online.de/2348/nachrichten.html?news_id=2501015&inst_id=2348&market_id=2&spid=ws.

Wellmer, Friedrich-W. 2008: Reserves and resources of the geosphere, terms so often misunderstood. Is the life index of reserves of natural resources a guide to the future? In: Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, 159:4, 575-590.

Werland, Stefan et al. 2010: Elemente einer Ressourcenpolitik für ein nachhaltiges Phosphormanagement und eine Reduktion der Phosphorimporte. Paper zu Arbeitspaket 3 des Projekts Materialeffizienz und Ressourcenschonung (MaRess).

Yunfeng, Y. und Y. Laike, 2009: CO₂ Emissions Embodied in China-U.S. Trade. In: Chinese Journal of Population, Resources and Environment 7:3, 3 – 11.

Zhang, Zhongxiang 2009: Asian energy and environmental policy: promoting growth while preserving the environment, in: Raimund Bleischwitz und Paul J.J. Welfens und ZX Zhang (Hg): Sustainable Growth and Resource Productivity. Economic and Global Policy Issues, Sheffield: Greenleaf Publishing Limited, S. 240 – 30.

